

مَقْدَمَةٌ لِلْبَصَرِيَّاتِ
الْكَلَّاسِيَّةِ وَالْحَدِيثَةِ

Introduction to

CLASSICAL AND MODERN OPTICS

JURGEN R. MEYER-ARENDT, M.D.

Professor of Physics, Pacific University

PRENTICE-HALL, INC., Englewood Cliffs, N.J.

يَشْكُر

مَجْمَعُ اللُّغَةِ الْعَرَبِيَّةِ الْأُرْدُنِيَّةِ

مُؤَسَّسَةُ عَبْدِ الْحَمِيدِ شُومَان

لِتَفْضُلِهَا بِالْإِنْفَاقِ عَلَى تَرْجُمَةِ

هَذَا الْكِتَابِ وَطَبْعِهِ

مَقْدَمَةٌ لِلْبَصَرِيَّاتِ الْكَلَّاسِيَّةِ وَالْحَدِيثِ

تأليف جيرجين ر. ماير أريندت
جامعة الباسفيل

ترجمة
الدكتور عمر حسن الشيخ
الجامعة الأردنية

مراجعة
الدكتور أحمد سالم
جامعة اليرموك

أُشرف على طباعة الكتاب وإخراجه
الدكتور عمر حسن الشيخ

منشورات مجمع اللغة العربية الأردني
ضمن مشروع تعريب التعليم العلمي الجامعي

الطبعة الأولى
عمان - الاردن
١٤٠٣ هـ - ١٩٨٣ م

حقوق الطبع والترجمة محفوظة لمجمع اللغة العربية الاردني
ويمنع تصوير الكتاب أو إعادة طبعه دون اذن من المجمع

المحتويات

صفحة	تصدير المؤلف
٣	المقدمة
٥	
١٣	الجزء الاول : معالجة أولية لتكون الصور
١٥	الفصل ١ : الانعكاس والانكسار
٣٧	الفصل ٢ : المرايا
٥١	الفصل ٣ : العدسات الرقيقة
٨١	الفصل ٤ : الرسم الشعاعي
١٠٥	الفصل ٥ : الثقوب والبيّء وبصريات الالياف
١١٧	الفصل ٦ : المواشير وتحليل الضوء
١٣٣	الفصل ٧ : الزوغانات
١٤٩	الفصل ٨ : تصميم العدسة
١٨١	الفصل ٩ : الآلات البصرية
٢٠١	الجزء الثاني : البصريات الموجبة
٢٠٣	الفصل ١ : الحركة الموجية التوافقية
٢٢٣	الفصل ٢ : التداخل
٢٣٧	الفصل ٣ : حيود فرونهور
٢٥٥	الفصل ٤ : حيود فرنل
٢٧٥	الفصل ٥ : قياس التداخل التطبيقي
٢٩٩	الفصل ٦ : التحالف
٣١٥	الفصل ٧ : محزوزات الحيود
٣٣٧	الفصل ٨ : تداخل الانعكاس المتعدد
٣٥٧	الجزء الثالث : خصائص الضوء والمادة
٣٥٩	الفصل ١ : استقطاب الضوء
٣٩٧	الفصل ٢ : السطوح الفاصلة البصرية

صفحة

٤١١	الفصل ٣:٣ : البصريات الشليرية (بصريات المواد غير المتجانسة)
٤٢٧	الفصل ٤:٣ : سرعة الضوء
٤٣٧	الفصل ٥:٣ : قياس الاشعاع
٤٥٥	الفصل ٦:٣ : تشتت الضوء
٤٧٧	الجزء الرابع : بصريات التحويلات
٤٧٣	الفصل ١:٤ : مطيافية محولة فورييه
٤٩٣	الفصل ٢:٤ : دوال النقل
٥١١	الفصل ٣:٤ : المحولات ذات البعدين
٥٣٧	الفصل ٤:٤ : الهلوجرافيا (التسجيل الضوئي الكامل)
٥٥٥	الجزء الخامس : البصريات الكوانتية (بصريات الكم)
٥٥٧	الفصل ١:٥ : الطبيعة الكوانتية للضوء
٥٧٧	الفصل ٢:٥ : بصريات الالكترونات
٥٩١	الفصل ٣:٥ : الاطياف الذرية
٦١١	الفصل ٤:٥ : الامتصاص
٦٢٩	الفصل ٥:٥ : الليزرات
٦٥٣	الجزء السادس : الكهرومغناطيسية والنسبية
٦٥٥	الفصل ١:٦ : النظرية الكهرومغناطيسية
٦٨٣	الفصل ٢:٦ : البصريات النسبوية
٧١٣	اجابات المسائل الفردية
٧٢٥	قائمة المصطلحات

بسم الله الرحمن الرحيم

تصدير المؤلف

لا حاجةً هنالك إلى تبیین أن البصریات قد تَغیَرتْ بِشکلٍ مُثیرٍ خلالَ العقد المنصرم. ولقد حاولتُ أن أسایِرَ هذه التَغیَراتِ، وأن أقدمَ هنا عرضاً کلیاً مُتوازياً للبصریات الكلاسیکیة والحديثة: فعلى سبیل المثال، فقد طَوَّرتُ البصریاتُ الهندسیةُ العادیةُ بأذخالی المَصْفوفات، بَصَریاتِ الالیاف، انتشار الضوء فی الاوساط غیر المتجانسة، وفحص العدسات بِدَوَالِّ النقل.

ولقد خُصِّصَ حِیزٌ وافرٌ للبصریات الكلاسیکیة مثل الرسم الشعاعی، التداخل، الحيود، الاستقطاب، والأطیاف الذَّریة. ولكن الموضوعات الحديثة مثل مِطیافیة مُحَوَّلة فورييه، معالجة المعلومات البصرية، الهلوغرافیا، وطبعاً اللِّیزرات تُبَحَثُ أيضاً بتفصیل معقول. وتُشكِّلُ النظریةُ الكهرومغناطیسیةُ والبَصَریاتُ التَّشْبُویةُ خاتمةَ الكتاب ونظرةً الى المستقبل.

وعموماً، صُمِّمَ هذا الكتابُ لتَحْقِيقِ أغراضٍ أربعةٍ: فباستطاعة الفیزیائیِّ الذي یحتاجُ الى مُقَدِّمةٍ فی البصریات مع تركیز على النظریة الموجیة وعلى التحويلات والبصریات الَّكوانتیَّةِ ان یستخدمه بفاعلیة، كذلك فقد وُجِّهَ هذا الكتابُ الى الافراد الذين یَعْمَلُونَ لِلْحُصولِ على دَرَجَةٍ مَهَنِیَّةٍ فی مثل طب العیون، قیاس الابصار او البَصَریاتُ الفِزیولوجیة والذين یَحْتَاجُونَ الى المزید من البصریات الهندسیة الكلاسیکیة.

ومن المؤملِ أن یُعینَ الكتابُ الافرادَ الذين یَحْتَاجُونَ مَسْحاً مُفَصَّلاً حسناً لهَئِذِةِ البصریات ولجوانبها الاکثرَ عملیةً بما فی ذلك تَصْمِیمُ العدسات، تَصْحِیحُ الرِّوَعانات، المَنظُوماتِ الكِتادیوبِئِریَّةِ، قیاسُ التداخلِ التَطبیقی، بَصَریاتُ البلورات وتحلیلُ الاستقطاب، التحويلات الرَّادیومِثَریَّةِ، وتَعَرُّفُ الحُرُوفِ تجَریبياً. وأخيراً فإنَّ هذا المؤلفُ

• تحلیل الاطیاف باستخدام مُحَوَّلة فورييه Fourier Transform - انظر الفصل الاول من الجزء الرابع.

مرجع للذين يملكون خلفية في الفيزياء العامة او الهندسة ، و يرغبون في تحديث معرفتهم فيما يتعلّق بالجوانب العديدة للبصريات الكلاسيكية والحديثة .

لقد استمتعتُ بكتابة هذا الكتاب . وبكل تأكيد فقد تطلّب ذلك ساعات عديدة من المحاضرة كما تطلّب صبر العديد من الافراد الراغبين المنتبهين وغير المنتبهين أحيانا ، حتى تم لي بالتجربة والخطأ اكتشاف طريقة مناسبة لنقل المفهومات اليهم . فما هي افضل طريقة نعرض فيها فكرة المستويات الرئيسة ، ككرة بوانكاريه ، استخدام حلزون كزنيه ، وتقلص لورنز؟ وباختصار ، فكيف نُقدّم حقل البصريات الكثير في اتساعه في مستوى مناسب وفترة زمنية معقولة ؟ لا يوجد هنالك اجابة حاسمة وانما مجرد تحسين تدريجي .

لقد ساعد العديد من الزملاء قليلاً وكثيراً في اعداد مادة هذا الكتاب ومراجعتها ، وعلى الأخص أشكر الزملاء التالية اسمائهم لمساعدتهم في إنجاز هذا الكتاب : و . بول جلبرت من جامعة لورنس ، ستانلي س . بلاز من جامعة فلوريدا ، جيمس شتيف برودر من جامعة جاكسونفيل حالياً ، ووليم هـ . جريمشو من مؤسسة نشر برنتيس هول .

جـ . ماير - أرندت

جامعة الباسفيك

فورست جروف ، أوريجون

المقدمة

يُقسَمُ حَقْلُ البصريات غالبا إلى ثلاثة أجزاء: البصريات الهندسية optics، geometric، البصريات الطبيعية Physical، وألْمِطْيَايَةِ Spectroscopy؛ غَيْرَ أَنَّ هذا التقسيمَ غَيْرُ مُرْضٍ لعدة أسباب: فالبصرياتُ الهندسية هي مجرد حالة خاصة يمكن فيها إهمال طول الموجة الضوئية، أما البصرياتُ الطبيعيةُ فهي أكثرُ شمولاً؛ وواقعُ الأمر، فإن علم البصريات الذي يتناولُه علمُ الفيزياء يُنبغي أن يُطلَقَ عَلَيْهِ عِلْمُ البصريات الطبيعية، كما ينبغي أن يُفَرَّقَ مِنْ هذه الناحية بَيْنَهُ وبين كُلِّ من عِلْمَي البصريات الفسيولوجية والتفسيّة.

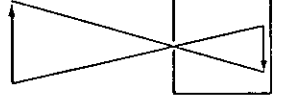
وَيُمْكِنُ تَقْسِيمُ البصرياتِ بصورة أفضل إلى فُصولٍ رئيسية ستة: ففي الْفَصْلِ الأول: معالجة أولية لِتَكُونُ الصُّور، نَتَنَاوَلُ قَوَانِينَ الانعكاسِ وَالْإِنْكَسَارِ والعناصرِ الأساسية مثل المرايا، العدسات، والموشورات التي يُفْضِي تَجْمِيعُهَا إلى مُعْظَمِ الأدواتِ البصرية. ولكن، لَا يُمَكِّنُ الحصولُ على فهمٍ مَا كَيْنَ لِتَكُونِ الصُّور من دونَ اَعْتِبَارِ الطَّبِيعَةِ المَوْجِيَةِ للضوء Wave nature؛ الأمر الذي يقودنا إلى التداخل Interference، الحيود diffraction، والتَّحَالُف coherence، ثُمَّ في مَرَحَلَةٍ لاحقة إلى الاستقطاب polarization، التَشَتُّت، والتفاعلات الأخرى بين الضوء والمادة light and matter.

ومن التَطَوُّراتِ المُهمّةِ في علم البصريات مفهومُ التحويلات transformations، التي رُبَّمَا ظَهَرَ دَوْرُهَا أَوَّلَ مَرَّةٍ في نظرية تَكُونِ الصُّورَةِ في المِجْهَر (المِكْرُوسكُوب)؛ وَلَكِنَّ أَهْمِيَّتَهَا تَتَجَاوَزُ ذَلِكَ كَثِيرًا. وفي الوقت الحاضر، تُشَكِّلُ التحويلاتُ الأساسَ لِكَثِيرٍ مِنْ نَقْلِ المَعْلُومَاتِ الذي يشمل موضوعاتٍ مِثْلَ الآلاتِ القارئةِ والهَلُوْغَرافِيا*. وفي فَصْلِ بصريات الكم أو البصريات الكوانتية نُنَاقِشُ الاطِّيفَاتِ الذرية atomic spectra، الامتصاص absorption، واللَّيْزَر laser؛ أَمَّا فَصْلُ البصريات النسبوية relativistic، فيشير إلى المستقبل كما قُلْنَا في التصدير.

* الرِّسْمُ الضَّوْثِيُّ التَّامُ.

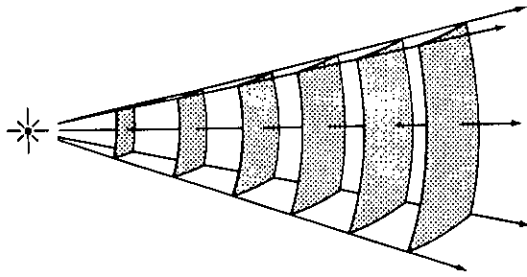
بعض التعريفات

يَنْتَشِرُ الضوء الذي يصدر من مصدر نقطي Point source بالتساوي في الفضاء . وَتَجِدُ هذه الحقيقة تطبيقاً لها في الكاميرا ذات الثقب (الشكل ١) ، ذلك الجهاز البسيط الذي ما زال يُسْتَخْدَمُ الى يومنا هذا نظراً لما له من منافع مُتَفَرِّدة : فالصورة التي تُكوِّنُها تَخْلُو من التشوُّه ، ولها عُمقُ تَرْكِيزٍ جَيِّد depth of focus ، ويمكن الحصول عليها باستخدام كل أنواع الطاقة الكهرومغناطيسية تقريباً من الاشعة السينية القصيرة جدا الى الاشعة فوق الحمراء طويلة المَوجة .

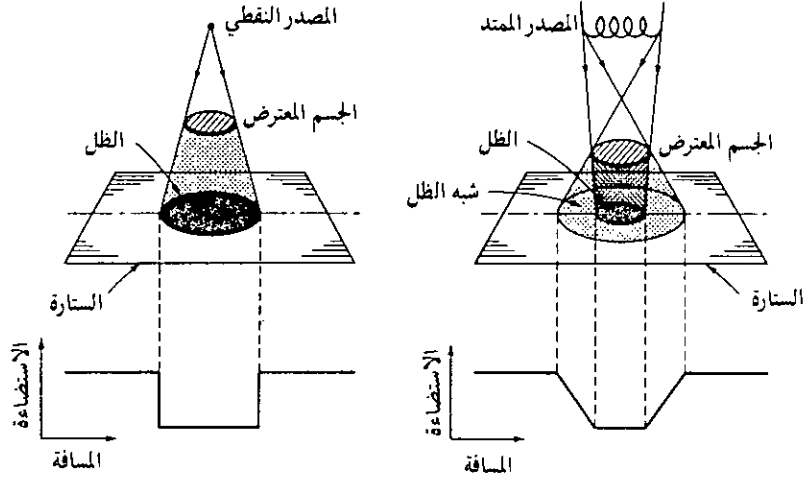


الشكل ١
الكاميرا ذات الثقب

وَتُدْعَى الخطوط التي تُرَسَّمُ في اتجاه انتشار الضوء بالاشعة rays . إنَّ اشعة الضوء - باعتبارها خطوطاً - لا وُجُودَ لها ، ولا يُمكنُ عَزْلُها بالتجربة ؛ فهي توجد فقط نظرياً وعلى اللوح الأسود . وتسمى السطوح التي تُقَامُ عمودياً على الشعاع الجبهات الموجية . وتأخذ هذه الجبهات اشكالاً مختلفة ، ويُمكن تحويلها تبعاً لتَوَجُّع الوسط الذي قَدْ تَمَرُّ فيه (الشكل ٢) . وتشبه عُمْدُ الجبهة الموجية أي الخطوط العمودية المقامة على الجبهة الاشعة من ناحية اساسية : فهي تدلُّ على الاتجاه الذي ينتقل فيه الضوء . وَ يُمكنُ فهم تَكَوُّن الظلال shadows بسهولة من قانون انتشار الضوء في خطوط مستقيمة propagation Law of rectilinear ؛ فعندما يكون مصدر الضوء مصدراً نُقْطِيّاً فإن حدود الظل تُعرَّفُ بدقة باهمال حيود الضوء ، ويكون شكل الظل مماثلاً للمقطع العرضي للجسم المُعْتَرِض ؛ أما عندما يكون مصدر الضوء مصدراً مُمتداً extended ، فإن نصف الظل أو شبه الظل penumbra يَتَكَوَّنُ مُحِيطاً بالظل - الشكل ٣ .

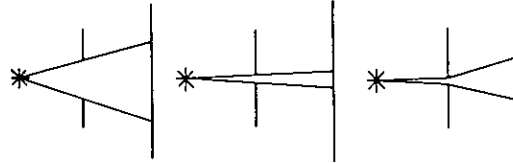


الشكل ٢ : الجبهات الموجية الكرية الصادرة من جسم نُقْطِي .
الخطوط نصف القطرية هي الاشعة أو عُمْدُ الجبهة الموجية .



الشكل ٣: الظلال المتكونة بمصدر نقطي (الى اليسار) ومصدر ممتد (الى اليمين).

ويمكن توضيح ظاهرة الحيود من خلال محاولة عزل شعاع ضوئي واحد (الشكل ٤). فعند وضع ثقبٍ واسعٍ نوعاً ما في مسار الضوء، فإن مساحة كبيرة من الستارة تُضاء؛ ويتصغير الثقب فإنَّ المساحة المضاءة تُصغرُ أيضاً (الرسم المتوسط في الشكل ٤). فهل يُمكن اذن عزل شعاعٍ ضوئيٍّ واحدٍ بجعل الثقب صغيراً جداً؟ ان التجربة تُظهر ان حزمة الضوء pencil of rays، رُغم كونها لا ترى بوضوح، تأخذُ بالا تساع عند تصغير الثقب الى قُطرٍ مُحدد. وتُفسَّرُ هذه الظاهرة النقص في حِدَّة اي دِقَّة حَوَافِّ الظلال.



الشكل ٤: محاولة لعزل شعاع ضوئي منفرد

ان الحيود والتداخل اساسيان للبصريات الطبيعية؛ وإنَّ مفعوليَّهما لا يُشاهدان بسهولة لأنَّهما يَتطلَّبَان ابعاداً صغيرة وشِدَّة استضاءة منخفضة؛ ومع هذا فهناك استثناءات. فاذا نظرت في الليل الى مُصدِّرٍ ضوئيٍّ بعيدٍ عبَّرَ قماشٍ مَظَلَّةٍ مطر مفتوحة، فانك ستشاهد ما يُشبه المِراوَحَ الضوئية الملونة التي تَمْتدُّ في اتجاهاتٍ مُتعددة. ان هذه المِراوَحَ الضوئية تَتكوَّن بحِيود الضوء. ويحدث مثلُ هذا التأثير لأنَّ بُؤْيُ العين نادراً ما يكونُ مُدَوَّراً تماماً، ذلك أن الأجزاء

القصيرة المستقيمة من حافة البؤبؤ تتسبب في ظهور مراوح ذات شدة ملحوظة ؛ ولذا فإن النجوم قد مُثلت في فنون جميع العصور بأجسام تتألف من حشد من النقاط ؛ ومهما يكن ، فإن النجم الذي يُمثلُ بعددٍ فرديٍّ من النقاط كما يظهر في الشكل ٥ يستحيلُ وجوده من وجهة نظر البصريات الموجية ، ذلك لأن المراوح الضوئية لا تظهرُ ضرورةً إلا في أزواج .

ان هذه المقدمة الموجزة لبعض حقول البصريات قد تُظهرُ لك أن البصرياتِ حقلٌ علميٌّ واضحٌ ، مُنطقيٌّ ، مُثيرٌ ، وكما سنرى جميلٌ : فمُعظَمُ تذوقنا للعالمِ الخارجيّ من طبيعةٍ وفنٍّ يَتَمُّ مِنْ طَرِيقِ الصَّوِّ . وَالآنَ نَسْتَقِلُّ وَنَبْحَثُ الْجَوَانِبَ الْمُخْتَلِفَةَ لِلْبَصْرِيَّاتِ بِحَسَبِ مَا رَسَمْنَاهُ .



الشكل ٥ : تصور الفنان لنجم [لوحة نافذة معلقة في كنيسة القديس جون في هرفورد ، ألمانيا ؛ تاريخها القرن الرابع عشر .]

اقتراحات للقراءة الاضافية

سَتَقْدُمُ لَكَ فِي نِهَآيَةِ كُلِّ فَصْلٍ قَائِمَةٌ بِاِقْتِرَاحَاتٍ لِمَزِيدٍ مِنَ الْقِرَاءَةِ مُرْتَبَةً بِحَسَبِ أَفْضَلِيَّتِهَا وَلَيْسَ أَبْجَدِيًّا. وَعِلَآوَةً عَلَى ذَلِكَ فَإِنَّ هُنَاكَ مَرَاجِعَ أُثْبِتَتْ فِي الْحَوَاشِي فِي كُلِّ فَصْلٍ؛ وَهِيَ عَلَى نَوْعَيْنِ: بَعْضُهَا يُشِيرُ إِلَى الْمَصْدَرِ الْأَصْلِيِّ، وَبَعْضُ الْآخَرِ يُشِيرُ إِلَى مَرَاجِعَاتٍ عَامَّةٍ حَدِيثَةٍ فِي الْمَوْضُوعِ.

M. Herzberger, "Optics from Euclid to Huygens," *Applied Optics* 5 (1966), 1383-93.

E. S. Greene, *Principles of Physics* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1962).

مراجع في علم البصريات

A. L. Schawlow, "Lasers and Light," *Scientific American* (San Francisco, Calif.: W.H. Freeman and Co. Publishers, 1969).

R. S. Longhurst, *Geometrical and Physical Optics*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967).

F. A. Jenkins and H.E. White, *Fundamentals of Optics*, 3rd ed. (New York: McGraw-Hill Book Company, 1957).

C. L. Andrews, *Optics of the Electromagnetic Spectrum* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1960).

G. R. Fowles, *Introduction to Modern Optics* (New York: Holt, Rinehart & Winston, Inc., 1968).

R. W. Ditchburn, *Light* (New York: Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc., 1963).

N. V. Klein, *Optics* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1970).

M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 4th ed. (Oxford, London, New York: Pergamon Press, 1970).

S. G. Lipson and H. Lipson, *Optical Physics* (New York: Cambridge University Press, 1969).

وَإِذَا مَا رَغَبْتَ فِي الْعَمَلِ فِي مَشْرُوعٍ بَحْثِيٍّ فِي عِلْمِ الْبَصَرِيَّاتِ ، فَإِنَّ عَلَيْكَ الرَّجُوعَ إِلَى
المجلات العلمية التالية :

مجلة الجمعية البصرية الامريكية	Journal of the Optical Society of America
البصريّات التطبيقية	Applied Optics
السماء والتلسكوب	Sky and Telescope
الاميركية العلمية	Scientific American

المسائل

- ١ : ٠ اشرح كيف تَعْتَمِدُ الصُّورَةُ المَكُونَةُ فِي الكَامِيرَا ذاتِ الثُّقْبِ عَلَى :
أ . حجم الثقب
ب . شكل الثقب
ج . المسافة بين الثقب والحاجز (الفيلم) .
- ٢ : ٠ إذا كانت المسافة بين الجسم والصورة المَتَكُونَةُ بِالكَامِيرَا ذاتِ الثقبِ مِثْرَيْنِ (٢م) ، فما هي المسافة من الثقب التي ينبغي وَضْعُ الْحَاجِزِ عِنْدَهَا لِيَكُونَ حَجمُ الصورة المَتَكُونَةِ خمس (١/٥) حَجمِ الجسم ؟
- ٣ : ٠ ما عُلوُّ بَرْجِ طَوْكُ ظِلِّهِ عَلَى أَرْضٍ مُستَوِيَةٍ افقيّة ٤٨ متراً ، إذا كان طَوْكُ ظِلِّ مُشَاهِدٍ فِي نَفْسِ الْوَقْتِ ٣م ، علماً أَنَّ طَوْلَ الْمُشَاهِدِ ١,٨٠م ؟
- ٤ : ٠ اسْتُخْدِمَت كَامِيرَا ذاتِ ثقبٍ لَتَكُونُ صُورَةً بِالْأَشْعَةِ السَّيْنِيَةِ لِلشَّمْسِ . فَاذَا كَانَ الْقَطْرُ الزَّاوِيُّ لِلشَّمْسِ يُسَاوِي تَقْرِيْباً ١/٢ درجة ، فما هُوَ طَوْكُ الكَامِيرَا (المسافة بَيْنَ الثقبِ والفيلم) الَّذِي يُعْطِي صُورَةَ لِلشَّمْسِ قُطْرُهَا ١سم ؟
- ٥ : ٠ تَبْلُغُ الْمَسَافَةُ بَيْنَ مَصْدَرِ ضَوْئِي نُقْطِيٍّ وَجَسْمٍ ذِي مَقْطَعٍ عَرَضِيٍّ دَائِرِيٍّ رُبْعَ (١/٤) الْمَسَافَةِ بَيْنَ الْجَسْمِ وَظِلِّهِ ، فما هي نِسْبَةُ مَسَاحَةِ الْمَقْطَعِ الْعَرَضِيِّ لِلْجَسْمِ إِلَى مَسَاحَةِ ظِلِّهِ ؟
- ٦ : ٠ تَخَيَّلْ نَفْسَكَ تَنْظُرَ إِلَى شَجَرَةٍ عَبْرَ أَنْبُوبِ طَوْلِهِ ٥٠سم ، وَقَطْرُهُ الدَّاخِلِي ١سم ؛ فَاذَا أَمَكَنَّكَ رُؤْيُ الشَّجَرَةِ تَمَاماً مِنْ دُونِ تَحْرِيكِ الْأَنْبُوبِ ، فما الْمَسَافَةُ الَّتِي تَكُونُ بَيْنَكَ وَالشَّجَرَةَ ، علماً أَنَّ طَوْلَ الشَّجَرَةِ ٢٠م ؟

- ٧:٠ تكونت صورة طولها ٥ سم لعمود تليفون بالكاميرا ذات الثقب . وعند تحريك الكاميرا (٥) أمتار بعيدا عن عمود التليفون ، صَغُرَ طول صورته الى ٤ سم ؛ ولارجاع الصورة الى طولها السابق (٥ سم) ، لَزِمَ زيادةُ طولِ الكاميرا ٤ سم . فما طول عمود التليفون ؟
- ٨:٠ قد تعاني الجَبْهَاتُ الموجيةُ عند مرورها في أوساط مُعيَّنة أنواعا مختلفةً من التشوه . فاذا كانت جبهةٌ موجيةٌ ، على سبيل المثال ، تُشَبِّهُ شكلَ صفيحة معدنية متجعدة (متموجة) ، فَبَيِّنْ كَيْفَ يُمْكِنُكَ تَمْثِيلُ الأشعةِ التي تُناظرُ تلكَ الجبهةَ الموجيةَ ؟
- ٩:٠ وضع مصدر ضوئي قطره ١٠ سم على بعد مترين الى يسار ستارة ؛ كما وضع جسم مُعتم دائري في منتصف المسافة بين الستارة والمصدر الضوئي : (أ) ما قطر الظل المتكون ؟ (ب) ما عَرَضُ شبه الظل المتكون ؟ وَضَحْ اجابتك بشكل مناسب .
- ١٠:٠ غُلِّقَ جِسْمٌ معتمٌ مَدَوَّرٌ قطره ٢٠ سم بين سقف غرفة ما وأرضها بحيث كان ارتفاعه عن أرض الغرفة ٨٠ سم ، وكان قطر ظل الجسم على الأرض ١٠ سم ، اما قطر شبه الظل فكان ٦٠ سم . فاذا كان المصدر الضوئي المدور فوق الجسم مباشرة ، فجد :
- (أ) علو المصدر الضوئي عن الأرض (ب) قطر المصدر الضوئي . أجب عن (أ) بالرسم وعن (ب) حسابيا .
- ١١:٠ عُكِّسَ ضوءُ الشمسِ بوساطة مرآة مستوية صغيرة جدا بعدها ٢×٢ م . جد شكل المساحة المضاءة على ستارة تبعد : (أ) ١ سم ، (ب) ٢ مترا عن المرآة . وَضَّحْ اجابتك .
- ١٢:٠ نُظِرَ الى مصدر ضوئي بعيد عبْرَ ثقب صغير شكَّله مُضَلَّعٌ غيرُ منتظم . ارسم «المراوح» الضوئية المتكونة بحيود الضوء من الأطراف المستقيمة للمضلع غير المنتظم ؟

الجزء الأول

معالجة أولية لِتَكُون الصّور

لا يمكن رؤية الضوء نَفْسِه : فنحن لا نرى فعلا الضوء الصّادر من مصباح قوي ، وإنما نرى فقط دقائق الغبار في الهواء التي تَسْطَعُ في الضوء ؛ وفي غرفة الصف فاننا نرى حزمة من الأشعة تَمَسُّ خفيفا صفحة من الخشب الرقائقي مطلية باللون الأبيض غير الساطع أو مُعَبَّرَةٌ بمسحوق أبيض .

ويمكن فقط فَهْمُ تكون الصّور تماما بتناولنا اياه بمزيد من التفصيل ، وباستخدام بعض الرياضيات الدقيقة ؛ ولكن عمل الادوات البسيطة والآلات يُمكنُ تفسيرُه بسهولة . فاذا أردنا معرفة نوع الصّورة المتكونة بمرآة أو عَدَسَةٍ أو تِلْشُكُوب ، فإن كُلَّ ما نحتاجُه هُوَ عبارة عن مُعادلات بسيطة مُعَيَّنة أو الرّسْم الشعاعي وَوَقْعي بِالزَّوْغان الضوئي aberration وحدود الحزم الضوئية . فهذا المنحى هو الذي سَتَتَّبِعُ في المعالجة الأُولية التالية لِتَكُونِ الصّور.

الفصل ١ : ١

الانعكاس والانكسار Reflection and Refraction

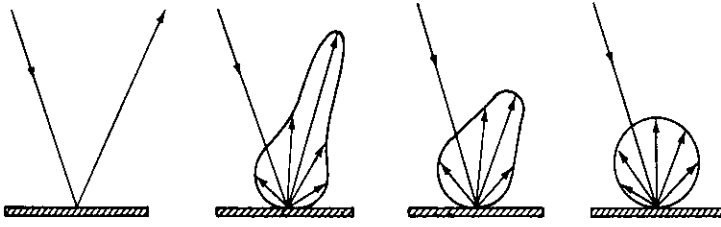
يَمُرُّ الضوءُ في وَسَطٍ ما من دون اضطرابٍ يعترضه فقط إذا ما كان الوسط شفافاً transparent . وإذا ما مرت طاقة الضوء باعتبارها مجرد طاقة لا غير عبر وسط ما ومن دون اعتبار تفصيلاتها الدقيقة ، فإن الوسط يسمى نصف شفاف translucent ، وإذا لم يَمُرَّ الوسط تماماً بأي ضوء ، فإنه يكون معتماً opaque ؛ أما إذا أضعف الوسط الضوء فقط ، فإن تلك العملية تسمى الامتصاص absorption .

وعند الحد الفاصل بين وسطين ، يُمكنُ أن يَحْدُثَ للضوء واحدٌ أو أكثر مما يلي : إذ يُمكنُ أن يَمُرَّ الضوء في الوسط الثاني أو يَمُرَّ أن ينعكس ، أو يمكن أن ينحرف عن اتجاهه الأصلي ، ويسمى ذلك الانحراف بالانكسار.

الانعكاس

يكون الانعكاس اما منتظماً أو غير منتظم أو خليطاً منهما (الشكل ١) . ويحدث الانعكاس المنتظم Specular على السطوح المعدنية المصقولة الملساء ؛ ولكن لا يمكن رؤية السطح المصقول الملس تماماً إذا ما أُخِذَ الانعكاس المنتظم فقط . ان وجود عدد قليل من دقائق الغبار على ذلك السطح يُحيلُ بعض الضوء من الانعكاس المنتظم الى الانعكاس غير المنتظم ، الأمر الذي يجعلُ رؤية السطح مُمكنَةً .

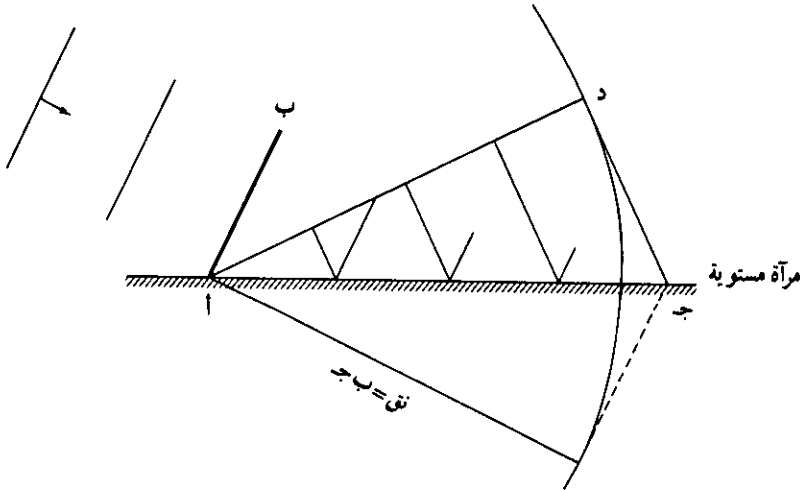
وكمثال على الانعكاس غير المنتظم ، يُمكنُ أخذ انعكاس الضوء عن سطح ورقة بيضاء ، فالانعكاس غير المنتظم أمر يرتبط بمساحة السطح ؛ ذلك أن انعكاس الضوء عن كل جزء صغير جداً من السطح غير المنتظم يكون انعكاساً مُنتظماً .



الشكل ١: التوزيع الزاوي للضوء في حالتَي الانعكاس المُنتَظِم (الرسم الى أقصى اليسار) والانعكاسِ غَيرِ المُنتَظِم (الرسم الى أقصى اليمين). إنَّ السطح الى أقصى اليسار سَطْحٌ تَامُّ المُلَوَسَة، أما السَطْحُ الاخرى فتزدادُ خُشُونَتُها من اليسار الى اليمين.

الانعكاس عن المرآة المستوية

أفترض أن الطرف الأيمن (أ) لَجَبْهَةٍ مَوْجِيَةٍ مُسْتَوِيَةٍ (أب) قد وصلَ سَطْحَ مرآةٍ مستوية (الشكل ٢). فبعد فترة من الزمن يصلُ الطرفُ الأيسرُ (ب) لِلجَبْهَةِ المَوْجِيَةِ النُقْطَةَ (جـ) على السطح. وَلتُحَدِّدَ الجَبْهَاتِ المَوْجِيَةِ المُنْعَكِسَةَ عن المرآة، أرسمُ من النقطة (أ) قَوْساً دائرياً نَصْفَ قُطْرِهِ ب جـ. إنَّ قِطْعَةَ الخَطِّ المستقيم المرسومة من (جـ) والتي تماسُ ذلك القوسَ أي القِطْعَةَ جـ د تُحَدِّدُ الوضعَ الجديدَ لِلجَبْهَةِ المَوْجِيَةِ بَعْدَ الانعكاس.



الشكل ٢: الجبهات المَوْجِيَةِ المستوية المنعكسة عن مرآة مُسْتَوِيَةٍ

مبدأ فيرما٢ Fermat's Principle

مبدأ فيرما٢ للانعكاس

يُمْكِنُ اشتقاقُ ثلاثةٍ من أهمِّ قوانينِ البصرياتِ الهندسيةِ مِنْ مَبْدَأِ فيرما٢^١. أما القوانينُ الثلاثةُ فهي: قانونُ انتشارِ الضوءِ في خطوطٍ مُستقيمةٍ، قانونُ الانعكاسِ، وقانونُ شيلٍ في الانكسارِ Snell's Law. ففي حالاتٍ كثيرةٍ يختارُ الضوءُ في انتقاله من نُقْطَةٍ إلى أخرى المسارَ ذا الزمنِ الأقلِ؛ وفي حالاتٍ أخرى، يَتَّبِعُ الضوءُ المسارَ الأعْظَمَ أو مسارَ القيمةِ المستقرة Stationary Value.

وَأَوَّلًا نَشْتَقُّ مَبْدَأَ فيرما٢ للانعكاسِ (الشكل ٣). إِنَّ الضوءَ الصَّادِرَ مِنْ أُنْتَعَكِسُ عَنْ الْمِرَاةِ م إِلَى النُّقْطَةِ ب. إِنَّ الزَّاوِيَتَيْنِ α ، β عَلَى التَّرْتِيبِ هُمَا زَاوِيَتَا السَّقُوطِ وَالْانْعِكَاسِ؛ أَمَّا بُعْدَا النُّقْطَتَيْنِ أَوْ بَ عَنِ الْمِرَاةِ فَهُمَا ل، لَ عَلَى التَّوَالِي. وَهَكَذَا فَإِنَّ طَوْلَ مَسَارِ الضوءِ الهندسي (ط) مِنْ النُّقْطَةِ أ إِلَى النُّقْطَةِ ب يَكُونُ:

$$ط = \sqrt{ل^2 + س^2} + \sqrt{ل^2 + (د-س)^2} \dots [١:١-١]$$

حيث س وَد كَمَا فِي الشَّكْل ٣.

وَإِذَا كَانَ مَبْدَأُ فيرما٢ صَحِيحًا، فَان مُشْتَقَّ ف بِالنِّسْبَةِ لِ (س) يَجِبُ أَنْ يَكُونَ صَفْرًا، أَيْ أَنْ: $\frac{دط}{دس} = \text{صفرًا}$.

وَبِأَخْذِ الْمَشْتَقَّةِ $\frac{دط}{دس}$ مِنَ الْمَعَادِلَةِ [١:١-١]، نَجِدُ أَنْ:

$$\frac{دط}{دس} = \frac{1}{\sqrt{ل^2 + س^2}} + س \cdot \frac{1}{\sqrt{ل^2 + (د-س)^2}} = \text{صفر}$$

+ نسبة إلى الرياضي الفرنسي بيار فيرما٢ (١٦٠١-١٦٦٥).

* $\frac{دط}{دس}$ هي مشتقة ف بالنسبة إلى س. دس تعني تفاضلي س، دط تفاضلي ط.

وَمِنْهَا نَحْصِلُ عَلَى الْمَعَادِلَةِ التَّالِيَةِ :

$$\frac{س - د}{\sqrt{٢(س-د) + ٢ل}} = \frac{س}{\sqrt{٢س + ٢ل}}$$

وَبِالرَّجُوعِ إِلَى الشَّكْلِ ٣ ، وَبِاسْتِخْدَامِ قِيَمَتِي جَا ١ ، جَا ٢ :

$$[\frac{س - د}{\sqrt{٢(س-د) + ٢ل}} = جَا ٢ ، \frac{س}{\sqrt{٢س + ٢ل}} = جَا ١]$$

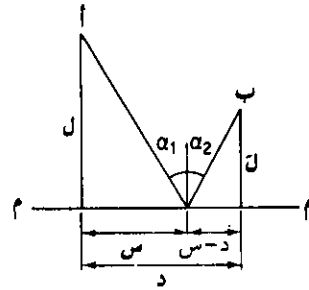
يَتَبَيَّنُ أَنَّ :

$$جَا ٢ = جَا ١$$

[٢-١:١]

أَيُّ أَنَّ ١ جَا ٢ = ١ جَا ١

وَتُعَبَّرُ الْمَعَادِلَةُ الْأَخِيرَةُ عَنْ قَانُونِ الانْعِكَاسِ الْأَوَّلِ : زَاوِيَةُ السَّقُوطِ تُسَاوِي زَاوِيَةَ الانْعِكَاسِ .



الشَّكْلِ ٣ : مَبْدَأُ فِزْمَاتِ لِلانْعِكَاسِ

• لَقَدْ كَانَ هَذَا الْقَانُونُ مَعْرُوفًا لِأَقْلِيدِسِ الْأَسْكَندَرِي الَّذِي عَاشَ فِي مِصْرَ حَوَالِي ٣٠٠ قَبْلَ الْمِيلَادِ ،

وَكُتِبَ كِتَابُ : مَبَادِيءُ الْهَنْدَسَةِ ؛ وَقَدْ نُشِرَ هَذَا الْكِتَابُ فِي طَبْعَةٍ مُعَاَصِرَةٍ : مَبَادِيءُ الْهَنْدَسَةِ Geometry

Elements of (نِيو يورْك : مَنَشُورَاتُ دُوفِرِ Dover Publications ، ١٩٥٦) .

وَيُنْصَحُ قَانُونُ الانعكاسِ الثاني الذي لا نوردُ اشتقاقه هنا بالتفصيل أَنَّ الشعاعَ الساقِطَ، الشعاعَ المنعكسَ، والعمودَ المُقامَ على السطحِ العاكسِ عند نقطة السقوط تقعُ كُلُّها في مُستوًى واحد. وَيُسَمَّى ذلك المستوًى بِمُستوى السقوط، وهو يتعامدُ مع السطحِ العاكسِ.*

مَبْدَأُ فِرْمَاتِ لِلانكسار

أَفترض أَنَّ أ نقطةُ بدايةِ الشعاعِ الضوئِيِّ المُنكسرِ عند السطحِ ح ح، وَأَنَّ النقطةَ ب هي نهايته. إِنَّ الضوءَ يَخْتَارُ مسارهَ ماراً بالنقطةِ هـ، بحيثُ يَقْطَعُ المسافةَ مِنْ أ إلى ب في أَقَلِّ زَمَنِ مُمَكِّن. لِنَفترض أَنَّ بُعْدَي النقطتين أ، ب عَنِ السَّطحِ ح ح هما ل، د على الترتيب (الشكل ٤). ان طولَ مسارِ الضوء ط من أ إلى ب يكونُ إذاً:

$$ط = \sqrt{ل^2 + س^2} + \sqrt{ل^2 + (د-س)^2} \dots\dots\dots [١:١-٣]،$$

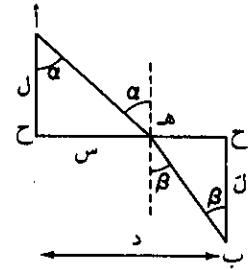
كما يكون الزمن الذي يَسْتَعْرِفُهُ الضوءُ لقطعِ المسارِ ط:

$$ن = \frac{\sqrt{ل^2 + س^2}}{ع_١} + \frac{\sqrt{ل^2 + (د-س)^2}}{ع_٢} \dots\dots\dots [١:١-٤]،$$

حيث ع_١، ع_٢ هما سُرْعَتَا الضوء في الوسطين بالترتيب. ولكي يأخذَ الزمن ن قيمته الصغرى، وَجِبَ أَنْ تكون المشتقة $\frac{دن}{دس} = \text{صفر}$ ،

أي أَنَّ:-

$$\frac{دن}{دس} = 0 = \frac{س}{ع_١ \sqrt{ل^2 + س^2}} - \frac{(د-س)}{ع_٢ \sqrt{ل^2 + (د-س)^2}} \dots\dots\dots [١:١-٥].$$



الشكل ٤: مَبْدَأُ فِرْمَاتِ فِي الانكسار

ومن الرسم في الشكل ٤ يَتَبَيَّنُ أَنَّ المعادلةَ [١:١-٥] تُكافئُ المعادلةَ التالية:

* لقد وَصَفَ هذا القانونَ أَوَّلَ مرةٍ الخازنُ وابن الهيثم اللذان عاشا في القاهرة حوالي عام ١١٠٠ ميلادية

انظر المرجع:

Opticae Thesaurus Alhazeni, etc., item Vitellonis ... Libri X, etc. F. Risner, ed. (Basle, 1572).

$$\text{صفر} = \frac{\text{جا } \beta}{\text{ع}_2} - \frac{\text{جا } \alpha}{\text{ع}_1}$$

أني أن:-

$$[6-1:1] \quad \dots\dots\dots \frac{\text{جا } \alpha}{\text{ع}_2} = \frac{\text{ع}_1}{\text{ع}_2} = \frac{\text{جا } \alpha}{\text{ع}_1}$$

حيث C سرعة الضوء في الفراغ المطلق.

ومن المعادلة [6-1:1] يتبين أن:

$$[7-1:1] \quad \dots\dots\dots \boxed{\frac{\text{جا } \alpha}{\text{ع}_1} = \frac{\text{جا } \beta}{\text{ع}_2}}$$

وتمثل هذه المعادلة قانون سنيل في الانكسار.*

وتسمى النسبة $\frac{\text{جا } \alpha}{\text{ع}_1}$ بمعامل الانكسار النسبي للوسط الثاني بالنسبة للوسط الأول،

وهذه النسبة تساوي $\frac{\text{ع}_2}{\text{ع}_1} = \text{ع}_2 \text{ع}_1^{-1}$ ، [ع₁ سرعة الضوء في الوسط الأول، ع₂ سرعة الضوء في الوسط الثاني].

وإذا كان معامل الانكسار للوسط الأول وحدة واحدة كما هو الحال للفراغ، فإن معامل الانكسار النسبي للوسط الثاني بالنسبة للوسط الأول $\frac{\text{ع}_1}{\text{ع}_2}$ يصبح مساوياً لمعامل الانكسار المطلق.

ومثل الانعكاس، فللانكسار قانونان: (١) قانون سنل و (٢) القانون الذي يتنص أن الشعاع الساقط، الشعاع المنكسر، والعمود المقام على الحد الفاصل بين الوسيطين عند نقطة

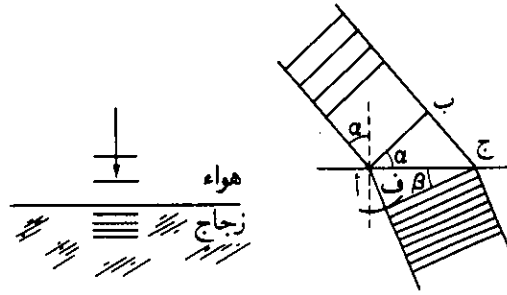
* سمي هذا القانون باسم فيلبرورد سنل Willebrord Snell (١٥٩١-١٦٢٦)، أستاذ الفيزياء والرياضيات في جامعة ليدين بهولندا. لقد مات سنل من دون أن يتشر كشفه العلمي هذا؛ ولكن هذا القانون نشره لأول مرة رينيه ديكارت René Descartes (١٥٩٦-١٦٥٠)، الرياضي، الفيزيائي، والفيلسوف الفرنسي في كتابه: Dioptrique.

السقوط تقع جميعها في مستوى واحد هو مستوى السقوط .

الانكسار

الرسم البياني

تصور متسلسلة من الجبهات الموجية المستوية المتوازية الساقطة على السطح الفاصل بين الهواء والزجاج . فإذا كانت الجبهات الموجية تسقط متوازية للسطح الفاصل ، فإنها تمر من دون انحراف ؛ إلا أنها تُصَغِّطُ أي تقترب أكثر من بعضها البعض في الوسط الثاني أي الزجاج الذي معامل انكساره أكبر من الهواء (الشكل ٥- الرسم الى اليمين) .



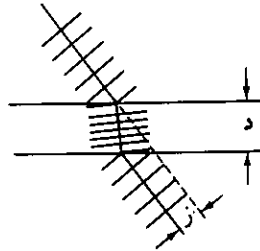
الشكل ٥ : الجبهات الموجية المارة من الهواء إلى الزجاج (الى اليمين) ورسم هاجنز لبيان الانكسار (الى اليسار)

ثم تصور أن الجبهات الموجية تسقط على السطح الفاصل بحيث تصنع زاوية حادة معه (الشكل ٥- الى اليسار) ، ولنفرض أن الجبهة الموجية أب قد مسّت السطح عند النقطة أ ؛ فبعد فترة زمنية Δt تنتقل النقطة ب من الجبهة الموجية إلى النقطة ج ، إلا أن النقطة أ تكون قد تحركت مسافة أقل في الوسط الثاني لأن معامل انكساره أكبر . وإذا افترضنا أن النسبة بين سرعتي الضوء في الوسطين هي $\frac{c_1}{c_2}$ ، فإن المسافة (ف) التي تقطعها النقطة أ في الوسط الثاني خلال الفترة Δt تساوي :

$$ف = ب ج \frac{٢ع}{١ع} = ب ج \frac{١م}{٢م} *$$

وعلى سبيل المثال، فإذا كان $١ م = ١$ ، $٢ م = ١,٥$ ، فإن المسافة $ف = \frac{٢}{٣}$ المسافة ب ج. ولذلك نرسم من النقطة أ قوساً نصف قطره (ف)؛ فالخط المستقيم المرسوم من ج والذي يماس هذا القوس يُمثل الوضع الجديد الذي تأخذه الجبهة الموجية في الوسط الثاني.

وهكذا نرى أنَّ الجبهة الموجية أو الأشعة، عند انتقالها من وسط أقل كثافة إلى وسط أكبر كثافة، تنحرف مقتربة من العمود المقيم على السطح الفاصل عند نقطة السقوط. وإذا كان $١ م = ٢ م$ ، فلا يظهر هنالك أي انحراف. أما إذا زاد الفارق بين مُعَامِلِي الانكسار المطلقين $١ م$ ، $٢ م$ ؛ فإن انحراف الضوء يزداد. وتغني الازاحة بخلاف الانحراف حُرْف الأشعة إلى مسار مواز لمسارها السابق، إذ لا يحدث هنالك أي تغيير في اتجاه انتقال الضوء، ويمكن رؤية مثل تلك الازاحة على سبيل المثال عند مرور الضوء في شريحة في شكل متوازي مُستطيلات (الشكل ٦).



الشكل ٦: الازاحة زاحصة بشريحة في شكل متوازي المُستطيلات. ان الحزمة الخارجة من الشريحة تُزاح ولا تنحرف بالمقارنة مع اتجاه الحزمة الساقطة.

مصفوفة الانكسار Refraction Matrix

تَكُونُ قيمة جَبْرِ المصفوفات في تسهيل تحويل قيمة أو دالة من مجموعة من الإحداثيات إلى مجموعة أخرى؛ فالمصفوفة تُعين في تحقيق ذلك الغرض. وَلِتَسْتَخْلَصَ

• ب ج طول القطعة المستقيمة الواصلة بين النقطتين ب، ج.

مفهوم المصفوفة دَعْنَا نَأْخُذْ شُعَاعاً ضَوْئياً مُنْتَقِلاً مِنْ وَسْطِ كَثِيفٍ إِلَى وَسْطِ أَقْلٍ كَثَافَةٍ، كَمَا فِي الشَّكْلِ ٧. وَلْنَفْتَرِضْ أَنَّ الشُّعَاعَ السَّاقِطَ يَصْنَعُ زَاوِيَةً α مَعَ الْعَمُودِ الْمُقَامَ عَلَى الْحَدِّ الْفَاصِلِ بَيْنَ الْوَسْطَيْنِ؛ وَإِذَا لَمْ يَنْكَسِرِ الشُّعَاعُ فَانْه يَصْنَعُ نَفْسَ الزَّاوِيَةِ α مَعَ الْمَحْوَرِّ السَّيْنِيِّ وَيَصِلُ إِلَى النِّقْطَةِ هـ. الَّتِي إِحْدَاثِيَاهَا هُمَا (س، ص.) وَالَّتِي تَبْعُدُ عَنْ نِقْطَةِ الْأَصْلِ (٠،٠) لِلْمَحْوَرِّينِ مَسَافَةً ر. وَلِأَنَّ الشُّعَاعَ يَنْكَسِرُ، فَانْهُ يَكُونُ قَدْ دَارَ زَاوِيَةً مَقْدَارُهَا δ ، وَيَصِلُ إِلَى النِّقْطَةِ هـ (س، ص) وَالَّتِي تَبْعُدُ أَيْضاً مَسَافَةً ر عَنْ نِقْطَةِ الْأَصْلِ. وَهَكَذَا بِسَبَبِ الْإِنْكَسَارِ، تَدُورُ النِّقْطَةُ هـ. حَوْلَ نِقْطَةِ الْأَصْلِ فِي قَوْسٍ إِلَى النِّقْطَةِ هـ صَانِعَةً بِذَلِكَ الزَّاوِيَةَ δ .

إِنْ مَا نَرِيدُهُ الْآنَ هُوَ الْعُثُورُ عَلَى طَرِيقَةٍ لِتَحْوِيلِ الْإِحْدَاثِيِّينَ س.، ص. إِلَى الْإِحْدَاثِيِّينَ س، ص. وَنَرَى مِنَ الشَّكْلِ ٧ أَنَّ:

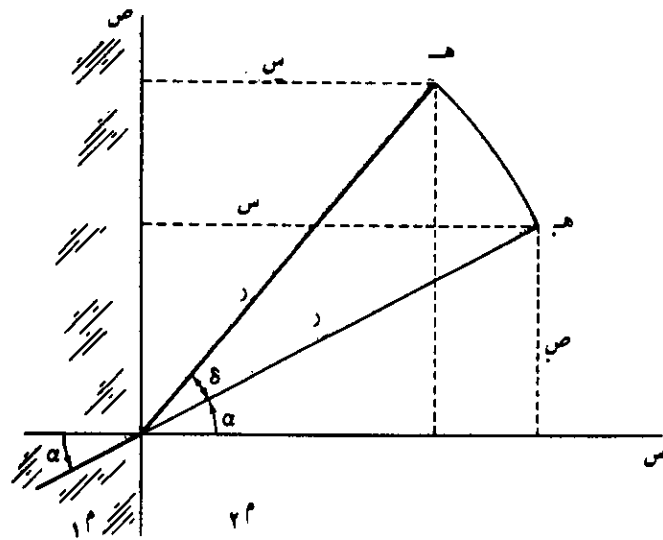
س. = ر جتا α ،
ص. = ر جتا α ،
وَأَنَّ:

$$[٨-١:١]$$

$$\text{س} = \text{ر جتا } (\delta + \alpha) \dots$$

$$[٩-١:١]$$

$$\text{ص} = \text{ر جتا } (\delta + \alpha) \dots$$



الشكل ٧: اشتقاق مفهوم مصفوفة الانكسار $١٢ < ٠.٢٢$

وعند هذه النقطة، فإننا نحتاج الى صيغة تسمح لنا بإيجاد جيب وجيب تمام مجموع زاويتين. دَعْنَا نُعِدْ رَسْمَ الشَّكْلِ ٧، وكذلك دَعْنَا نُسَقِّطْ مِنَ النِّقْطَةِ هـ العمودَ هـو على المحور السيني، والعمودَ هـك على الخط هـ. أ. كذلك لِنُسَقِّطْ مِنَ ك العمودَ كـل على المحور السيني والعمودَ كـن على العمود هـو.

وَيُظْهِرُ مِنَ الرَّسْمِ أَنَّ:-

$$[١٠-١:١] \quad \dots \frac{ل أ}{ك أ} = \alpha \text{ جتا } \alpha, \frac{ك ل}{ك أ} = \alpha \text{ جا}$$

$$[١١-١:١] \quad \dots \frac{ك أ}{ر} = \delta \text{ جتا } \delta, \frac{هـ ك}{ر} = \frac{هـ ك}{هـ أ} = \delta \text{ جا}$$

$$[١٢-١:١] \quad \dots \frac{هـ ن + ن و}{ر} = \frac{هـ و}{ر} = (\delta + \alpha) \text{ جا}$$

لكن الزاوية ن هـك = α ، لأن ضِلْعَيِ الزاوية α مُتَعَامِدَانِ عَلَى ضِلْعَيِ الزاوية ن هـك.

وَلِذَا، فَانِ الْمَعَادِلَةَ [١٢-١:١] تُصْبِحُ:-

$$\frac{هـ ك \text{ جتا } \alpha + ك أ \text{ جا } \alpha}{ر} = (\delta + \alpha) \text{ جا}$$

$$= \frac{هـ ك}{ر} (\alpha \text{ جتا } \alpha) + \frac{ك أ}{ر} (\alpha \text{ جا})$$

$$[١٣-١:١] \quad \dots = \alpha \text{ جتا } \delta + \alpha \text{ جا } \delta \dots$$

وَيَحْطَوَاتِ مِمَّاثِلُهُ، يُمَكِّنُ إِجْزَاءً مَا يَلِي:

$$[١٤-١:١] \quad \dots \text{جتا } (\delta + \alpha) = \alpha \text{ جتا } \delta - \alpha \text{ جا } \delta \dots$$

تسميتها مَصْفُوفَةُ الدُّوران؛ لأن المَصْفُوفَةَ قد تم الحصولُ عليها بتحويلِ دورانيٍّ مع الاحتفاظ بنفس الإحداثيات الكارتيزية المتعامدة [س.ص. = س.ص. + ص.ص.].

ولاجراء التَّحويلِ من الاحداثيين الاصليين س، ص إلى الاحداثيين الجديدين س، ص، فإن المصفوفة الرأسية ١×٢ التي تُعبرُ عن الاحداثيين الابتدائيين س، ص، تُضربُ بالمصفوفة المربعة ٢×٢ في المعادلة [١٦-١:١]، أي على النحو التالي:-

$$[١٧-١:١] \quad \dots \begin{bmatrix} س \\ ص \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} س. \\ ص. \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -جا \delta & جتا \delta \\ جتا \delta & جا \delta \end{bmatrix}$$

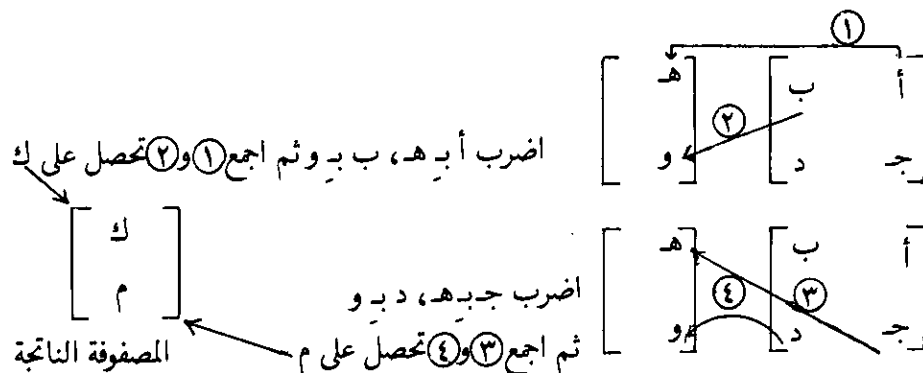
وَيَتَمُّ ضرب المصفوفات كما هو موضح في الشكل ٩. وعلى سبيل المثال فإن:-

$$\begin{bmatrix} ١٧ \\ ٣٩ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ٦ \times ٢ + ٥ \times ١ \\ ٦ \times ٤ + ٥ \times ٣ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ٥ \\ ٦ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ٢ & ١ \\ ٤ & ٣ \end{bmatrix}$$

وبصورة عامة:

$$\text{وهكذا فإن:-} \quad \begin{bmatrix} أ.س. + ب.ص. \\ ج.س. + د.ص. \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} س. \\ ص. \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ب & أ \\ د & ج \end{bmatrix}$$

س = أ.س. + ب.ص.
ص = ج.س. + د.ص.



الشكل ٩: ضرب المصفوفة ٢×٢ بالمصفوفة ١×٢

تحتوي المعادلة [١٧-١:١] على زاوية واحدة فقط هي δ ، وهي الزاوية التي يَنكسِرُ بها الضوءُ عندما يَمُرُّ عَبرَ السطحِ الفاصِلِ بَيْنَ الوَسْطَينِ . وعندما تَسْقُطُ الاشعةُ عموديةً تقريباً على السَّطحِ الفاصِلِ ، فإن جا $\delta \approx 0$ ، جتا $\delta \approx 1$.

و بتعويضِ هاتين القيمتين في مصفوفة الانكسار، نحصلُ على :-

$$[18-1:1] \quad \dots \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = R$$

وهي المصفوفةُ المُحايدةُ التي تُعَبِّرُ عن قوة كسِرِ refractive power سطحِ فاصلٍ مُستوٍ عند سقوط الضوء عمودياً عليه .

وإذا سقط الضوءُ مائلاً على سطحِ فاصلٍ مُستوٍ، فإنه يُعاني الانكسارَ ويتغيَّرُ اتجاؤه أنتشارِه . وينشأ عن هذا التغيرُ تغيُّراً في المسافة مِنَ المَحْوَرِ البَصَرِيِّ ، وهُوَ ما يسمَّى النقل Translation . ومن اجلِ استخدامِ المصفوفاتِ استخداماً تاماً في حلِّ مسائلِ الانكسار، فلا بُدَّ لَنَا مِنَ الأخذِ بعينِ الاعتبارِ ظاهرةَ النقلِ أيضاً . وسيتمُّ تناوُلُ مصفوفاتِ الانكسارِ والنقلِ بالتفصيلِ في الفصل ٨:١ .

طول المسار البصري Optical path length

تُسمَّى المسافةُ بين نقطتين، بغضِّ النظرِ عن الوَسْطِ بيتهما، بطولِ المسارِ الهندسي «ل»، وكما هو واضح فإذا كَانَ الوَسْطُ الذي فيه المسارُ ذا مُعاملِ انكسارِ عالٍ، فإن الضوءَ يَتَباطَأُ مقارنةً بِسَيَرِهِ في الوَسْطِ ذي معاملِ الانكسارِ المنخفض . ولذا يلزِمُ أَضافَةُ كميَّةٍ أُخْرَى الى تعريفنا السابق للمسار لتأخذَ ذَلِكَ التَّبَاطُؤَ بعينِ الاعتبارِ . ومن ثَمَّ يُعرَّفُ طولُ المسارِ البصريِّ «ف» بأنَّهُ حاصلُ ضربِ طولِ المسارِ الهندسي ومعاملِ الانكسارِ :-

$$[19-1:1] \quad \dots\dots\dots$$

$$F = nL$$

وهكذا في وسطِ معاملِ انكساره n ، يَسْتغرِقُ الضوءُ لقطعِ مسافةٍ ما زمناً يَبْلُغُ n مرةً قَدَرُ

* $\approx$ تعني تقريباً.

الزمن الذي يستغرقه الضوء في قطع المسافة نفسها في الفراغ (م للفراغ = ١). أما في الوسط غير المتجانس، فيمكن إيجاد طول المسار البصري بحساب التكامل Integral calculus على النحو التالي:-

$$F = \int_a^b m \, dl \dots [١:١-٢٠]$$

حيث دل تمثل تفاضلي المسافة على المسار من أ الى ب.

وتُعرف المسافة المختزلة reduced distance بأنها نسبة طول المسار الهندسي إلى معامل الانكسار:

$$\text{المسافة المختزلة} = \frac{L}{m}.$$

ولما كان معامل الانكسار نسبة أي مقداراً عددياً لا وحدات له، فإن طول المسار البصري، والمسافة المختزلة تقاسان بنفس الوحدات التي يُقاس بها الطول.

الزاوية الحرجة للانكسار Critical angle of refraction

تصور أن قلماً من الضوء (يشار اليه بالرقم ١ في الشكل ١٠) يسقط عمودياً على السطح الفاصل بين وسط ذي معامل انكسار مُخفض (م) ووسط آخر ذي معامل انكسار مرتفع (م). ان الضوء كما نعرف يمر من دون انكسار.

ولنتصور الآن أن قلم الضوء يسقط على السطح الفاصل بزاوية سقوط (α) تزداد تدريجاً (الوضع 2، 3 في الشكل ١٠)، فإن الضوء في هذه الحالة سينكسر منحرفاً الى العمود.

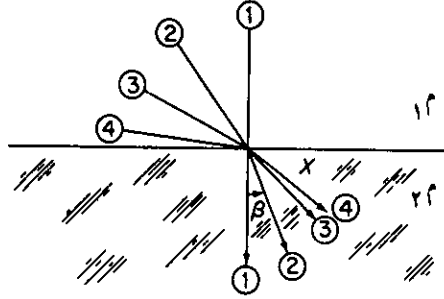
وعندما تقترب زاوية السقوط α من الزاوية ٩٠° (α ← ٩٠°)، فإن جـ α يقترب من ١

$$(جـ α ← ١)، \text{ ويصبح قانون شينل } \left[\frac{جـ α}{جـ β} = \frac{١}{٢} \right] \text{ على النحو التالي: -}$$

[٢١-١:١]

$$\text{زاوية } \beta = \text{جأ}^1 \left(\frac{1^2}{2^2} \right) \dots\dots$$

وتسمى الزاوية β هذه زاوية الانكسار الحرجة، وهي الزاوية التي تُحدد لنا المنطقة x في الشكل ١٠ التي لا يصلها شيء من الضوء الساقط كما تبين لك.



الشكل ١٠: زاوية الانكسار الحرجة β ، $\beta > \alpha$ ؛ المنطقة المشار إليها بـ x لا يصلها ضوء.

الانعكاس الداخلي الكلي Total internal reflection

إن الوضع يُصبح أكثر إثارة إذا ما تصوّرنا الضوء يسير في الاتجاه المُعاكس في الشكل ١٠، أي يَمُرُّ من الوسط الكثيف الى الوسط الأقلّ كثافةً (الشكل ١١). وفي ذلك الوضع، فإنّ الضوء يَنكسرُ مُبتعداً عن العمود. وبزيادة زاوية السقوط α تَدْرِجاً، نصلُّ الى حالة تكونُ فيها زاوية الانكسار β مساويةً لـ 90° . إن الشعاع المنكسر (4) يَصْدُرُ من الوسط الكثيف مُحاذاً السطح الفاصل بين الوسطين. ويحدُثُ مثلُ هذا الأمر، لأنّ قانونَ سنيل لا حلَّ فيه لزاوية الانكسار β عندما يزيد مقدار زاوية السقوط α عن مقدارٍ حرجٍ هو 90° . فكما نعلمُ فليست هنالك زاوية جيبها أكبر من ١.

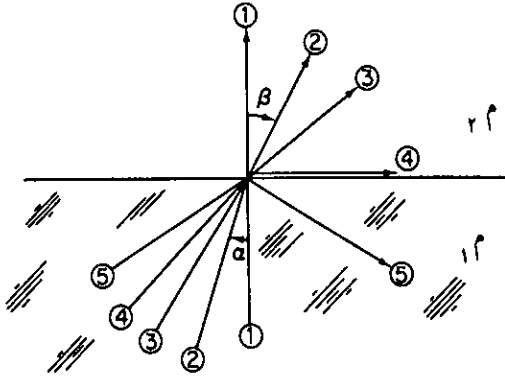
ولذا، فإذا كانت $\beta = 90^\circ$ ، فإنّ :-

$$\text{جأ}^{\alpha} = \frac{\alpha}{90} = \frac{2^2}{1^2}$$

أي أن:

زاوية السقوط $(\alpha) = \text{جأ}^1 \left(\frac{\mu^2}{\mu^1} \right)$.

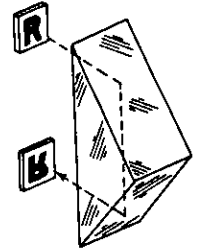
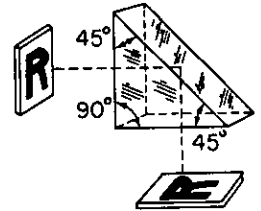
وتسمى زاوية α في الحالة هذه الزاوية الحرجة (الصغرى) للانعكاس الداخلي الكلي؛ فإذا زادت زاوية السقوط عن الزاوية الحرجة، فإن الضوء كُلُّهُ ينعكس عن السطح الفاصل داخل الوسط الكثيف.



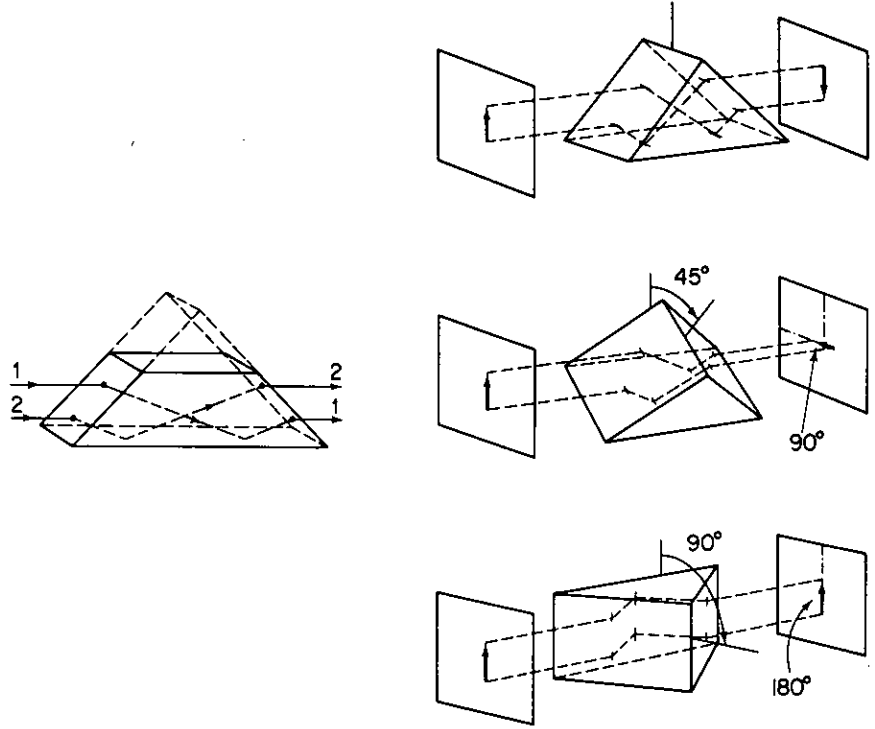
الشكل ١١: الضوء يمرُّ عبر السطح الفاصل بين وسط كثيف ووسط خفيف ($\mu^1 < \mu^2$).

مواشير الانعكاس الكلي (المواشير العاكسة عكسا كليا)

يلعب الانعكاس الداخلي الكلي دوراً في العديد من الآلات البصرية. ففي الموشور الثلاثي القائم rectangular prism على سبيل المثال قد ينعكس الضوء مرةً عن الوجه المائل أي الوتر (الشكل ١٢ - الرسم العلوي) أو مرتين عن الوجهين المتعامدين (الرسم السفلي). ولما كانت زاوية السقوط على وجه الموشور تساوي 45° ، وهي أكبر من الزاوية الحرجة للانعكاس الكلي (وقيمتها 42° لأن معامل انكسار الزجاج ١,٥)، فإن الضوء يُعاني الانعكاس الكلي حتى لو كان السطح الخلفي للوجه غير مضقول. وفي موشور دوف Dove Prism (الشكل ١٣)، فإن الانعكاس الداخلي الكلي يَقلِّب الصورة. وإذا ما أدير موشور دوف على محوره البصري، فإن الصورة تدور بمقدار ضعيف زاوية دوران الموشور؛ لأن موشور دوف حقيقةً هو موشور قائم كبير قُطِعَتْ قُرْنَتُهُ القائمة. وَيُظْهِر الموشور القائم كذلك نفس التأثير.



الشكل ١٢: الانعكاس الداخلي الكلي في الموشور القائم (الرسم العلوي) وموشور بورو-أميسي القالب Porro-Amici (الرسم السفلي).



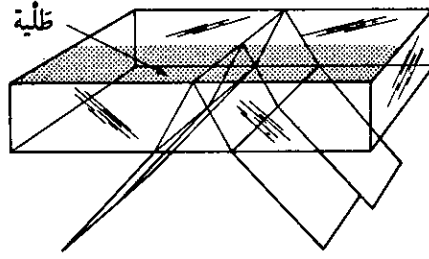
الشكل ١٣ : موشر دوف (الى اليمين) وتأثير دورانه (الى اليسار).

ظاهرة جوش — هانينج Goos-Hänchen effect

عندما ينعكس الضوء انعكاساً كلياً عن السطح الفاصل بين وسطين كثيف ووسيط خفيف، وُجد أن الانعكاس لا يحدث تماماً على السطح الهندسي الفاصل بين الوسطين؛ بل إن الضوء يخترق السطح الفاصل إلى مسافة قصيرة. وإذا كان سقوط الضوء غير عمودي، فإن الحزمة المنعكسة تُزاح جانباً مسافة قصيرة (الشكل ١٤). وتُعرف هذه الظاهرة بظاهرة جوش - هانينج *.

وقد استُخدمت ظاهرة كون الضوء حقيقةً يخترق قليلاً السطح الفاصل إلى الوسط

* F. Goos and H. Hänchen "Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Total-reflexion," *Ann. Physik* (6), 1, (1947) 333-346. H. K. V. Lotsch, "Reflection and Refraction of a Beam of Light at a Plane Interface," *J. Opt. Soc. Am.* 58 (1968), 551-61.



الشكل ١٤ : ظاهرة جوش- هانشن : مخطط توضيحي . لاحظ الاراحة بين رقيقتي الضوء المنعكستين .

الخفيف في مِطْطِافية الانعكاس الداخلي * ؛ إذ تقوم المادة المُمْتَصَّة في هذه الحالة مُقَامَ الوسيط الثاني .

التفسير الجزيئي للكاسيرية Molecular basis of refractivity

يُمْكِنُ استخدام ميكانيكا الكم لتفسير الضوء في الوسيط الكثيف . ففي الفراغ المُطلَق لا يُصَادِفُ الضوء أيّة ذرات ، وتبلغ سرعته أقصاها ؛ أما في المادة ، فإن السرعة تكون عالية فقط في الفراغ بين الذرات . لكن قريباً من الذرات ، تتفاعل كمات الضوء (الكوانتات) مع الإلكترونات في المدارات ؛ ولذا ، فإن سرعة الضوء الحاصلة تتناسب عكسياً مع عدد الذرات الموجودة في مساره لكل وحدة طول ، أي تتناسب السرعة عكسياً مع كثافة المادة . ولما كان معامل الانكسار للفراغ المُطلق (م) يساوي واحداً صحيحاً ، فإن كثافة المادة أ تتناسب مع (م-١) ؛ أي أن :-

$$[٢٣-١:١] \quad m - 1 = \text{ثابت} \times \rho \dots$$

وتُعرف هذه العلاقة بقانون جلاذستون - ديل Gladstone-Dale law **. وقد قام العالمان لورنتز ولورنز Lorentz and Lorenz في نفس الوقت تقريباً بوضع الخلفية النظرية للكاسيرية وصياغة علاقة مماثلة للعلاقة السابقة هي :-

* N.J. Harrick, "Vertical Double-Pass Multiple Reflection Element for Internal Reflection Spectroscopy," *Applied Optics* 5 (1966), 1-3

** J. H. Gladstone and J. Dale, *Phil. Trans.* 148 (1858), 887.

[٢٤-١:١]

$$\dots\dots \left(\frac{1-m^2}{1+m^2} \right) \frac{M}{P} = K$$

وتُسمى هذه المعادلة بمُعَادِلَةِ لورنتز - لورنتز †. وفي المعادلة السابقة: M هي الوزن الجزيئي للمادة، K ثابت خاص بالمادة يُدعى ثابت الكاسريّة الجزيئية.

وفي الجدول ١ أثبتنا لك معاملات الانكسار لعدد قليل من المواد المثلّة.

أجدول ١: معاملات الانكسار [لطول موجة ضوء الصوديوم الأصفر - الخط D والذي يبلغ ٥٨٩ نم؛ وللغازات تحت درجة الحرارة والضغط الجوي المعياريين]

١,٠٠٠٠٠٠	الفراغ
١,٠٠٠٢٩٢	أهواء
١,٣٣٣٦	الماء
١,٥٢٣	الزجاج التاجي
١,٧٢	الزجاج الصواني
١,٦٤	ثاني كبريتيد الكربون
١,٧٤	ايوديد الميثيلين
٢,٤٢	الماس

اقتراحات لقراءات اضافية

- J. W. Blaker, *Focus on Physics, Optics I*, "Lenses, Mirrors, and Optical Instruments" (New York: Barnes & Noble, Inc. 1969).
- A. Nussbaum, *Geometric Optics* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., Inc. 1968).

†H. A. Lorentz, "Ueber die Beziehung zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes und der Körperdichte," *Ann. Physik u. Chemie* 9 (1880), 641-65; L. Lorentz, "Ueber die Refraktionsconstante," *Ann. Physik u. Chemie* 11 (1880), 70-103.

المسائل

١-١:١ يَمُرُّ الضوءُ من الزجاج الى الهواء بزاوية سقوط مقدارها ٤٠°، ما زاوية الانكسار (معامل انكسار الزجاج ١,٥٠)؟

١-١:٢ طبقة من الماء تطفو على طبقة من أيوديد الميثيلين methylene iodide، فإذا سقط الضوء على السطح الفاصل بين الهواء والماء بزاوية ٦٠°، ما زاوية الانكسار في وسط أيوديد الميثيلين؟

١-١:٣ شعاع ضوء في الماء سقط على شريحة من الزجاج التاجي crown glas بزاوية سقوط ٤٥°؛ جد زاوية الانكسار في الزجاج؟

١-١:٤ حوض زجاجي عرضه من اليسار الى اليمين ٣٠ سم؛ سقط عمود من الضوء على جانبه الأيسر بزاوية سقوط مقدارها ٣٠°، وخرج من الجانب الأيمن بنفس الزاوية. فإذا كان الحوض مملوءاً ماءً، فما الإزاحة الحاصلة؟
أهل الانكسار الحادث بزجاج الحوض.
١-١:٥ أجر عملية ضرب المصفوفتين التاليتين:-

$$\begin{bmatrix} ١,٥ \\ ١ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ٢,٥ & ٢ \\ ١ & ٣ \end{bmatrix}$$

١-١:٦ أجر عملية ضرب المصفوفتين التاليتين:-

$$\begin{bmatrix} ١- \\ ٣ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ١ & ٣ \\ ١,٥ & ٢- \end{bmatrix}$$

١-١:٧ غُمِرَ مُكْعَبٌ أَجْوَفٌ مملوءٌ بهواء في حوض ماء، ثم سقط الضوء على المُكْعَب بزاوية سقوط مقدارها ٣٠°. إعمل رسماً يبين اتجاه الجبهات الموجية الضوئية وانضغاطها داخل المكعب وخارجه؟

٨-١:١ شعاعان ضوئيان يقطعان مسافة ٨,٥ سم؛ وُضِعَ في مسارٍ أحد الشعاعين فيلمٌ رقيقٌ شفاف؛ فإذا كَانَ فارق المسار البصري للشعاعين ٠,١١ مم، وَسُمِّكُ الفيلم ٠,١٧ سم، فجد معامل انكسار الفيلم.

٩-١:١ وُضِعَتْ شريحة زجاجية سُمكها ٢,٤ سم، ومُعاملُ انكسارها ١,٥ على ورقةٍ عليها مادة مطبوعة؛ فإذا نَظَرَ الى الورقة من سطح الشريحة العلوي ناظرًا ما، فما البعد الذي تَظْهَرُ منه الورقة؟

١٠-١:١ أُغْلِقَتْ قَاعِدَتَا أَنْبُوبِ أُسْطُوَانِيٍّ بِشَرَايِحَ زُجَاجِيَّةٍ سَمَكُهَا ١٠ مم؛ فإذا كَانَ طَوْلُ الأنبوب من الداخل ١٠ سم، ومُعاملُ انكسارِ الزُّجَاجِ ١,٥، فجد:

(أ) الطول الهندسيَّ لِلْأَنْبُوبِ كَمَا يُقَاسُ بَيْنَ السُّطْحَيْنِ الْخَارِجِيَّيْنِ، (ب) طول المسارِ البصريِّ بَيْنَ السُّطْحَيْنِ الْخَارِجِيَّيْنِ إِذَا كَانَ الْأَنْبُوبُ فَارِغًا، وَ(ج) طول المسارِ البصريِّ فِي حَالَةِ كَوْنِ الْأَنْبُوبِ مَمْلُوءًا مَاءً.

١١-١:١ قِطْعَةُ زُجَاجِيَّةٍ ذَاتُ سَطْحٍ مُسْتَوٍ مُعَامِلُ انكسارِها فِي الْهَوَاءِ ١,٦٠. سَقَطَ الضَّوْءُ عَلَى سَطْحِهَا بِزَاوِيَةِ سُقُوطٍ مُقَدَّارُهَا ٣٠°:-

(أ) مَا زَاوِيَةُ الانكسارِ؟ (ب) إِذَا غُمِرَتِ الْقِطْعَةُ فِي الْمَاءِ فَكَمْ يَكُونُ مُقَدَّارُ زَاوِيَةِ الانكسارِ؟

١٢-١:١ سَقَطَتْ حُرْمَةٌ ضَوْئِيَّةٌ عَلَى قِطْعَةٍ زُجَاجِيَّةٍ (م=١,٥) بِزَاوِيَةِ سُقُوطٍ مُقَدَّارُهَا ٢٠°. فَإِذَا اسْتُعِضَّ عَنْ جَيْبِ الزَاوِيَةِ فِي قَانُونِ سِنَلٍ بِالزَاوِيَةِ نَفْسِهَا، فَمَا مُقَدَّارُ الْخَطَأِ الْمُتَوَيَّرِ فِي زَاوِيَةِ الانكسارِ؟

١٣-١:١ إِذَا نَظَرَ الْمَرْءُ عَبْرَ جُذْرَانِ كَأْسٍ زُجَاجِيَّةٍ أُسْطُوَانِيَّةٍ مَمْلُوءَةٍ مَاءً فَإِنَّهُ لَا يَسْتَطِيعُ رُؤْيَةَ سَطْحِ الطَّاوِلَةِ الَّتِي يُوَضَّعُ عَلَيْهَا الْكَأْسُ، لَكِنَّهُ يَسْتَطِيعُ رُؤْيَةَ الإِصْبَعِ الَّتِي يَلَامَسُ الْكَأْسَ. فَسِّرْ هَذِهِ الظَّاهِرَةَ بِاسْتِخْدَامِ الرَّسْمِ، ثُمَّ عَيِّنْ مُقَدَّارَ الْقِيَمَةِ الْحَدِّيَّةِ لَزَاوِيَةِ السُّقُوطِ عَلَى السُّطْحِ الْفَاصِلِ بَيْنَ الْهَوَاءِ وَالزُّجَاجِ.

١٤-١:١ وُضِعَ مَصْدَرُ ضَوْئِيٍّ نُقْطِيٌّ عَلَى بُعْدٍ ٢ م تَحْتَ سَطْحِ بَحِيرَةٍ. احْسَبِ الْمَسَاحَةَ عَلَى سَطْحِ الْبَحِيرَةِ الَّتِي تُمَرَّرُ الضَّوْءُ الصَّادِرُ مِنَ الْمَصْدَرِ الضَّوئِيِّ؟

١٥-١:١ جِدْ مُقَدَّارَ الزَاوِيَةِ الْحَرَجِيَّةِ لِلانعكاسِ الدَّاخِلِيِّ الْكُلِّيِّ لِضَوْءٍ يَمُرُّ مِنْ زُجَاجٍ مُعَامِلُ انكساره ١,٥ إِلَى:-

(أ) الْهَوَاءَ، (ب) الْمَاءَ، وَ(ج) زَيْتٍ مُعَامِلُ انكساره ١,٤٩.

الفصل ١ : ٢

المرايا

Mirrors

يُمكنُ بالمرايا الحصولُ على صُورٍ (أخيلة) حقيقيةٍ او وهميةٍ، و يتوقفُ ذلكُ على أشكالِ المرايا والمسافاتِ ذاتِ العلاقة. إنَّ الصُورَ الحقيقيةَ يُمْكِنُ اظهارُها على ستارةٍ، أما الصُورَ الوهميةَ أو الخياليةَ فلا يُمكنُ اظهارُها على الستارة. ولنتوجَّه الآنَ إلى درسِ تَكُونِ الصُورِ بالمرآةِ الكُرِّيَّةِ المُقَعَّرَةِ.

مُعَادَلَةُ المِرْآةِ The Mirror Equation

عِنْدَمَا يَكُونُ الجِسْمُ نقطة (o) على المِخْوَرِ البَصْرِيِّ، فإن الصُورَةَ التي تَتَكَوَّنُ من تَجْمِيعِ الأشْعَةِ المُنْعَكِسَةِ من المِرْآةِ هي نقطةٌ أُخْرَى I على المِخْوَرِ نَفْسِهِ. وَحَتَّى يَنْطَبِقَ قَانُونُ الانعكاسِ الأول (α = α')، فَإِنَّ سَطْحَ المِرْآةِ يَجِبُ أَنْ يَكُونَ مُنْحَنِيًّا كَمَا فِي الشَّكْلِ ١. إِنَّ العُمُودَ المُقَامَ على أَيْةِ نُقْطَةٍ على سَطْحِ المِرْآةِ يَحْوِي نِصْفَ قُطْرٍ تَكْوُرِ المِرْآةِ R الذي يُعَيِّنُ بِدَوْرِهِ مَرْكَزَ التَّكْوُرِ C؛ أَمَّا النُّقْطَةُ التي يَقْطَعُ فِيهَا المِخْوَرُ البَصْرِيُّ سَطْحَ المِرْآةِ فَهِيَ قُطْبُ المِرْآةِ V. وَتُسَمَّى المَسَافَةُ بَيْنَ الجِسْمِ وَالْقُطْبِ مَسَافَةُ الجِسْمِ o، وَالْمَسَافَةُ بَيْنَ الْقُطْبِ وَالصُّورَةِ مَسَافَةُ الصُّورَةِ i.

و يُمْكِنُ اسْتِقْطَاقُ مُعَادَلَةِ المِرْآةِ مِنَ النَّظَرِيَّةِ الهَنْدَسِيَّةِ الَّتِي تَقُولُ بِأَنَّ الزَاوِيَةَ الْخَارِجَةَ فِي مِثْلَتِ مَا تُسَاوِي مَجْمُوعَ الزَاوِيَتَيْنِ الدَّاخِلَتَيْنِ فِيهِ. وَهَكَذَا بِالرُّجُوعِ إِلَى الرَّسْمِ فِي الشَّكْلِ ١ نَجِدُ أَنَّ:-

$$[1-2:1]$$

$$\gamma = \alpha + \beta$$

$$[2-2:1]$$

$$\delta = \alpha + \beta$$

وَيَضْرِبُ الْمَعَادِلَةَ [١-٢:١] بِـ ٢، ثُمَّ طَرَحَ الْمَعَادِلَةَ [٢-٢:١] مِنْهَا، نَحْصُلُ عَلَى :

$$[٣-٢:١] \quad \gamma\gamma = \delta + \beta \dots\dots$$

وَإِذَا كَانَتْ تِلْكَ الزَّوَايا صَغِيرَةً، أُمْكِنَ حَسَابُ مَقَادِيرِهَا تَقْرِيبًا عَلَى النَّحْوِ التَّالِي :

$$\frac{PV}{o} = \frac{PV}{OV} \approx \beta$$

$$\frac{PV}{R} = \frac{PV}{CV} = \gamma$$

$$\frac{PV}{i} = \frac{PV}{IV} = \delta$$

وَبَعَوِضِ مَقَادِيرِ β ، γ ، δ أَعْلَاهُ فِي الْمَعَادِلَةِ [٣-٢:١]، نَحْصُلُ عَلَى :-

$$\left(\frac{PV}{R}\right)\gamma = \frac{PV}{i} + \frac{PV}{o}$$

إِحْذِفِ الْآنَ PV مِنَ الْمَعَادِلَةِ أَعْلَاهُ، وَبَوَضِّعِ الْجِسْمَ فِي مَا لَانْهَاءِةٍ أَيْ $o = \infty$ فَإِنَّ مَسَافَةَ الصُّورَةِ تَصْبِحُ الْبُعْدَ الْبُؤْرِيَّ لِلْمِرَاةِ، أَيْ أَنْ : $i \leftarrow f$ ؛ وَيَكُونُ إِذَا :

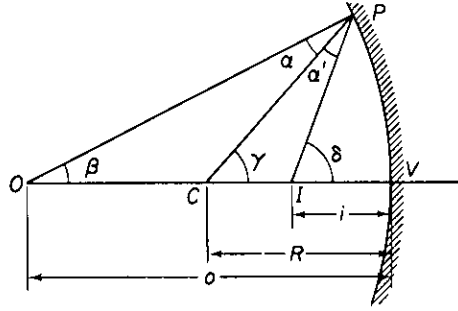
$$\frac{\gamma}{R} = \frac{1}{f} + \frac{1}{\infty}$$

وَهَكَذَا نَسْتَنْتِجُ أَنَّ :-

$$[٤-٢:١] \quad \dots\dots \boxed{\frac{\gamma}{R} = \frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o}}$$

وَتُسَمَّى الْمَعَادِلَةُ [٤-٢:١] مَعَادِلَةُ الْمِرَاةِ الْكُرِّيَّةِ. وَتَحْتَوِي هَذِهِ الْمَعَادِلَةُ عَلَى حَدَّثَيْنِ وَصَفِيَّتَيْنِ :
الْبُعْدُ الْبُؤْرِيَّ f focal length وَنِصْفَ قُطْرِ التَّكْوِيرِ R ، كَمَا تَحْتَوِي عَلَى حَدَّثَيْنِ وَظَيْفِيَّتَيْنِ :

مسافة الجسم o ومسافة الصورة i . ومع أن معادلة المرآة الكروية اشتقت للمرآة المقعرة في حالة كون مسافة الجسم أكبر من نصف قطر تكوير المرآة، إلا أن المعادلة نفسها تنطبق على المرايا المحدبة والمستوية مهما كانت مسافة الجسم.



الشكل ١: اشتقاق معادلة المرآة

آصطلاحات الإشارات Sign Convention

لا نريد أن نؤكد كثيرا أهمية التمسك الدقيق باصطلاحات الإشارات. ومن الطبيعي أن يكون هنالك اختيار؛ لكن إذا ما تم الاختيار، فينبغي التقيد التام به. وفي من هذا الكتاب ستستخدم اصطلاحات الإشارات التالية:-

- ١ - تكون إشارة مسافة الجسم موجبة إذا كان الجسم حقيقياً.
- ٢ - تكون مسافة الصورة سالبة للصورة الخيالية وموجبة للصورة الحقيقية. وتكون الصورة حقيقية عندما تقع في نفس جهة الجسم، وعندما تصلها الطاقة الضوئية فعلاً؛ أما إذا وقعت الصورة في الجهة الأخرى من المرآة، وبدا أن الضوء يصل إليها، فإن الصورة تكون خيالية.
- ٣ - يكون البعد البؤري لمرآة مقعرة موجباً ولمرآة محدبة سالباً.
- ٤ - يكون نصف قطر التكوير، مثل البعد البؤري، موجباً للمرآة المقعرة اللامة (concave (converging وسالباً للمرآة المحدبة المفرقة (convex (diverging).

المرايا المُستوية Plane Mirrors

في المرآة المستوية: $\infty = R$. وبتعويض قيمة R هذه في المعادلة [١: ٢-٤] نحصلُ على :-

$$\frac{2}{\infty} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o}$$

أي أن :-

$$i = o$$

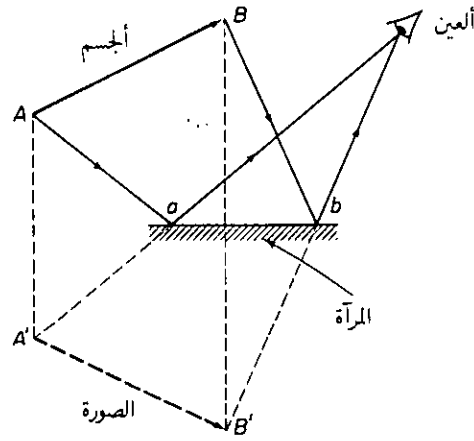
و يُفهمُ من تلك النتيجة أن المرايا المُستوية تُكوّنُ صوراً خياليّة تقعُ في موضع تماثليّ Symmetric بالنسبة للمرآة. ويُمكنُ إيجادُ موقعِ صورةِ جسمٍ مُمتدّ على سبيل المثال بأخذِ نُقطتين مُتطَرِّقتين فيه مثل A و B في الشكل ٢، ثمّ برسمِ خطين عمودين على سطح المرآة من A و B . ونُحدّدُ بالاستفادة من العلاقة $i = o$ موقعَ الصورتين الخياليتين A' و B' بحيث تقعان في الجهة الأخرى من المرآة على نفس بُعدي A و B منها. وعندما ينظرُ المرءُ الى الوضْع الحاصل كما في الشكل ٢، يرى بوضوح أن الجسم والصورة يتشابهان؛ إلا أن وضْع اليمين ووضْع اليسار فيهما مُتعاكسان.

دعنا نفحص الأمرَ بمزيد من التفصيل، وليكن الجسم الذي ننظرُ إلى صورته في المرآة المستوية هو الحرف R . فاذا وُضعت المرآة بحيث كان سطحها موازياً للخط المستقيم في الحرف R ، فإنّ الصورة المتكوّنة له تكونُ معتدلةً مع انقلابٍ جانبيّ، أي مع عكسٍ موضعي اليمين واليسار كما في الشكل ٣- الرسم الى اليسار، وتكونُ الصورة المتكوّنة معتدلةً ومقلوبةً إلى الخلف. كما تكونُ في حالٍ كحالٍ الاغسر، أو حالٍ القراءة المقلوبة الخاطئة.

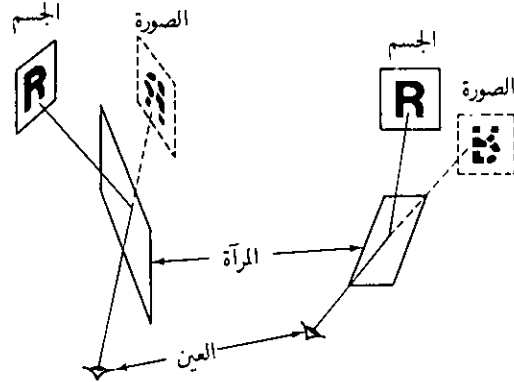
تصوّر الآن أن المرآة قد وُضعتُ مُنبسطةً بحيث يكونُ سطحها أفقيّاً (الشكل ٣- الرسم الى اليمين). إن صورة الجسم تبدو الآن معتدلةً مقلوبةً إلى الأمام وفي حالٍ القراءة الخاطئة المقلوبة. وهكذا فالصورة التي تتكوّنُ بمرآةٍ مُستوية واحدة تكونُ دائماً في حالٍ القراءة

الخاطئة المقلوبة. ونُشاهدُ أيضاً في المثال إلى اليسار في الشكل ٣ أنَّ الجسمَ والصورةَ في وضعٍ تماثليٍّ حوْلَ المحورِ الرأسيِّ، بينما نُشاهدُ في الرَّسم إلى اليمين أنَّهما مُتماثلان حول المحورِ الأفقيِّ.

و يتسبَّب دورانُ المرآةِ المُستوية حوْلَ محورٍ موازٍ لسطحها بمقدارِ الزاوية θ في دورانِ الشعاعِ المُنعكسِ بمقدارٍ ضِعْفِ تلك الزاوية (2θ) . ويُستفادُ من النتيجةِ هذه في الروافع البصريّة optical levers، الجلفانومترات، آلاتِ السُّدسِ Sextants، وآلاتٍ أخرى.

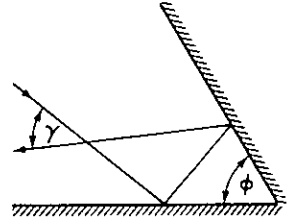


الشكل ٢: الصورة الخيالية المتكونة بمرآة مستوية



الشكل ٣: الصورة الخيالية في المثال إلى اليسار معتدلة مقلوبة إلى الخلف (قراءة خاطئة)، وفي المثال إلى اليمين: الصورة مقلوبة إلى الأمام وفي حالة القراءة الخاطئة أيضاً.

المرايا المستوية المتعددة Multiple Plane Mirrors



الشكل ٤ : الانعكاس عن مرآتين مستويتين .

يُمْكِنُ ضَمُّ مَرَاتَيْنِ مُسْتَوِيَتَيْنِ أَوْ أَكْثَرَ لِلْحَصُولِ عَلَى انْعِكَاسَاتٍ مُتَعَدِّدَةٍ . وَلِنَأْخُذْ أَوَّلًا حَالَةَ مِرَاتَيْنِ كَمَا فِي الشَّكْلِ ٤ ؛ وَلِنَفْتَرِضْ أَنَّ الْأَشْعَةَ السَّاقِطَةَ وَالْمُنْعَكِسَةَ وَالْعُمُودَيْنِ الْمُقَامَتَيْنِ عَلَى سَطْحَيْهِمَا تَقَعُ جَمِيعُهُمَا فِي مُسْتَوًى وَاحِدٍ . وَبِاسْتِخْدَامِ بَعْضِ الْمَبَادِيءِ الْهَنْدَسِيَّةِ يَسْهُلُ عَلَيْكَ أَنْ تَتَبَيَّنَ مِنَ الرَّسْمِ فِي الشَّكْلِ ٤ أَنَّ :-

[١ : ٢ - ٥] ،

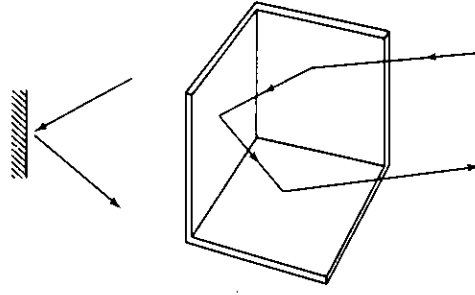
$$\gamma = 180^\circ - 2\phi \dots\dots\dots$$

وَأَنَّ زَاوِيَةَ γ لَا تَعْتَمِدُ عَلَى زَاوِيَةِ سُقُوطِ الْأَشْعَةِ عَلَى الْمِرَاةِ الْأُولَى . وَبِإِمْكَانِكَ أَنْ تُلَاحِظَ أَنَّ $\gamma = 0$ صَفَرٍ عِنْدَمَا تَكُونُ الْمِرَاتَانِ مُتَعَامِدَتَيْنِ أَيُّ عِنْدَمَا $\phi = 90^\circ$ ؛ وَفِي هَذِهِ الْحَالَةِ يَكُونُ الشَّعَاعُ السَّاقِطُ مُوَازِيًا لِلشَّعَاعِ الْمُنْعَكِسِ الْأَخِيرِ وَمُضَادًّا لَهُ فِي الْإِتْجَاهِ .

وَفِي الْبَرِيسْكُوبِ تُسْتَخْدَمُ مِرَاتَانِ تَدَوِّرُ إِحْدَاهُمَا عَلَى الْأُخْرَى ؛ وَعِنْدَمَا تُرْتَّبُ الْمِرَاتَانِ بَحِثُ يَتَمُّ بِهِمَا تَوْجِيهُ الضَّوءِ الصَّادِرِ مِنْ نَجْمٍ إِلَى أَدَاةٍ ثَابِتَةٍ كَالْمِطِيفِ ، فَإِنَّهُمَا مَعًا تُسَمَّيَانِ كُولُوسْتَاتِ Coelostat أَيُّ مُنَظَّمِ تَوْجِيهِ الضَّوءِ ؛ وَإِذَا مَا رُتِّبَتِ الْمِرَاتَانِ لِتَوْجِيهِ الضَّوءِ نَحْوَ الْجُزْءِ الشَّمَالِيِّ أَوِ الْجَنُوبِيِّ مِنَ الْأَفْقِ ، فَإِنَّهُمَا مَعًا تُسَمَّيَانِ عَلَى التَّرْتِيبِ هِيلْيُوسْتَاتِ heliostat أَيُّ مُنَظَّمِ الضَّوءِ فِي اتِّجَاهٍ ثَابِتٍ ، وَسِيدَرُوسْتَاتِ Siderostat أَيُّ مُنَظَّمِ الضَّوءِ نَحْوَ النُّجُومِ .

وَيُمْكِنُ بَضْمَ ثَلَاثِ مَرَايا مُسْتَوِيَةٍ إِرْجَاعُ الضَّوءِ إِلَى مَسَارِهِ الْأَصْلِيِّ فِي الْفَرَاغِ كَمَا هُوَ الْحَالُ فِي عَاكِسِ الْإِتْجَاهِ الْخَلْفِيِّ retrodirective reflector (الشَّكْل ٥) ؛ إِنَّ أَفْضَلَ عَاكِسٍ مَعْرُوفٍ مِنْ هَذَا النَّوعِ هُوَ الْعَاكِسُ الزَّاوِيُّ الْمَكْعَبِيُّ Cube corner ، وَهُوَ عَاكِسٌ ثَلَاثِيٌّ كُلُّهُ مِنْ زَوَايَاهِ الرَّأْسِيَّةِ 90° . وَيُمْكِنُ تَمْيِيزُ الْعَاكِسِ الزَّاوِيِّ الْمَكْعَبِيِّ تَبَعًا لِشَكْلِ السَّطُوحِ الْعَاكِسَةِ ، فَقَدْ يَكُونُ مِثْلِيًّا أَوْ مُرْتَبِعًا . [مِلَاحَظَةُ : تُشِيرُ هَذِهِ الْأَلْفَاظُ إِلَى أَشْكَالِ سَطُوحِ الْمَرَايا فَقَطْ ؛ أَمَّا الْحَجْمُ الْمَحْدَدُ بِالْمَرَايا فَهُوَ أَمَّا مُكْعَبٌ أَوْ حَجْمٌ ذُو سِتَّةِ أَوْجِهٍ . إِنَّ فَتْحَةَ الْعَاكِسِ الزَّاوِيِّ الْمُثَلَّثِيِّ مُثْلَتُهُ الشَّكْلُ أَمَّا فَتْحَةُ الْعَاكِسِ الزَّاوِيِّ الْمُرَبَّعِيِّ فَهِيَ مُسَدَّسَةٌ] * .

* G. A. Van Lear, Jr., "Reflectors Used in Highway Signs and Warning Signals," J. Opt. Soc. Am. 30 (1940), 462-87.



الشكل ٥: الانعكاس المنتظم العادي (الى اليسار) والانعكاس ذو الاتجاه الخلفي بوساطة العاكس الزاوي المكعبي الذي فتحته مسدسة الشكل (الى اليمين).

وإذا ما وُضِعَ قَلَمٌ في وَضْعٍ مُسْتَعْرِضٍ لِحَظِّ النَّظَرِ أَمَامَ الْعَاكِسِ الزَّاوِيِّ الْمَكْعَبِيِّ فَإِنَّ الصُّورَةَ الْمَتَكُونَةَ مِنْ أَنْعَكَاسٍ وَاحِدٍ تُظْهَرُ أَنَّ الْإِتِّجَاهَ الَّذِي يُؤَشِّرُهُ الْقَلَمُ هُوَ نَفْسُ الْإِتِّجَاهِ؛ أَمَّا فِي حَالَةِ الْإِنْعَكَاسِ الثَّلَاثِيِّ فَإِنَّ اتِّجَاهَ الْقَلَمِ يُعْكَسُ.

وَيَتَأَلَّفُ عَاكِسُ الْإِتِّجَاهِ الْخَلْفِيِّ الَّذِي يُسَمَّى بِعَيْنِ الْقِطِّ Cat'seye مِنْ عَدْسَةٍ لَامِيَّةٍ وَمِرَاةٍ؛ وَعِنْدَمَا تَكُونُ الْمِرَاةُ مُسْتَوِيَةً فَإِنَّهَا تَوْضَعُ فِي الْمَسْتَوَى الْبُؤْرِيِّ لِلْعَدْسَةِ. كَذَلِكَ يُمَكِّنُ الْإِسْتِعَاضَةَ عَنْ الْعَدْسَةِ بِمَنْظُومَةٍ مِنَ الْمِرَايَا كَمَا هُوَ الْحَالُ فِي تِلْشُكُوبِ كَاسِيَجْرَيْنِ Cassegrain الَّذِي سَيَأْتِي شَرْحُهُ فِيمَا بَعْدُ (الفصل ٩: ١).

رسم الصور بيانياً Graphical Image Construction

يُمْكِنُ اسْتِخْدَامُ الرَّسْمِ لِتَحْدِيدِ مَوَاقِعِ الصُّورِ الْمَتَكُونَةِ بِالْمِرَايَا الْكُرِّيَّةِ، وَنَبِّحُ هُنَا أَرْبَعَ حَالَاتٍ تَبَعاً لِمَوْقِعِ الْجِسْمِ مِنَ الْمِرَاةِ وَنَوْعِ الْمِرَاةِ الْمُسْتَحْدَمَةِ: أَهْيَ مَقْعَرَةٍ أَوْ مَحْدَبَةٍ. وَتُشَبَّهُ الْمِرَايَا فِي كَثِيرٍ مِنْ خَصَائِصِهَا الْعَدَسَاتِ، وَسَنَبِّحُ تِلْكَ الْخَصَائِصَ فِي الْفُصُولِ التَّالِيَةِ الَّتِي تَتَنَاوَلُ الْعَدَسَاتِ الرَّقِيقَةَ، الرَّسْمَ بِالْأَشْعَةِ، الزَّوْغَانَ، وَتَضْمِيمَ الْعَدْسَةِ:-

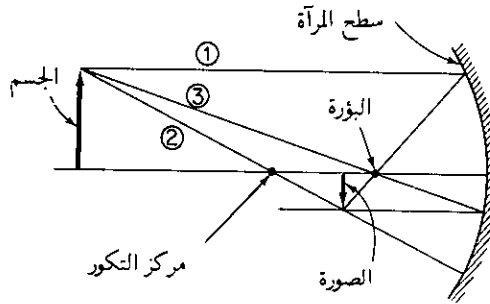
١ - مَوْقِعُ الْجِسْمِ خَارِجَ مَرْكَزِ تَكْوَرِ الْمِرَاةِ (الشكل ٦): يُمَكِّنُ فِي هَذِهِ الْحَالَةِ رَسْمُ ثَلَاثَةِ أَشْعَةٍ مِنْ رَأْسِ السَّهْمِ كَمَا يَلِي:

- (١) الشُعاع الموازي للمحور البصري أو الأساسي والذي يمر في البؤرة F بعد انعكاسه عن سطح المرآة، ويسمى هذا «الشُعاع الموازي».
- (٢) الشُعاع الذي يمر بمركز التكور، ويسمى بالشُعاع الرئيسي، ويسقط هذا الشعاع عمودياً على سطح المرآة و ينعكس عنها مُرتداً إلى مساره الأصلي.
- (٣) الشُعاع الذي يمر بالبؤرة F و ينعكس عن المرآة موازياً للمحور البصري، ويسمى هذا الشعاع بالشُعاع البؤري.

ولما كان تقاطع شعاعين فقط يحدد موقع النقطة في الفراغ، فإننا نحتاج عملياً إلى رسم شعاعين من الأشعة الثلاثة السابقة.

إن الصورة المتكونة في هذه الحالة صورة حقيقية، مقلوبة ومصغرة مقارنة مع الجسم؛ ويحصل التصغير دائماً طالما زادت مسافة الجسم عن ضِعْفِي البُعد البؤري؛ وتسمى نسبة حجم الصورة إلى حجم الجسم أو نسبة مسافة الصورة إلى مسافة الجسم $\frac{v}{o}$ بالتكبير magnification؛ وسنقدم تعريفاً أكثر دقة للتكبير في الفصل التالي.

لقد عرف قدماء اليونان المرايا المقعرة، ويروى أن أرخيدس قد أشعل النار في مركب روماني مهاجم باستخدام مرآة مقعرة ضخمة.



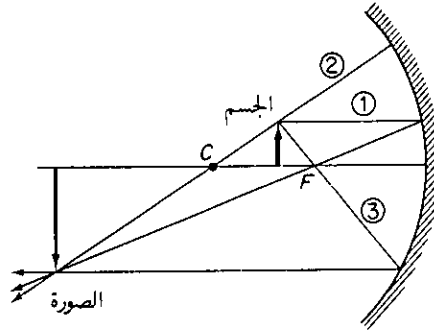
الشكل ٦: الجسم خارج مركز التكور

٢ * موقع الجسم بين مركز التكور والمستوى البؤري: إن ما نحصل عليه في هذه الحالة هو عكس ما حصلنا عليه في الحالة الأولى السابقة: فالصورة هنا حقيقية مقلوبة

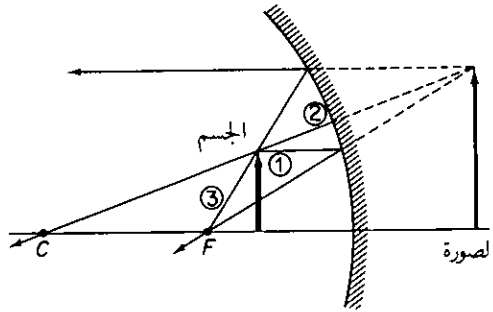
ولكنّها مكبّرة (الشكل ٧). وإذا ما وقعت الصورة والجسم في مستوى واحد، فإنّهما تكونان بنفس الحجم.

٣ * موقع الجسم داخل البعد البؤري: وفي هذه الحالة تبدو الأشعة المنعكسة عن المرآة أنّها تتفرّق من جهة الجسم؛ فهي لا تتقاطع أمام المرآة ولكنّها تبدو أنّها تصدر من نقطة في الجهة المقابلة منها (الشكل ٨). وهكذا فالصورة المتكوّنة خياليّة، معتدلة، ومكبرة.

٤ * المرآة هنا محدبة: وهذه الحالة هي عكس الحالة الثالثة السابقة؛ فالصورة خياليّة معتدلة ولكنّها مصغّرة (الشكل ٩). ويلاحظ المرء ظاهرة غريبة إذا ما وُضع جسم صغير مثل دقّيقة غبار مباشرة على سطح المرآة المحدبة؛ إذ أنّ الضوء الذي ينعكس مرتدّاً عن المرآة يكون ظلاً للجسم، الأمر الذي يؤدي إلى عدم وضوح الجسم بسبب سُمكيّه. وإذا كانت المرآة ذات نصف قطر تكوّر صغير فإنّ تكبير الجسم يزداد. وسنبحث المرايا التميكة في فصل آخر.



الشكل ٧: الجسم بين مركز التكوّر والمستوى البؤري



الشكل ٨: الجسم داخل البعد البؤري

الشكل ٩: الصورة المتكونة بمرآة محدبة

Aspheric Mirrors المرايا شبة الكرية

يُمْكِنُ تَجْمِيعُ الْأَشْعَةِ الْمُتَوَازِيَةِ فِي بُورَةٍ نُقْطِيَّةٍ بِاسْتِخْدَامِ مِرَاةٍ قِطْعٍ مَكَافِيٍّ دَوْرَانِيٍّ Paraboloid ، وَهُوَ سَطْحٌ يَتَكَوَّنُ مِنْ دَوْرَانٍ قِطْعٍ مَكَافِيٍّ Parabola حَوْلَ مَحْوَرِهِ . وَلِلْقِطْعِ الْمَكَافِيِّ الْمَعَادِلَةُ التَّالِيَةُ :

[7-2:1]

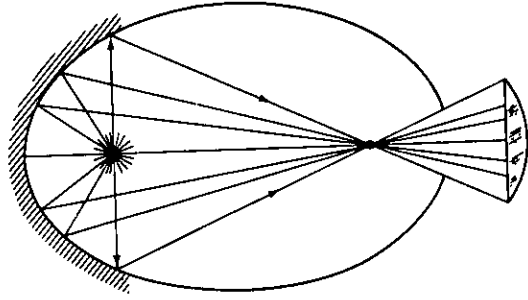
ص ۲ = ۲ رس

إِنَّ قُطْبَ الْمِرَآةِ يَقَعُ فِي نُقْطَةِ الْأَصْلِ (،،.)، أما المَحْوَرُ الْبَصْرِيُّ فيَقَعُ عَلَى الْمَحْوَرِ السِّينِيِّ، وَتَجْمَعُ الضُّوءُ الْمَوَازِي لِلْمَحْوَرِ الْبَصْرِيِّ فِي نُقْطَةِ الْبُورَةِ الَّتِي إِحْدَاثِيَّاهَا $(\frac{r}{y}, 0)$.

وإذا كَانَ الْجِسْمُ عَلَى مَسَافَةٍ مَحْدُودَةٍ، أَمْكَنَ تَجْمِيعُ الضَّوءِ الصَّادِرِ مِنْهُ فِي الْبُورَةِ النِّقْطِيَّةِ بِاسْتِخْدَامِ مِرَاةٍ مُجَسِّمِ الْقِطْعِ النَاقِصِ ellipsoid فقط : فَإِذَا وُضِعَ الْجِسْمُ فِي إِحْدَى بُورَتَيْ الْقِطْعِ النَاقِصِ، فَإِنَّ الصُّورَةَ تَتَكَوَّنُ فِي الْبُورَةِ الْآخَرَى. [حَاوِلْ أَنْ تَتَذَكَّرَ كَيْفَ يُمَكِّنُكَ رَسْمُ الْقِطْعِ النَاقِصِ بِاسْتِخْدَامِ خَيْطِ ذِي طَوْلِ مُنَاسِبٍ مَرْبُوطٍ طَرَفَاهُ بِمِسمَارَيْنِ صَغِيرَيْنِ ؛ اذِ يُمْكِنُكَ بِقَلَمٍ رِصَاصٍ شَدُّ الْخَيْطِ كَمَا يُمَكِّنُكَ تَحْرِيكُ الْقَلَمِ لِدَوْرَةٍ كَامِلَةٍ . فَالشَّكْلُ الَّذِي يَرْسُمُهُ الْقَلَمُ هُوَ الْقِطْعُ النَاقِصُ ؛ أَمَّا الْمِسمَارَانِ الصَّغِيرَانِ فَيَحَدَّدَانِ بُورَتَيْ الْقِطْعِ النَاقِصِ] .

وتسمح مرآة مجسم القطع الناقص بتجميع الضوء من مصدر ضوئي نقطي بصورة أكثر فاعلية. فاذا وُضع مصدر الضوء في البؤرة اليسرى في الشكل ١٠، يتجمع الضوء المنتشر في نصف الكرة أي ١٨٠ بالمرآة ويُحسّر في مخروط زاويته ٤٠؛ أما إذا وُضع الجسم في البؤرة اليمنى، فإن العدسة وُحدها تُجمع فقط الضوء المنتشر داخل المخروط الذي زاويته ٤٠.

ويمكن صنع مرايا ذات أبعاد بؤرية متغيرة بمط صحيفة من مادة الميَلَر Mylar مُلبسة بمعدن على وعاء أسطواني بشكل محكم بحيث يمكن تغيير ضغط الهواء في داخله أو على وجه مكبر للصوت.



الشكل ١٠: مُجمع الضوء الذي يتكون من عدسة مُسددة ومرآة مجسم القطع الناقص

وفي هذه الحالة فإن المرآة يمكن أن تكون مقعرة أو محدبة أو مستوية بحسب ضغط الهواء في الوعاء الأسطواني أو الفولتية Voltage التي تُغذي مكبر الصوت.

اقترح للقراءة الاضافية

I. D. Gluck, *It's All Done With Mirrors* (Garden City, N. Y.: Doubleday & Company, Inc., 1968).

المسائل

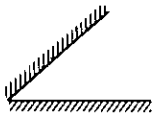
- ١-٢:١ كَوْنَتْ مِرَاةٌ كُرِّيَّةٌ مَقْعَرَةٌ صَوْرَةٌ عَلَى مَسَافَةٍ ٤ سَم لِحِجْمٍ مَوْضُوعٍ عَلَى مَسَافَةٍ ٢٠ سَم مِنْهَا . جَدِ الْبُعْدِ الْبُورِيِّ لِلْمِرَاةِ وَنُصْفُ قَطْرِ تَكْوَرِهَا .
- ٢-٢:١ وُضِعَ جِسْمٌ ارْتِفَاعُهُ ١ سَم عَلَى بُعْدٍ ٤ سَم أَمَامَ مِرَاةٍ . فَمَا نَوْعُ الْمِرَاةِ الَّتِي تَلْزَمُ لَتَكْوِينِ صَوْرَةٍ مُعْتَدِلَةٍ لَهُ ارْتِفَاعُهَا ٣ سَم . جَدِ كَذَلِكَ نِصْفُ قَطْرِ تَكْوَرِهَا .
- ٣-٢:١ وُضِعَ جِسْمٌ عَلَى بُعْدٍ ٦٠ سَم أَمَامَ مِرَاةٍ كُرِّيَّةٍ فَتَكُونَتْ لَهُ صَوْرَةٌ خَيَالِيَّةٌ عَلَى بُعْدٍ ١٥٠ سَم مِنَ الْمِرَاةِ . جَدِ نِصْفُ قَطْرِ تَكْوَرِ الْمِرَاةِ وَنَوْعُهَا وَتَكْبِيرُهَا .
- ٤-٢:١ وُضِعَ جِسْمٌ عَلَى بُعْدٍ ١٠ سَم مِنْ قُطْبِ مِرَاةٍ كُرِّيَّةٍ مُعْدِيَةٍ نِصْفُ قَطْرِ تَكْوَرِهَا ١٥ سَم . أَرَسِمِ شَكْلَ الْأَشْعَةِ ، وَجِدْ : أ) مَوْقِعَ الصَّوْرَةِ وَ ب) تَكْبِيرَ الصَّوْرَةِ ؟
- ٥-٢:١ تُكُونُ الْمِرَاةُ الْمَقْعَرَةُ صَوْرَةً خَيَالِيَّةً . هَلْ يُمْكِنُ تَصْوِيرُ هَذِهِ الصَّوْرَةِ . أَشْرَحْ إِجَابَتَكَ بِاسْتِخْدَامِ شَكْلِ شُعَاعِيٍّ .
- ٦-٢:١ يَسْقُطُ الضَّوُّ الصَّادِرُ مِنْ جِسْمٍ قَرِيبٍ عَلَى مِرَاةٍ مَقْعَرَةٍ ، وَتَكُونُ لَهُ صَوْرَةٌ حَقِيقِيَّةٌ . فَإِذَا غُيِّرَ الْجِسْمُ وَالْمِرَاةُ مَعًا فِي الْمَاءِ ، فَهَلْ يَتَغَيَّرُ مَوْقِعُ الصَّوْرَةِ ؟ وَإِذَا كَانَ الْأَمْرُ كَذَلِكَ ، فَبَيِّنْ كَيْفَ يَحْدُثُ ذَلِكَ .
- ٧-٢:١ يُمَسِّكُ طَبِيبٌ أَسْنَانَ مِرَاةٍ مَقْعَرَةٍ نِصْفُ قَطْرِ تَكْوَرِهَا ٤ سَم عَلَى بُعْدٍ ١٥ سَم مِنْ حَشْوَةِ سَنْ . جَدِ تَكْبِيرَ صَوْرَةِ الْحَشْوَةِ .
- ٨-٢:١ يُرَادُ اسْتِخْدَامُ مِرَاةٍ مَقْعَرَةٍ لِلتَّكْبِيرِ . فَمَا نِصْفُ قَطْرِ تَكْوَرِ الْمِرَاةِ الَّتِي تَلْزَمُ لِلْحُصُولِ عَلَى صَوْرَةٍ حَجْمُهَا ضَعْفُ حَجْمِ الْجِسْمِ ، عَلِمًا أَنَّ الْجِسْمَ يُرَادُ وَضْعُهُ عَلَى بُعْدٍ ٢٠ سَم مِنْ سَطْحِهَا الْعَاكِسِ .
- ٩-٢:١ لَدَيْكَ مِرَاةٌ نِصْفُ قَطْرِ تَكْوَرِهَا ٤٠ سَم . جَدِ الْمَوْضِعَيْنِ اللَّذَيْنِ يُمْكِنُ وَضْعُ الْجِسْمِ فِيهِمَا لِلْحُصُولِ عَلَى صَوْرَةٍ مُكْبَرَةٍ أَرْبَعَ مَرَّاتٍ .
- ١٠-٢:١ لَدَيْكَ مَرَّتَانِ مَقْعَرَتَانِ بُعْدَاهُمَا الْبُورِيَّانِ مُتَسَاوِيَانِ ، وَقُطْرَاهُمَا مُخْتَلِفَانِ . فَإِذَا كَوْنَتْ كُلُّ مِثْلِهِمَا صَوْرَةً لِلشَّمْسِ ، فَفِي أَيِّهِمَا تَكُونُ الصَّوْرَةُ أَشْخَنَ . وَمَا إِجَابَتُكَ لَوْ افْتَرَضْنَا أَنَّ الْمَرَاتَيْنِ مُتَسَاوِيَتَانِ فِي قُطْرَيْهِمَا وَمُخْتَلِفَتَانِ فِي بُعْدَيْهِمَا الْبُورِيَّيْنِ ؟

١١-٢:١ كَمْ يَجِبُ أَنْ يَكُونَ طَوْلُ مِرَاةٍ رَأْسِيَّةٍ حَتَّى يَتِمَكَّنَ شَخْصٌ طَوْلُهُ ٨٢,٨٢ مٍ مِنْ رُؤْيَةِ صُورَتِهِ كَامِلَةً فِي الْمِرَاةِ إِذَا وَقَفَ أَمَامَهَا؟

١٢-٢:١ وُضِعَت مِرَاتَانِ مُسْتَوِيَتَانِ بَحِثٌ كَانَتِ الزَّاوِيَةُ بَيْنَهُمَا ٣٥°. جَذَ زَاوِيَةُ سَقُوطِ الضَّوءِ عَلَى إِحْدَى الْمِرَاتَيْنِ بَحِثٌ يَنْعَكِسُ الضَّوءُ عَنِ الْمِرَاةِ الثَّانِيَةِ مُرْتَدًّا إِلَى نَفْسِ مَسَارِهِ تَمَامًا.

١٣-٢:١ وُضِعَت مِرَاتَانِ مُسْتَوِيَتَانِ بَحِثٌ كَانَتِ الزَّاوِيَةُ بَيْنَهُمَا ١٥°. تَصَوَّرْ أَنْ شِعَاعًا صَدَرَ مِنْ نَقْطَةٍ عَلَى إِحْدَى الْمِرَاتَيْنِ. فَمَا زَاوِيَةُ سَقُوطِ ذَلِكَ الشَّعَاعِ عَلَى الْمِرَاةِ الثَّانِيَةِ حَتَّى يَعُودَ بَعْدَ ثَلَاثَةِ أَنْعِكَاسَاتٍ مُوَازِيًا لِلْمِرَاةِ الْأُولَى؟

١٤-٢:١ فِي الشَّكْلِ ١١: A تُمَثِّلُ مَوْضِعَ صُورَةٍ مِنَ الصُّوَرِ الْعَدِيدَةِ الَّتِي يُمْكِنُ رُؤْيُهَا مِنْ النُّقْطَةِ E. جَذَ مَوْضِعَ الْجِسْمِ الَّذِي تَتَكَوَّنُ لَهُ مِثْلُ تِلْكَ الصُّورَةِ، ثُمَّ بَيِّنْ مَسَارَ الضَّوءِ مِنْ مَوْضِعِ الْجِسْمِ إِلَى مَوْضِعِ الْمُشَاهِدِ E.



الشكل ١١

١٥-٢:١ وُضِعَت مِرَاتَانِ مُسْتَوِيَتَانِ بَحِثٌ قَمِيلٌ إِحْدَاهُمَا عَلَى الْأُخْرَى. سَقَطَ شُعَاعٌ ضَوْئِيٌّ مُوَازِلٌ لِإِحْدَى الْمِرَاتَيْنِ عَلَى الْمِرَاةِ الْأُخْرَى، وَبَعْدَ أَرْبَعَةِ أَنْعِكَاسَاتٍ أَرْتَدَّ الشَّعَاعُ إِلَى مَسَارِهِ الْأَصْلِيِّ تَمَامًا. جَذَ الزَّاوِيَةَ بَيْنَ الْمِرَاتَيْنِ.

١٦-٢:١ مِرَاتَانِ مُسْتَوِيَتَانِ بَيْنَهُمَا زَاوِيَةُ مِقْدَارِهَا ٤٠°. كَمْ عَدَدُ الصُّوَرِ الْمُتَكَوِّنَةِ بِالْمِرَاتَيْنِ إِذَا وُضِعَ الْجِسْمُ:-

(أ) فِي نَقْطَةٍ تَبْعُدُ نَفْسَ الْبُعْدِ عَنِ الْمِرَاتَيْنِ وَ (ب) فِي مَوْضِعٍ عَلَى بُعْدِ ١٠ مٍ مِنْ إِحْدَى الْمِرَاتَيْنِ

١٧-٢:١ وُضِعَت مِرَاتَانِ: إِحْدَاهُمَا مَقْعَرَةٌ وَالْأُخْرَى مَحْدَبَةٌ، وَنُصِفَ قَطْرُ تَكْوِيرِ كُلِّ مِنْهُمَا ١٠ سَمٍ مُتَقَابِلَتَيْنِ عَلَى بُعْدِ ٢٠ سَمٍ. وَوُضِعَ فِي مُنْتَصَفِ الْمَسَافَةِ بَيْنَهُمَا جِسْمٌ ارْتِفَاعُهُ ٣ سَمٍ. جَذَ مَوْضِعَ الصُّورَةِ الْمُتَكَوِّنَةِ بِالْمِرَاتَيْنِ، وَجَذَ كَذَلِكَ ارْتِفَاعَهَا.

١٨-٢:١ وُضِعَت مِرَاةٌ مَقْعَرَةٌ نِصْفُ قَطْرِهَا ٤٠ سَمٍ مُوَاجِهَةً لِمِرَاةٍ مُسْتَوِيَةٍ، وَعَلَى بُعْدِ ٣٠ سَمٍ مِنْهَا. وَوُضِعَ جِسْمٌ فِي مُنْتَصَفِ الْمَسَافَةِ بَيْنَهُمَا. جَذَ مَوْضِعَ الصُّورَةِ الْمُتَكَوِّنَةِ وَتَكْبِيرَهَا بِاعْتِبَارِ أَشْعَةِ الضَّوءِ تَنْعَكُسُ أَوَّلًا:-

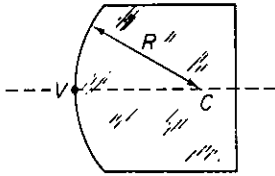
(أ) عَنِ الْمِرَاةِ الْمُسْتَوِيَةِ، (ب) عَنِ الْمِرَاةِ الْمَقْعَرَةِ.

الفصل ١: ٣

العدسات الرقيقة

Thin Lenses

تُصنع العدسة من مادة شفافة على شكل جسم ذي تماثل دوراني. وعادةً يكون أحد سطحي العدسة أو كلاهما كُرَيًّا، أي مأخوذاً من كُرّة. ونتناول أولاً جسمًا زجاجيًا له سطح كُرَيّ واحد.



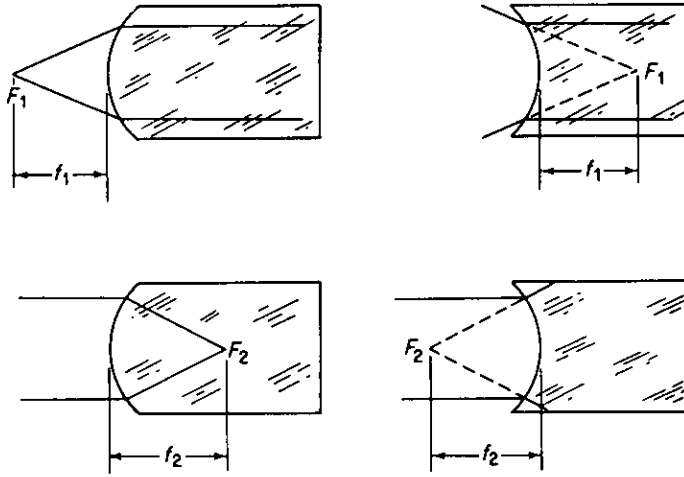
الانكسار عن سطح كروي منفرد Refraction at a single Spherical Surface

الخصائص البصرية

الشكل ١: سطح كاسر منفرد: V هي القطب، R نصف قطر التكور و C مركز التكور.

إفترض أن السطح قد صُفِّل ليأخذ الشكل المحدَّب في الشكل ١. إنَّ أيَّ سطحٍ كُرَيّ له مركزُ تكوُّر، وتناسبُ درجة تكوُّر السطح Curvature عكسيًا مع نصف قطر التكوُّر. وتُسمى النقطة التي يقطع عندها المحور البصري optic axis السطح الكُرَيّ «القطب vertex». وإذا صدر الضوء من بُرة وسقط على السطح الكُرَيّ، تُضَبُّ الأشعة الضوئية بعد انكسارها بالسطح متوازية (الشكل ٢ - الرسم العلوي إلى اليسار)؛ وتُسمى تلك البُرة بالبُرة الأساسية الأولى أو بالبُرة الواقعة في جهة الجسم (F_1)؛ وتُسمى المسافة بينها وبين المستوى الذي يماس السطح عند القطب بالبعد البُوري الأول (f_1) first focal length. ومن ناحية أخرى فإذا سقطت أشعة متوازية على سطح محدَّب كاسر، فإنها تتجمَّع في بُرة تُسمى البُرة الثانوية الثانية أو البُرة الواقعة في جهة الصورة (F_2)؛ أما البعد البُوري الثاني (f_2) فهو المسافة بين البُرة الثانية والمستوى الذي يماس السطح عند القطب (الرسم السفلي إلى اليسار).

* يَغنِي لفظ «lens» في اللاتينية «حبة العدس lentil». إنَّ شكل العدسة محدَّبة الوجهين يُشبه شكل حبة العدس، وفي الألمانية يُستخدَم لفظ «Linse» للعدسة ولحبة العدس.



الشكل ٢: البؤرتان F_1 ، F_2 والبعدان البؤريان f_1 ، f_2 .

وإذا ما سقطت أشعة على سطح كروي مقعر، وأصبحت بعد انكسارها عنه متوازية، فإن امتدادات تلك الأشعة تتجمع في نقطة تسمى البؤرة الأولى للسطح المقعر (الرسم العلوي إلى اليمين، الشكل ٢). أما إذا سقطت الأشعة على السطح المقعر متوازية، فإن الأشعة المنكسرة تبدو صادرة من بؤرة تسمى البؤرة الثانية (الشكل ٢- الرسم السفلي إلى اليمين). وتسمى السطوح المستوية التي تنشأ عمودية على المحور البصري المستويات البؤرية **focal planes**. إن الأشعة المتوازية والتي لا توازي المحور البصري تتجمع (أو تبدو أنها تتجمع) بعد انكسارها في نقطة في المستوى البؤري، وتسمى النقاط المتناظرة في فراغ (حينز) الجسم وفراغ (حينز) الصورة والتي تستوفي العلاقة المتحققة بين الجسم والصورة بالنقاط المترافقة **conjugate**، كما تسمى المستويات التي تقع فيها تلك النقاط بالمستويات المترافقة. كذلك تسمى المسافات بين النقاط المترافقة والسطح أي المستوى الذي يماس السطح عند القطب بالمسافات المترافقة، وتسمى الأشعة الضوئية ذات الصلة بالأشعة المترافقة.

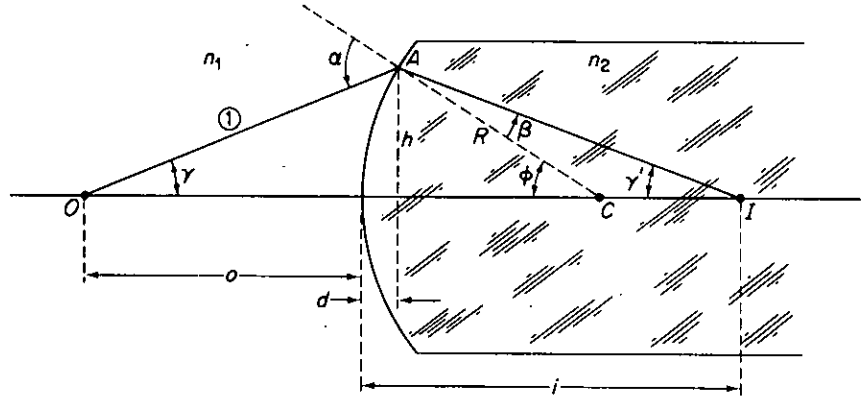
• أذحل مفهوم العناصر المترافقة أول مرة لاجرانج Lagrange عام ١٧٧٨.

وكما نَعْرِفُ، يوجَدُ لكلِّ موقعٍ للجِسمِ موقعٌ مناظِرٌ للصورة. ولأنَّ الصورةَ يُمْكِنُ أَنْ تَكُونَ خياليَّةً أو حقيقيَّةً، وَيُمْكِنُ أَنْ تَقَعَ فِي إِحْدَى جِهَتَيْ السَّطْحِ فَإِنَّ الصورةَ يُمْتَدُّ مِنْ نُقْطَةِ مَالَا نِهَآيَةِ فِي إِحْدَى جِهَتَيْ السَّطْحِ إِلَى نُقْطَةِ مَالَا نِهَآيَةِ فِي الْجِهَةِ الْآخَرَى. وَتَنْطَبِقُ الْمَحَاكِمَةُ نَفْسُهَا عَلَى فَرَاغِ الْجِسْمِ؛ وَلِذَا فَإِنَّ فَرَاغَ الْجِسْمِ وَفَرَاغَ الصورةِ يَتَدَاخِلَانِ تَمَاماً. وَمِنْ ثَمَّ فَإِنَّ انْتِسَابَ نُقْطَةِ مَا إِلَى فَرَاغِ الْجِسْمِ أَوْ فَرَاغِ الصورةِ يَعْتمَدُ عَلَى انْتِسَابِهَا لِلشُّعَاعِ قَبْلَ الْانكِسَارِ أَوْ بَعْدَهُ.

تَكُونُ الصُّورُ بِالسَّطْحِ الْكَرِّي الْمَنفَرْدِ

لِنَفْتَرِضْ أَنَّ الْوَسْطَ إِلَى يَسَارِ السَّطْحِ الْمَحْدَبِ فِي الشَّكْلِ ٣ لَهُ مَعَامِلُ انكِسَارٍ مَقْدَارُهُ n_1 ، وَأَنَّ الْوَسْطَ إِلَى يَمِينِ السَّطْحِ لَهُ مَعَامِلُ انكِسَارٍ n_2 . إِنَّ صُورَةَ جِسْمٍ نُقْطَةِ O عَلَى الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ هِيَ النُّقْطَةُ I عَلَى الْمَحْوَرِ نَفْسِهِ.

وَيَعْمَلُ الشُّعَاعُ (١) الصَّادِرُ مِنَ النُّقْطَةِ O زَاوِيَةَ γ مَعَ الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ. وَبِاسْتِخْدَامِ الْعِلَاقَةِ الْهَنْدَسِيَّةِ الَّتِي تُنصُّ أَنَّ الزَّاوِيَةَ الْخَارِجِيَّةَ لِمُثَلِّثٍ مَا تُسَاوِي مَجْمُوعَ الزَّاوِيَتَيْنِ الْدَاخِلَتَيْنِ عِدا الزَّاوِيَةَ الْمَجَاوِرَةَ، نَتَبَيَّنُ أَنَّ:



الشَّكْلِ ٣: الْانكِسَارُ عَنْ سَطْحِ كَرِّي مَنفَرْدٍ.

$$\phi + \gamma = \alpha$$

$$\gamma' + \beta = \phi$$

$$\gamma' - \phi = \beta$$

$$\frac{h}{d+o} = \gamma \quad \text{كذلك نتبين أن: - ظا}$$

$$\text{و} \quad \frac{h}{d-i} = \gamma' \quad \text{ظا}$$

$$\frac{h}{R} = \phi \quad \text{جا}$$

ويمكنُ تقريبُ جيبِ الزاوية الصغيرة وظلّها بالزاوية نفسها. * وبالتقريبِ المشار إليه، وبإهمالِ d نحصلُ على:-

$$[1-3:1] \quad \dots\dots \frac{h}{R} + \frac{h}{o} \approx \phi + \gamma = \alpha \approx \alpha \quad \text{جا}$$

$$[2-3:1] \quad \dots\dots \frac{h}{i} - \frac{h}{R} \approx \gamma' - \phi = \beta \approx \beta \quad \text{و جا}$$

وباستخدام قيمتي جا α و جا β في المعادلتين [1-3:1] و [2-3:1] في قانون سنيل:

$$[3-3:1] \quad \dots\dots \frac{n_2}{n_1} = \frac{\alpha \text{ جا}}{\beta \text{ جا}}, \text{ أو: } n_1 \text{ جا } \alpha = n_2 \text{ جا } \beta \quad \dots\dots$$

نحصلُ على:

$$\frac{n_2 h}{i} - \frac{n_2 h}{R} = \frac{n_1 h}{R} + \frac{n_1 h}{o}$$

على:-

$$[4-3:1] \quad \dots\dots \frac{n_1 - n_2}{R} = \frac{n_2}{o} + \frac{n_1}{h}$$

* تُسمى الأشعةُ التي يُنطبقُ عليها هذا التقريبُ الأشعةُ المحورية المُحاذية Paraxial rays .

وَتُسَمَّى المعادلة [١: ٣-٤] معادلةَ جاوس للانكسارِ عَنْ سطحٍ كُرِّيٍّ مُنفردٍ **.
وَتَحْتَوِي هذه المعادلةُ على ثلاثة تعابيرٍ وصفيةٍ هي n_1 ، n_2 ، و R ، وعلى تعبيرين وظيفيين هما i و o .

وَيَتَحَرَّكُ الجسمُ تَدْرِجاً إلى ما لا نهاية ($0 \leftarrow \infty$) تَتَحَرَّكُ الصورةُ إلى المُستوى البُؤريِّ ($i \leftarrow f$) ، وهكذا نَحْصُلُ على القيمةِ التاليةِ للبُعْدِ البُؤريِّ في جِهَةِ اليمينِ :-

$$[١: ٣-٥] \quad \dots\dots \frac{(R) (n_2)}{n \Delta} = f_2$$

وَبصورةٍ مُماثلةٍ تَكُونُ قِيَمَةُ f_1 :

$$[١: ٣-٦] \quad \dots\dots \frac{(R) (n_1)}{n \Delta} = f_1$$

حيث $n_1 - n_2 = n \Delta$.

وَبإِعَادَةِ تَرْتِيبِ المُعَادَلَتَيْنِ [١: ٣-٥] و [١: ٣-٦] وَضَمَّهُمَا مَعاً نَحْصُلُ على :-

$$[١: ٣-٧] \quad \dots\dots \frac{f_2}{n_2} = \frac{R}{n} = \frac{f_1}{n_1}$$

وَمِنَ المعادلةِ السابقةِ نَحْصُلُ على :

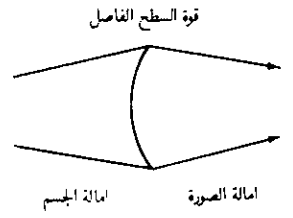
$$[١: ٣-٨] \quad \dots\dots \frac{n_1}{n_2} = \frac{f_1}{f_2}$$

وَبَضْمُ المعادلتين [١: ٣-٤] و [١: ٣-٧] مَعاً نَحْصُلُ على :-

$$[١: ٣-٩] \quad \dots\dots \frac{n_2}{f_2} = \frac{n_1}{f_1} = \frac{n_2}{i} + \frac{n_1}{o}$$

** سُمِّيت نسبةُ إِيكَارْل فِرْدْرِيكْ جاوُس Karl Friedrich Gauss (١٧٧٧-١٨٥٥) ، عالمِ الرياضيات والفلكِ الألمانِي الَّذِي أَشْهَمَ في النظريةِ المغناطيسيةِ ، الرَّسْمُ بالأشعةِ ، ونظريةِ العدساتِ من الرُّتْبَةِ الأولى ، وَكَتَبَ كتابه Dioptrische Untersuchungen عام ١٨٤٣ .

وَتَصِفُ الْمُعَادَلَةُ الْأَخِيرَةَ الْمَسَافَاتِ الْمُرَافِقَةَ لِسَطْحٍ كُرِّيٍّ مُنْفَرِدٍ. وَتَنْطَبِقُ الْمُعَادَلَةُ نَفْسُهَا كَذَلِكَ عَلَى السَّطْحِ الْمُقَعَّرِ حَيْثُ يُعْتَبَرُ نِصْفُ قُطْرِ التَّكْوُّرِ R سَالِبًا.



اصطلاحات الاشارات

دَعْنَا الْآنَ نَعِدُّ ذِكْرَ اصْطِلَاحَاتِ الْإِشَارَاتِ مُعَدَّلَةً لِلْسَطُوحِ الْكَاسِرَةِ:

- ١ - تَكُونُ مَسَافَةُ الْجِسْمِ لِلْجِسْمِ الْحَقِيقِيِّ مُوجِبَةً.
- ٢ - تَكُونُ مَسَافَةُ الصُّورَةِ مُوجِبَةً لِلصُّورَةِ الْحَقِيقِيَّةِ، وَسَالِبَةً لِلصُّورَةِ الْخَيَالِيَّةِ.
- ٣ - يَكُونُ الْبُعْدُ الْبُؤْرِيُّ مُوجِبًا لِلْمُنْظُومَةِ الْلَامَةِ، وَسَالِبًا لِلْمُنْظُومَةِ الْمُفْرَقَةِ.
- ٤ - تَكُونُ السَّطُوحُ الْمُحْدَبَةُ ذَاتَ نِصْفِ قُطْرٍ تَكْوُّرٍ مُوجِبٍ عِنْدَ النَّظَرِ إِلَيْهَا مِنَ الْوَسْطِ الْخَفِيفِ فِي اتِّجَاهِ الْوَسْطِ الْكَثِيفِ يَغُضُّ النَّظَرَ عَنْ اتِّجَاهِ مُرُورِ الصَّوءِ، أَمَّا السَّطُوحُ الْمُقَعَّرَةُ فَيَكُونُ نِصْفُ قُطْرٍ تَكْوُّرٍ سَالِبًا.

الشكل ٤ : إمالة الجسم والصورة وقوة الكسر.

الحرف عن التوازي (الإمالة) Vergence

يَصِفُ لَفْظُ الْإِمَالَةِ دَرَجَةَ انْحِرَافِ حُزْمَةٍ ضَوْئِيَّةٍ عَنْ وَضْعِ التَّوَازِي. وَلِذَا يَشْمَلُ هَذَا اللَّفْظُ تَفَارُبَ الْأَشْعَةِ أَوْ تَبَاعُدَهَا. وَيُظْهَرُ الْفَرْقُ بَيْنَ التَّقَارُبِ وَالتَّبَاعُدِ بِاسْتِخْدَامِ الْإِشَارَاتِ. وَتُقَاسُ الْإِمَالَةُ (V) فِي أَنْسِطِ صُورِهَا بِمَقْلُوبِ الْمَسَافَةِ (S) بَيْنَ مُسْتَوَيْتَيْنِ مَرْجِعِيَّيْنِ، أَيْ أَنْ: $V = \frac{1}{S}$. وَعِنْدَ الْأَخْذِ بِعَيْنِ الْإِعْتِبَارِ مُعَامِلِ انْكِسَارِ الْوَسْطِ (n) مَا بَيْنَ الْمُسْتَوَيْتَيْنِ الْمَرْجِعِيَّيْنِ، فَإِنَّ تَعْرِيفَ «الامالة المختزلة» يَكُونُ عَلَى التَّحْوِ التَّالِي: -

[١٠-٣:١]

.....

$$\frac{n}{S} = V$$

وَلَمَّا كَانَ مُعَامِلُ الْانْكِسَارِ كَمِّيَّةً لَا وَحْدَةَ لَهَا وَالْمَسَافَةُ S تُقَاسُ بِالْأَمْتَارِ، فَإِنَّ الْوَحْدَةَ الصَّحِيحَةَ لِلْإِمَالَةِ هِيَ مَقْلُوبُ الْمِثْرِ أَيْ $\frac{1}{\text{م}} - \text{أوم}^1$. وَتَكُونُ الْمَسَافَةُ S مُوجِبَةً وَكَذَلِكَ

الْإِمَالَةُ عِنْدَمَا تَتَقَارَبُ الْأَشْعَةُ أَوْ تَتَجَمُّعُ نَحْوَ نَقْطَةٍ؛ وَعَلَى عَكْسِ ذَلِكَ فَإِذَا صَدَرَ الصَّوءُ مِنْ نَقْطَةٍ، فَإِنَّ الْمَسَافَةَ إِلَى تِلْكَ النِّقْطَةِ تَكُونُ سَالِبَةً وَفِي جِهَةِ الْيَسَارِ وَكَذَلِكَ الْإِمَالَةُ.

قُوَّةُ الْكَسْرِ Refractive Power

يُغَيَّرُ السَّطْحُ الْمُتَحَنِي مِنْ إِمَالَةِ الضَّوءِ؛ وَتُعَرَّفُ قُوَّةُ الْكَسْرِ P لِسَطْحٍ مَا بِأَنَّهَا التَّسْبُةُ بَيْنَ مُعَامِلِ انْكِسَارِ الْوَسْطِ وَالْبُعْدِ الْبُؤْرِيِّ لِلْسَّطْحِ مُقَاساً بِالْأَمْتَارِ:-

[١١-٣:١]

$$\boxed{\frac{n}{f} = P} \dots\dots$$

وَهَكَذَا فَكُلَّمَا قَصُرَ الْبُعْدُ الْبُؤْرِيُّ لِسَطْحٍ أَوْ لَعَدَسَةٍ زَادَتْ قُدْرَتُهُ عَلَى الْكَسْرِ، وَالْعَكْسُ بِالْعَكْسِ. وَيُلَاحَظُ أَنَّ الْمَعَادَلَةَ [١١-٣:١] مُمَازِلَةٌ تَمَاماً لِلْمَعَادَلَةِ [١٠-٣:١]، وَمِنْ نَمِّ فَإِنَّ وَحْدَاتِ الْإِمَالَةِ هِيَ وَحْدَاتُ قُوَّةِ الْكَسْرِ. وَفِعْلاً فَإِنَّ وَحْدَةَ قُوَّةِ الْكَسْرِ يُنْبَغِي أَنْ تَكُونَ م-١؛ إِلَّا أَنَّ وَحْدَةَ الدِّيُوبْتَر Diopter الَّتِي أُذْخِلَهَا أَوَّلَ مَرَّةٍ مُونُويز (monoyer)* وَالَّتِي لَهَا نَفْسُ الْمِقْدَارِ غَالِباً مَا تُسْتَخْدَم. إِنَّ الْمُنْظُومَاتِ الْمُجْمَعَةَ أَوَّالاً لَهَا قُوَّةُ كَسْرِ مُوجِبَةٍ، أَمَّا الْمُنْظُومَاتُ الْمُفْرَقَةُ فَلَهَا قُوَّةُ كَسْرِ سَالِبَةٍ.

وَمِنْ الْمَعَادَلَةِ [٧-٣:١] نَحْصُلُ عَلَى:-

$$\frac{n \Delta}{R} = \frac{n}{f}$$

وَبَتَقْوِيضِ تِلْكَ الْقِيَمَةِ فِي الْمَعَادَلَةِ [١١-٣:١] نَحْصُلُ عَلَى:-

[١٢-٣:١]

$$\dots\dots \frac{n \Delta}{R} = P$$

وَتُعَرَّفُ الْمَعَادَلَةُ السَّابِقَةُ بِمَعَادَلَةِ قُوَّةِ السَّطْحِ **Surface Power equation**.

وَلِحَلِّ الْمَسَائِلِ بِطَرِيقَةِ الْإِمَالَةِ يَلْزَمُنَا قِيَمٌ ثَلَاثٌ: إِمَالَةُ الْأَشْعَةِ قَبْلَ مُرُورِهَا فِي السَّطْحِ، إِمَالَةُ الْأَشْعَةِ بَعْدَ مُرُورِهَا فِي السَّطْحِ، وَقُوَّةُ كَسْرِ السَّطْحِ (الشَّكْل ٤). وَ يُظَلَّقُ عَلَى إِمَالَةِ

* لَقَدْ دَافَعَ فِرْدِينَانْدُ مُونُويز (١٨٣٦-١٩١٢): أَسَاتُذُ طِبِّ الْعُيُونِ فِي جَامِعَتِي نَانْسِي Nancy وُلِيُون Lyon فِي فَرَنْسَا عَنْ اسْتِخْدَامِ النَّظَامِ الْمِثْرِيِّ لِتَغْيِينِ عَدَسَاتِ النَّظَرِ.

الضوء قبل الانكسار «الإمالة في فراغ الجسم» أو إمالة الجسم V_o ، وعلى إمالة الضوء بعد الانكسار «الإمالة في فراغ الصورة» أو إمالة الصورة V_i . وبذلك فإن إمالة الصورة تساوي مجموع إمالة الجسم وقوة كسر السطح .

[١٢-٣:١]

.....

$$P + V_o = V_i$$

مثال : يَصْدُرُ الضوءُ مِنْ جِسْمٍ مِثْلِ نَقْطَةٍ عَلَى الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ يَبْعُدُ ٤٠ سَمَ إِلَى جِهَةِ الْيَسَارِ مِنْ قَضِيبٍ زُجَاجِيٍّ طَوِيلٍ مُعَامِلُ انْكِسَارِهِ ١,٦ . وَقَدْ صُقِلَ طَرَفُ الْقَضِيبِ فِي شَكْلِ سَطْحٍ كُرِّيٍّ مُحْدَبٍ نَصْفُ قُطْرِهِ ٦ سَمَ . جِدْ بِاسْتِخْدَامِ طَرِيقَةِ الْإِمَالَةِ مَسَافَةَ الصُّورَةِ .

الحل :

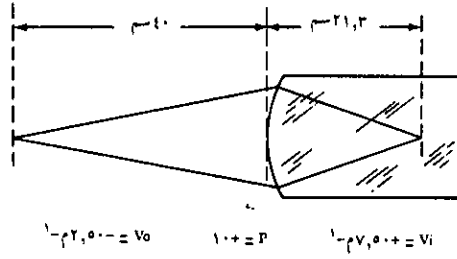
$$\text{إمالة الجسم} = \frac{n}{o} = \frac{1,6}{40} = \frac{1}{25} = 0,04$$

$$\text{قوة كسر السطح} = \frac{n \Delta}{R} = \frac{1,6}{6} = 0,267$$

$$\text{إمالة الصورة} = \text{إمالة الجسم} + \text{قوة الكسر} = (0,04) + (0,267) = 0,307$$

$$\therefore \text{مسافة الصورة } i = \frac{n}{V_i} = \frac{1,6}{0,307} = 5,21 \text{ سم}$$

وَيَظْهَرُ مِنْ كَوْنِ الْإِشَارَاتِ إِلَى يَمِينِ السَّطْحِ وَيساره فِي الشَّكْلِ ٥ مَعْكُوسَةً ، أَنَّ التَّفْرِيقَ قَدْ تَحَوَّلَ إِلَى تَجْمِيعٍ ؛ وَيَعْنِي هَذَا أَنَّ الصُّورَةَ الَّتِي تَكُونَتْ هِيَ صُورَةٌ حَقِيقِيَّةٌ مَقْلُوبَةٌ . وَإِذَا مَا بَقِيَتِ الْإِشَارَاتُ وَاحِدَةً عَلَى جَانِبَيْ السَّطْحِ ، فَإِنَّ الصُّورَةَ الْمَتَكُونَةَ تَكُونُ خَيَالِيَّةً مُعْتَدِلَةً .



الشكل ٥ : امالتا الجسم والصورة وقوة كسر سطح كوز صورة حقيقية.

ألعدسات الرقيقة Thin Lenses

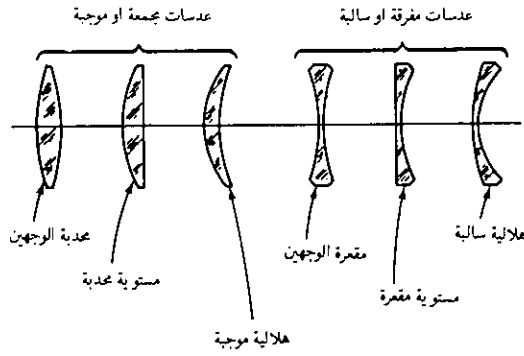
ألخصائص البصرية

نُميَزُ هنا بينَ فئتين من ألعدسات (الشكل ٦) تبعاً لِكَوْنِ العدسة تُفرِّقُ أو تُجمَعُ حُرْمةً ضوئيةً متوازيةً. فالعدسة المُجمِّعة أو العدسة الموجبة عادةً أَتَّخِذُ في الوسيط منها في الطَّرفَيْنِ؛ لا سيما إذا كانت العدسة مصنوعةً من مادةٍ مُعاملِ انكسارها أكبر من مُعاملِ انكسار الوسيط المحيط بها. وَيُقَالُ إنَّ العدسة رقيقةً إذا كَانَ الشَّعاعُ الَّذِي يَسْقُطُ على أَحَدِ وَجْهَيْهَا بالإحداثيتين (ص، ع) يَخْرُجُ منها أي من وَجْهها الثاني يَنْقَسِ الإحداثيتين، أي بإزاحةٍ داخلِ العدسة يُمكنُ إلهماها. ولا يوجدُ هنالك حدُّ عَدَدِيّ numerical limit يَفْصِلُ بينَ العدسة الرقيقة والعدسة السميكة؛ فذلك أمرٌ يعودُ بكليته إلى الدقة المطلوبة لحلِّ مسألةٍ ما: فالعدسة نفسها يُمكنُ اعتبارها رقيقةً لحلِّ المسألة بصورةٍ أوليةٍ وسميكةً للحصول على حلٍّ دقيقٍ للمسألة. وَ يوجدُ للعدسة مركزاً تَكَوِّرَ ونضفاً قُطْرَ تَكَوِّرَ واحدٌ لِكُلِّ وَجْه. وَيُسَمَّى الخَطُّ الواصلُ بينَ المَرَكِّزَيْنِ بالمحورِ الأساسي للعدسة principal axis. وإذا كَانَ أَحَدُ وَجْهَيْ العدسة سطحاً مُستوياً، فإن المحورَ الأساسي يكونُ عمودياً على ذلك السطحِ المُستوي، ويُمَرُّ بمركزِ تَكَوِّرِ الوجه الآخر.

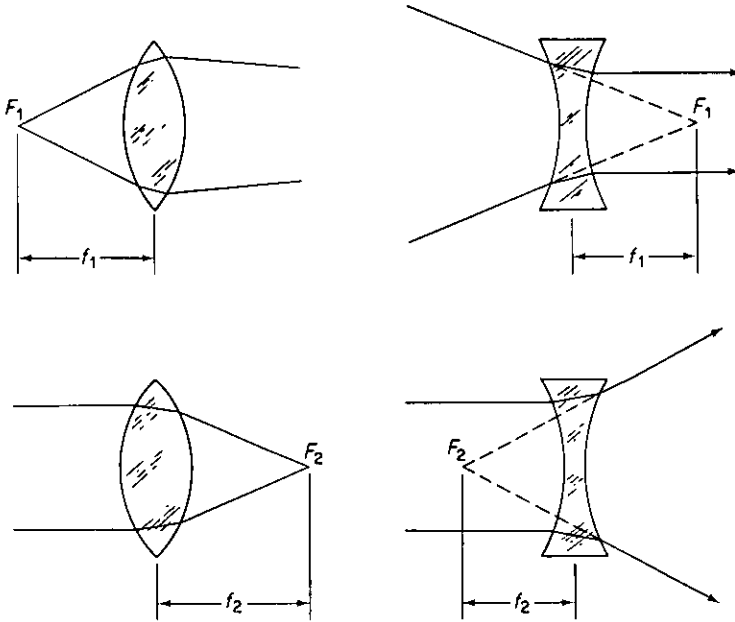
• لقد وضع الخصائص الأساسية للعدسات أو حَقْلَ الكسر العالمُ كَيْلَرُ Kepler في كتابه:

Dioptrice, (Augustae, Vindelicorum, 1611).

وَمَثَلِ السَّطْحِ الْكَاسِرِ الْمُتَفَرِّدِ، فَإِنَّ الْبُورَةَ الْأُولَى لِلْعَدْسَةِ أَوِ الْبُورَةِ الْوَاقِعَةِ فِي جِهَةِ الْجِسْمِ هِيَ نَقْطَةُ عَلَى الْمَحْوَرِّ الْبَصَرِيِّ يَنْكَسِرُ الضَّوُّ الصَّادِرُ مِنْهَا أَوْ الْقَادِمُ إِلَيْهَا مُوَازِئاً لِلْمَحْوَرِّ (الشَّكْل ٧)، أَمَّا الْبُورَةُ الثَّانِيَةُ أَوِ الْبُورَةُ جِهَةَ الصُّورَةِ فَهِيَ نَقْطَةُ أَيْضاً عَلَى الْمَحْوَرِّ الْبَصَرِيِّ يَتَجَمَّعُ فِيهَا الضَّوُّ الْمُوَازِي لِلْمَحْوَرِّ بَعْدَ أَنْكَسَارِهِ. وَفِي حَالَةِ الْعَدْسَةِ السَّالِبَةِ يَبْدُو الضَّوُّ أَنَّهُ يَتَفَرَّقُ مِنْهَا. وَ يُطْلَقُ أحياناً عَلَى الْمَسْتَوَى الْبُورِيِّ الثَّانِي لِعَدْسَةٍ مُجَمَّعَةٍ أَوْ مَنْظُومَةٍ مِنَ الْعَدْسَاتِ Lens System الْمَسْتَوَى الْبُورِيِّ الْخَلْفِيِّ back focal plane.



الشكل ٦: أنواع العدسات



الشكل ٧: البورتان والبعدان البوريان جهة الجسم (الرسم العلوي) وجهة الصورة (الرسم السفلي) لعدسة مجمعة (اليسار) وعدسة مفرقة (اليمن).

معادلة صانع العدسة The lens-maker's formula

يُمْكِنُ أَعْتَابُ العدسة الرقيقة على أنها مَجْمُوعُ سَطْحَيْنِ كَاسِرَيْنِ مُتَفَرَّدَيْنِ ؛ وَلِذَا فَعِنْدَمَا يَمُرُّ الضَّوُّ عَبْرَ السَّطْحَيْنِ فَإِنْ قُوَّتُهُمَا تُجْمَعَانِ :-

$$\frac{n \Delta}{R_2} + \frac{n \Delta}{R_1} = P_2 + P_1 = P$$

$$[١٤-٣:١] \quad \dots\dots\dots \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) n \Delta = P \text{ أي}$$

وهي مُعَادَلَةُ صَانِعِ العدسة. إِنَّ الْمَقْدَارَ $n \Delta$ يُعَبَّرُ عَنِ الْفَارِقِ الْمُطْلَقِ بَيْنَ مُعَامِلَيْ انْكَسَارِ العدسة وَالْوَسْطِ الْمُحِيطِ بِهَا. وَلَا حَاجَةَ لَنَا لِلْقَوْلِ بِأَنَّ تِلْكَ الْمُعَادَلَةُ هِيَ مُعَادَلَةُ تَقْرِيبِيَّةٌ نَظَرًا لِلْقِيُودِ الَّتِي سَنُشِيرُ إِلَيْهَا فِيمَا بَعْدُ بِنَظَرِيَةِ الرُّبُوبَةِ الْأُولَى **first-order theory**.

وَعِنْدَ وَضْعِ العدسة الَّتِي لَهَا مُعَامِلُ انْكَسَارِ n_2 بَيْنَ وَسْطَيْنِ مُعَامِلَا انْكَسَارِهِمَا n_1 وَ n_3 ، فَإِنَّا نَحْصِلُ عَلَى :-

$$[١٥-٣:١] \quad \dots\dots\dots \frac{n_2 - n_3}{R_2} + \frac{n_1 - n_2}{R_1} = \frac{n_3}{i} + \frac{n_1}{o}$$

مُعَادَلَةُ العدسة الرقيقة — صيغة جاوس

The Gaussian form of the thin lens equation

إِنَّ هَذِهِ الصِّغَةَ لِمُعَادَلَةِ العدسة تُشَبِّهُ مُعَادَلَةَ الْمِرَاةِ الَّتِي سَبَقَ شَرْحُهَا. وَيُمْكِنُ اسْتِقْصَاؤُ هَذِهِ الْمُعَادَلَةِ بِطَرِيقٍ مُخْتَلَفَةٍ: إِخْذَاهَا هِيَ طَرِيقَةُ رَسْمِ الْجَبْهَاتِ الْمَوْجِيَةِ.

لِنَتَصَوَّرْ جَبْهَةً مَوْجِيَّةً مُتَمَدِّدَةً تَصْدُرُ مِنْ جِسْمٍ نُقْطَةِ عَلَى الْمِخْوَرِ الْبَصَرِيِّ O، وَلِنُسَمِّ هَذِهِ الْجَبْهَةَ لِحْظَةً وَصُولَهَا أَلْعَدْسَةَ WW. إِنَّ إِعَاقَةَ الْجَبْهَةِ الْمَوْجِيَةِ تَكُونُ أَكْثَرًا مَا يُمْكِنُ عِنْدَ مُرُورِهَا فِي جُزْءِ الْعَدْسَةِ السَّمِيكِ، وَسَتَخْرُجُ مِنَ الْعَدْسَةِ مِثْلَ WW'، وَتَتَجَمَّعُ عِنْدَ النُّقْطَةِ I. فَفِي دَاخِلِ الْعَدْسَةِ يَقْطَعُ الضَّوُّ مَسَافَةً L فِي نَفْسِ الْوَقْتِ الَّذِي يَقْطَعُ فِيهِ الْمَسَافَةَ WW'

خارج العدسة . وبعبارة أخرى فإن المسارين البصريين L و WW متساويان . وإذا رُسم
الوتران chords على الجبهتين الموجبتين WW و $\acute{W} \acute{W}$ فإن AC و $\acute{C} B$ يُمثِّلان السَّهْمَيْنِ ،
وهما يُساويان على الترتيب $\frac{K}{i}$ ، $\frac{K}{o}$ ، حيث K ثابت . وَيَتَّبِعُ من الشَّكْلِ ٨ أن :-

$$[١٦-٣:١] \quad \dots nL = L + \frac{K}{i} + \frac{K}{o} = W\acute{W}$$

حيث n مُعَامِلُ انكِسار الزجاج . ولَمَّا كَانَ المِقْدَارُ nL ثَابِتًا لِلْعَدْسَةِ الْوَاحِدَةِ ، فَإِنَّ
المِقْدَارَ $L + \frac{K}{i} + \frac{K}{o}$ هُوَ ثَابِتٌ اِيضًا ؛ وَمِنْ ثَمَّ فَيَبْذُوعُ قِيَمَ أُخْرَى مِثْلِ o_2 و i_2 يُمَكِّنُ
الْقَوْلُ بِأَنَّ :-

$$-: nL = L + \frac{K}{i_2} + \frac{K}{o_2} = L + \frac{K}{i_1} + \frac{K}{o_1}$$

$$\frac{1}{i_2} + \frac{1}{o_2} = \frac{1}{i_1} + \frac{1}{o_1} . \text{ وإذا كان } o_2 \leftarrow \infty \text{ فَإِنَّ } i_2 \leftarrow f ,$$

[١٧-٣:١]

$$\dots \boxed{\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o}} \text{ ولذا فَإِنَّ :}$$

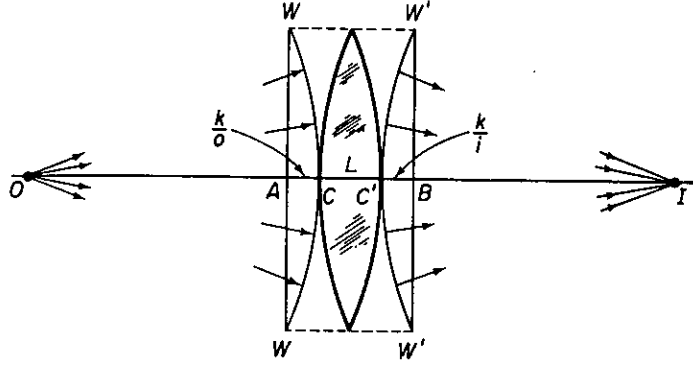
وهي صيغة جَاوِسَ لِمُعَادَلَةِ الْعَدْسَةِ الرَقِيقَةِ . وَتَنْطَبِقُ هذه المعادلةُ على الأشعة المحورية
المُحَادِيَةِ Paraxial rays كَتَقْرِيْبٍ أَوَّلِيٍّ .

ومن المعادلة السابقة يُمَكِّنُ الحُصُولُ على :-

$$\frac{f}{f-i} = o \text{ مَسَافَةُ الْجِسْمِ ،}$$

$$\frac{f}{f-o} = i \text{ مَسَافَةُ الصُّورَةِ ،}$$

$$\frac{i}{i+o} = f \text{ والبُعْدُ البُورِيُّ}$$



الشكل ٨: اشتقاق معادلة العدسة الرقيقة - صيغة جاوس

معادلة العدسة الرقيقة - صيغة نيوتن *

The Newtonian form of the thin lens equation

ان الفارق الأساسي بين هذه المعادلة ومعادلة العدسة الرقيقة - صيغة جاوس السابقة هو أن هذه المعادلة لا تشمل على مسافة الجسم ومسافة الصورة. وفي المقابل فإن المعادلة الحالية تحتوي على مسافتين خارج البؤرتين هما: N_o ، N_i ، وعلى البعدين البؤريين: f_1 ، f_2 (الشكل ٩). ونلاحظ من الشكل المذكور أن هنالك مجموعتين من المثلثات المتشابهة: واحدة في كل جهة من جهتي العدسة والتي هي محددة بالمحور البصري وبالأشعة المارة في البؤرتين. ومن الرسم في الشكل المذكور يتبين أن:-

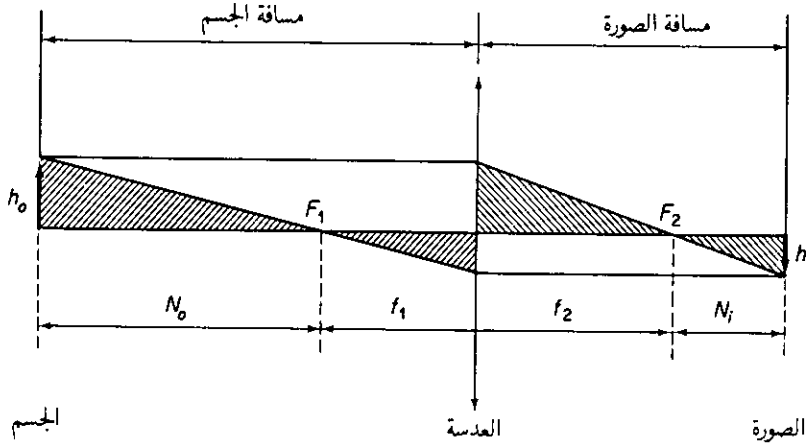
$$\frac{h_i}{N_i} = \frac{h_o}{f_2}, \quad \frac{h_i}{f_1} = \frac{h_o}{N_o}$$

و يضرب المعادلتين السابقتين ينتج أن:-

$$\left(\frac{h_i}{f_1}\right) \left(\frac{h_o}{f_2}\right) = \left(\frac{h_i}{N_i}\right) \left(\frac{h_o}{N_o}\right)$$

$$\text{أي: } \frac{1}{f_1 f_2} = \frac{1}{N_o N_i}$$

* اسحق نيوتن: الفيزيائي البريطاني (١٦٤٢-١٧٢٧).



الشكل ٩: اشتقاق معادلة نيوتن للعدسة الرقيقة هندسياً

[١٨-٣:١]

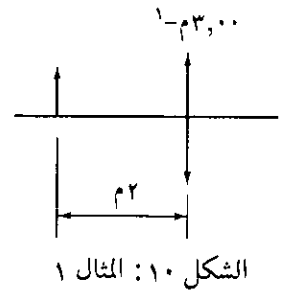
$$f_2 f_1 = N_o N_i \quad \text{أو} \quad \dots\dots$$

وهي الصيغة العامة لمعادلة نيوتن للعدسات الرقيقة. وكما هو واضح، فإذا كان مُعامل الانكسار على جهتي العدسة متساويين فنحصل من: $\frac{n_1}{n_2} = \frac{f_1}{f_2}$ على: $f^2 = N_o N_i$ و $f_2 = f_1$.

الإمالات

إنَّ الإمالة وقوة الكسْر تُستخدَمان للعدسة كما أستخدمتا للسطح الكاسِر المُنفرد، وتتناول فيما يلي بعض الأمثلة. لاحظ أنَّ العدسة الرقيقة تُمثل عادةً بسهم مزدوج؛ وعندما يكون رأس السهم مُشيرين إلى الخارج فإنَّ العدسة تكون عدسة مُجمعة، أما إذا أشارا إلى الداخل فإنَّ العدسة تكون عدسة مُفرقة.

مثال ١: وُضعت عدسة قُوَّة كسْرِها + ٣,٠٠ ديوبتر على بُعْدِ مِترَين من جِسْمٍ (الشكل ١٠)، بَحِثْ تَفْصِيْلُ الهَوَاءِ (إلى يسار العدسة) عن الماء (إلى يمين العدسة). جِدْ مسافة الصورة باستخدام طريقة الإمالة.



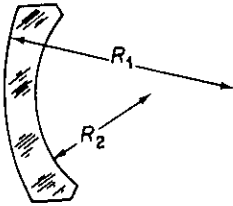
الشكل ١٠: المثال ١

الحل : مِنْ مُعَادِلَةِ الإِمَالَةِ : $\frac{n}{S} = V_0$ ، نَجِدُ إِمَالَةَ الْجَسْمِ عَلَى النُّحُو التَّالِي :

$$.1-م٠,٥٠ = \frac{١,٠٠}{م٢-} = V_0$$

$$١-م٢,٥٠ = (٣,٠٠) + (١-م٠,٥٠-) = P + V_0 = V_i \text{ إِمَالَةُ الصُّورَةِ } V_i$$

$$.٠. \text{ مَسَافَةُ الصُّورَةِ } i = \frac{n}{V_i} = \frac{١,٣٣}{٢,٥٠} = ٥٣ \text{ سم}$$



الشكل ١١ : مثال ٢ .

مثال ٢ : نِصْفَا قُطْرِ تَكْوِيرِ عَدْسَةٍ هِلَالِيَّةٍ سَالِبَةٍ : $R_1 = ٥٠ \text{ سم}$ ، $R_2 = -٢٥ \text{ سم}$ (الشكل ١١) ، وَمُعَامِلُ انْكَسَارِ الزَّجَاجِ $n = ١,٥٠$ ؛ جِدْ قُوَّةَ الْكَسْرِ لِلْعَدْسَةِ بِاعْتِبَارِ أَنَّهَا عَدْسَةٌ رَقِيقَةٌ .

الحل : مِنْ مُعَادِلَةِ صَانِيعِ الْعَدْسَةِ :

$$, \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) n \Delta = P$$

$$\text{نَجِدُ أَنَّ : } P = ٥,٥٠ = \left(\frac{1}{٠,٢٥-} + \frac{1}{٥٠} \right) ٠,٥ = (٤-٢) ٠,٥ = ١-م١,٠٠-$$

مثال ٣ : فِي الْمَثَالِ السَّابِقِ ، وَضَعْتَ الْعَدْسَةَ بِحَيْثُ يَكُونُ الْهَوَاءُ إِلَى يَسَارِهَا ، وَالزَيْتُ الَّذِي مُعَامِلُ انْكَسَارِهِ ١,٨ إِلَى يَمِينِهَا .

فَإِذَا كَانَتْ مَسَافَةُ الْجَسْمِ ٨٣,٣ سم ، فَجِدْ إِمَالَةَ الصُّورَةِ .

الحل : اَلْسَطَّحَانِ آلَانَ مَحْدَبَانِ ، وَلَهُمَا نِصْفَا قُطْرِ تَكْوِيرِ مُوجِبَانِ :

$$\text{فَلِلْمِسْطِجِ الْأَوَّلِ: } P_1 = \frac{n \Delta}{R_1} = \frac{0,50}{0,50+} = 1,00 - 1,$$

$$\text{وَلِلْمِسْطِجِ الثَّانِي: } P_2 = \frac{0,30}{0,25+} = 1,20 - 1;$$

وَمِنْ ثَمَّ فَإِنَّ قُوَّةَ الْعَدْسَةِ هِيَ:

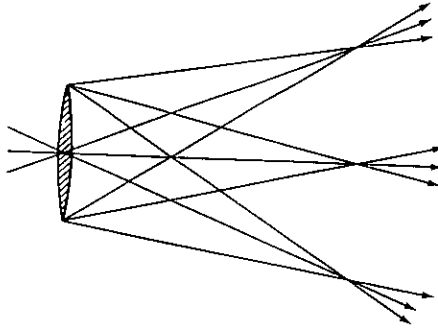
$$P_1 + P_2 = P = 1,00 + 1,20 = 2,20 - 1, \text{ وَلَيْسَ } 1,00 - 1 \text{ كَمَا فِي الْمَثَالِ الثَّانِي.}$$

$$\text{إِذَنْ، } V_0 = \frac{1,00}{0,833-} = 1,20 - 1,$$

$$V_i = (1,20 - 1) + (2,20 - 1) = 1,00 - 1.$$

لَا حِظَّ أَنْ أَلْفَظَ الْإِمَالَةَ، التَّفْرِيقَ، وَالتَّجْمِيعَ تُشِيرُ إِلَى وَضْعِ أَجْزَاءِ الْخُزْمَةِ الضَّوئِيَّةِ وَلَيْسَ إِلَى الْخُزْمَةِ الضَّوئِيَّةِ كَكُلِّ. فَمِنْ الْمُمْكِنِ تَمَاماً أَنْ تَتَجَمَّعَ أَقْلَامُ الْأَشْعَةِ of rays Pencils فِي الْوَقْتِ الَّذِي تَتَفَرَّقُ فِيهِ الْخُزْمَةُ الضَّوئِيَّةُ: فَالْوَضْعُ الَّذِي يُظْهِرُهُ الشَّكْلُ ١٢ هُوَ مِثَالٌ عَلَى تَجْمِيعِ الضَّوءِ وَلَيْسَ عَلَى تَفْرِيقِهِ؛ وَبَاخْتِصَارٍ فَإِنَّ الْأَشْعَةَ وَلَيْسَ الْخُزْمَةُ هِيَ الَّتِي تُحَدِّدُ صِفَةَ الْإِمَالَةِ.

فَكَيْفَ تَتَغَيَّرُ الْأِمَالَةُ عَلَى مَسَافَاتٍ مُتَفَاوِتَةٍ مِنْ عَدْسَةٍ أَوْ فَتْحَةٍ؟ فَإِذَا كَانَتِ الْإِمَالَةُ فِي الْمُسْتَوَى A فِي الشَّكْلِ ١٣ مَعْرُوفَةً، فَإِنَّ عَلَيْنَا أَنْ نَعَيِّنَ الْإِمَالَةَ فِي الْمُسْتَوَى B. إِنَّ الْإِمَالَةَ عِنْدَ كُلِّ مِنْ A وَ B هِيَ عَلَى التَّرْتِيبِ:-



الشكل ١٢: الأقلام المتجمعة بعد مرورها بالعدسة

[١٩-٣:١]

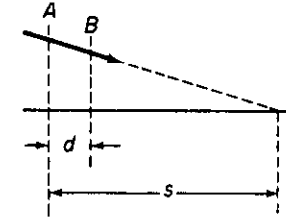
$$\dots\dots \frac{1}{d-S} = V_B, \quad \frac{1}{S} = V_A$$

وَبَتَعْوِضِ قِيَمَةِ S مِنَ الْمَعَادِلَةِ الْأُولَى فِي الْمَعَادِلَةِ الثَّانِيَةِ، نَحْصُلُ عَلَى :-

$$\frac{V_A}{V_A} \frac{1}{d - \frac{1}{V_A}} = \frac{1}{d - \frac{1}{V_A}} = V_B$$

$$\dots\dots \frac{V_A}{(V_A)(d) - 1} = V_B \dots\dots$$

[٢٠-٣:١]



الشكل ١٣ : تتغير الامالة على مقاطع عرضية مختلفة من مسار الضوء .

وَمَعَ أَنَّ الْمَعَادِلَةَ [٢٠-٣:١] قَدْ أَشْتُقَّتْ لِلضَّوِّ الْمُتَجَمِّعِ، إِلَّا أَنَّهَا تَصِيحُ لِلضَّوِّ الْمُتَفَرِّقِ مِنْ دُونِ تَغْيِيرٍ فِي إِشَارَةِ الْمَقَامِ طَالَمَا اسْتَعْدَمْنَا أَصْطِلَاحَ الْإِشَارَاتِ : (+) لِلتَّجْمِيعِ وَ (-) لِلتَّفْرِيقِ .

مَجْمُوعَاتُ الْعَدَسَاتِ الرَّقِيقَةِ

إِذَا وُضِعَتَا عَدَسَتَانِ رَقِيقَتَانِ مُتَلَاصِقَتَيْنِ، بِحَيْثُ يَنْطَبِقُ مِخْوَرَاهُمَا، فَإِنَّ إِمَالَةَ الضَّوِّ الْخَارِجِ مِنَ الْعَدْسَةِ الْأُولَى تُسَاوِي إِمَالَةَ الضَّوِّ السَّاقِطِ عَلَى الْعَدْسَةِ الثَّانِيَةِ . وَلِذَا فَإِنَّ قُوَّةَ كَسْرِ مَجْمُوعَةِ الْعَدَسَاتِ الرَّقِيقَةِ تُسَاوِي مَجْمُوعَ قَوَى الْكَسْرِ لِلْعَدَسَاتِ مُتَفَرَّدَةً،

[٢١-٣:١]

$$\text{أي أن:} \quad \boxed{Q_m = Q_1 + Q_2} \dots\dots$$

وَلَمَّا كَانَتْ قُوَّةُ الْكَسْرِ لِلْعَدْسَةِ تُسَاوِي مَقْلُوبَ بُعْدِهَا الْبُؤْرِيِّ أَيْ $Q = \frac{1}{b}$ ، فَإِنَّ :-

$$\frac{Q_m}{\frac{1}{b_m}} = \frac{Q_1}{\frac{1}{b_1}} + \frac{Q_2}{\frac{1}{b_2}} = \frac{1}{b_1} + \frac{1}{b_2} = \frac{1}{b_m}$$

[٢٢-٣:١]

$$\text{أي أن:} \quad b_m = \frac{(b_1)(b_2)}{b_1 + b_2} \dots\dots$$

* ق أرمز العربي المناظر للرمز P الذي استخدم سابقاً .

ب أرمز المناظر لـ f

وَتَجَدُّرُ الْإِشَارَةُ إِلَى أَنَّ الْمُعَادَلَتَيْنِ [٢١-٣:١] وَ [٢٢-٣:١] تَنْطَبِقَانِ فَقَطَّ فِي حَالَةٍ كَوْنِ الْعَدَسَتَيْنِ مُتَلَاصِقَتَيْنِ؛ أَمَّا إِذَا كَانَتِ الْعَدَسَتَانِ غَيْرَ مُتَلَاصِقَتَيْنِ وَجَبَ اسْتِبْدَالُ الْمُعَادَلَتَيْنِ السَّابِقَتَيْنِ بِمُعَادَلَاتٍ أُخْرَى سَتُبَحِّثُ فِيهَا بَعْدُ.

التكبير Magnification

هُنَاكَ عِدَّةُ أَلْفَاظٍ مُتَمَاثِلَةٍ فِي الْمَعْنَى تُجْمَعُ غَالِباً مَعاً وَتُدْرَجُ تَحْتَ لَفْظِ التَّكْبِيرِ. وَنُفَصِّلُ هُنَا بِدَقَّةٍ بَيْنَ مَا يَلِي:

١ - التَّكْبِيرُ الزَّاوِيَّ angular magnification الذي يُسَمَّى أَيْضاً قُوَّةَ التَّكْبِيرِ power

magnifying: وَ يَرْبِطُ هَذَا الْمَفْهُومَ بَيْنَ حَجْمِ الْجِسْمِ الظَّاهِرِيِّ عِنْدَ النَّظَرِ إِلَيْهِ عَبْرَ آلَةٍ بَصَرِيَّةٍ وَحَجْمِهِ الزَّاوِيَّ عِنْدَ النَّظَرِ إِلَيْهِ مِنْ دُونِ الْآلَةِ تِلْكَ (الشَّكْل ١٤)؛ وَبِعِبَارَةٍ أُخْرَى يُمَكِّنُ تَعْرِيفَ التَّكْبِيرِ الزَّاوِيَّ بِنِسْبَةِ الْحَجْمِ الزَّاوِيَّ لَصُورَةِ الْجِسْمِ إِلَى الْحَجْمِ الزَّاوِيَّ لِلْجِسْمِ. وَهَذَا التَّعْرِيفُ يُوضِّحُ لَنَا سَبَبَ تَسْمِيَةِ تِلْكَ النَّسْبَةِ أحياناً بِنِسْبَةِ التَّجْمِيعِ Convergence ratio.

وَيُحَدِّدُ الْحَجْمُ الزَّاوِيَّ لِلصُّورَةِ بِالمَسَافَةِ الَّتِي تَظْهَرُ فِيهَا الصُّورَةُ لِلْعَيْنِ. وَ يُمَكِّنُ اعْتِبَارُ أَقْرَبِ نَقْطَةِ تَشَكُّيفٍ لَهَا الْعَيْنُ لِلرُّؤْيَةِ الْوَاضِحَةِ، (رُغْمَ أَنَّهَا تَخْتَلِفُ بِاخْتِلَافِ الْأَشْخَاصِ)، النُّقْطَةِ الَّتِي تَقَعُ عَلَى بُعْدِ ٢٥ سَمِ أَمَامَ الْعَيْنِ.

وَتُسَمَّى هَذِهِ النُّقْطَةُ النُّقْطَةُ الْقَرِيبَةُ الْمِيعَارِيَّةُ، وَأَمَّا بُعْدُهَا فَيُعْرَفُ بِبُعْدِ الرُّؤْيَةِ الْأَكْثَرِ وَضُوحاً distance of most distinct vision. وَإِذَا مَا وُضِعَتِ عَدْسَةٌ مُجَمَّعَةٌ أَوْ مَكْبَرٌ قَرِيباً مِنَ الْعَيْنِ، فَإِنَّ بُعْدَ الرُّؤْيَةِ الْأَكْثَرِ وَضُوحاً يَقِلُّ كَمَا تَبْدُو الصُّورَةُ أَكْثَرَ تَكْبِيراً.



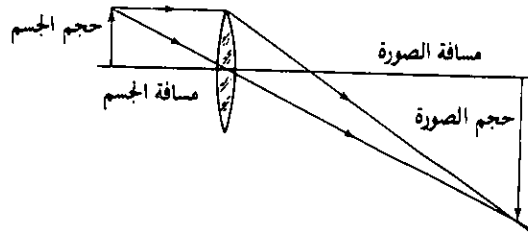
الشكل ١٤: التكبير الزاوي

٢ - التَّكْبِيرُ الخَطِّي العَرَضِيّ Transverse linear magnification و يُوضَّحُهُ الشَّكْلُ ١٥ ؛
ولأنَّ المُثَلَّثَاتِ على جانبيِّ العَدْسَةِ مُتَّشَابِهَةٌ ، فإنَّ التَّكْبِيرَ الخَطِّيَّ العَرَضِيَّ يَسَاوِي :

$$ت ح = \frac{\text{حجم الصورة}}{\text{حجم الجسم}} = \frac{\text{مسافة الصورة}}{\text{مسافة الجسم}}$$

أَيُّ: - $\boxed{\frac{ح ص}{ح ج} = \frac{ف ص}{ف ج}}$ [١ : ٣ - ٢٣]

وإذا كَانَ بُعْدُ الجِسْمِ عن العَدْسَةِ أَكْبَرَ من ضِعْفِ بُعْدِهَا البُؤْرِيِّ ، فإنَّ الصَّوْرَةَ سَتَكُونُ مُصَغَّرَةً ؛ أمَّا إذا أَقْتَرَبَ الجِسْمُ من العَدْسَةِ ، فإنَّ الصَّوْرَةَ تَكُونُ مُكَبَّرَةً .



الشَّكْل ١٥ : التَّكْبِيرُ الخَطِّي العَرَضِيّ

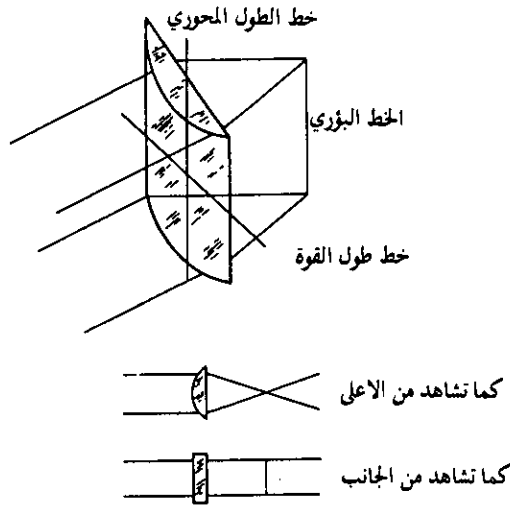
٣ - التَّكْبِيرُ الطَّوْلِيّ longitudinal magnification : ويُشِيرُ إلى أبعادِ الجِسْمِ التي تُقَاسُ في اتَّجَاهِ المِخْوَرِ البَصْرِيِّ وَلَيْسَ المتعامِدَةَ عليه . ومن المُشِيرِ أَنْ يُلَاحِظَ المرءُ أَنَّ التَّكْبِيرَ الطَّوْلِيَّ يَتَغَيَّرُ وَفْقَ دَالَّةٍ تَرْبِيعِيَّةٍ quadratic function ، بينما يَتَغَيَّرُ التَّكْبِيرُ العَرَضِيُّ وَفْقَ دَالَّةٍ خَطِّيَّةٍ ، الأمرُ الَّذِي يُسَهِّلُ عَلَيْنَا أَنْ نَعْرِفَ من الصَّوْرَةِ الفوتوغَرَفِيَّةِ فيما إذا كَانَتِ الصَّوْرَةُ قَدْ أُخِذَتْ بِعَدْسَةٍ ذاتِ بُعْدِ بُؤْرِيٍّ طَوِيلٍ أَوْ قَصِيرٍ ؛ ولذا فَفي الصَّوْرَةِ الوَجْهِيَّةِ المُبَاشِرَةِ التي تُؤْخَذُ بِعَدْسَةٍ تَلْفَوْتِيَّةٍ مَقْرَبَةٍ telephoto لا تَبْرُزُ الأنْفُ كَثِيرًا .

• ف ص ينظر الرمز i ، ف ج ينظر الرمز o .

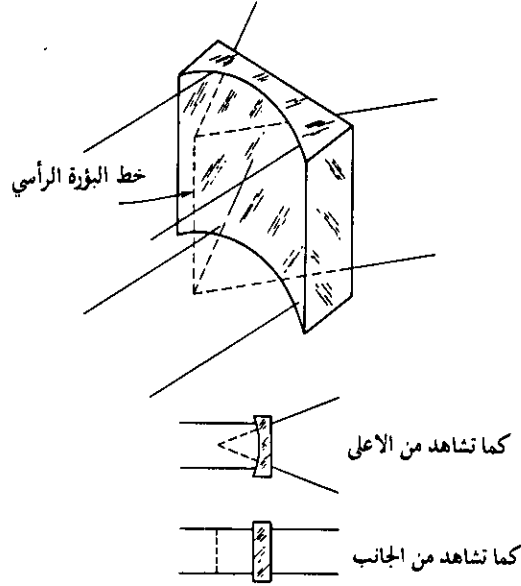
و يُعرَّفُ عُمُقُ الرُّؤية الواضحة أو عُمُقُ التركيزِ لآلةٍ بصريةٍ بأنَّه الفارقُ في مَوْقعِ البُؤرة الذي يُمكنُ التَّساهُلُ فيه أو التَّسامُحُ به من دونِ الهُبوطِ بِنوعِيَّةِ الصُّورةِ بِشكْلِ غيرِ معقولٍ ؛ ومَعَ أنَّ الهُبوطَ غَيْرَ «المَعقول» يُعرَّفُ جُزْأً، إلا أنَّه يُمكنُ تحديدهُ عُمُقُ الرُّؤية الواضحة المناظِرِ لَهُ عِنْدَ الأخذِ بِعَيْنِ الاعتبارِ قُطرَ العدسةِ وبعدها البُؤريَّ . أما عُمُقُ المجالِ of field depth فَهُوَ مَدَى المسافاتِ في فِراغِ الجِسْمِ الذي يُناظِرُ إزاحةً في الصُّورةِ تَبْلُغُ في مِقْدَارِها مَدَى «عُمُقِ الرُّؤية الواضحة» depth of focus .

العدسات الاسطوانية Cylinder Lenses

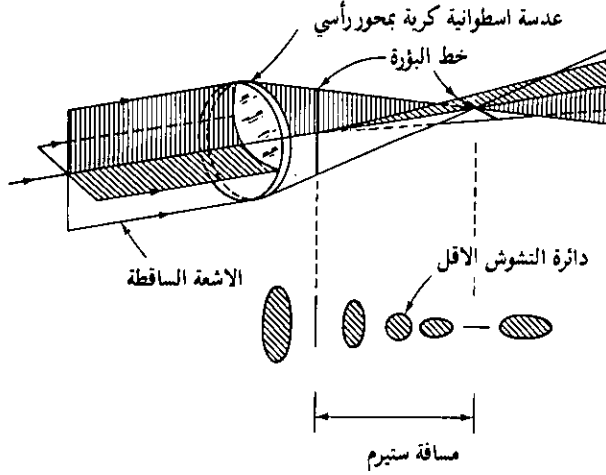
في أَلْعَدَسَةِ الأُسْطَوَانِيَّةِ ، يَكُونُ عَادَةً أَحَدُ السَّطْحَيْنِ جُزْءاً من أُسْطَوَانَةٍ بَيْنَمَا يَكُونُ السَّطْحُ الأُخَرُ مُستَوياً أو كُرِّيَّاً . لِئَاخُذَ عَدَسَةً أُسْطَوَانِيَّةً من النُّوعِ المُستوي المُحْدَبِ كما في الشَّكْلِ ١٦ ؛ فَعِنْدَمَا يَسْقُطُ ضَوْءٌ مُتَوَازٍ على العَدَسَةِ فَإِنَّهُ يَتَجَمَّعُ في خَطٍّ بُؤْرِيٍّ بَدَلِ تَجَمُّعِهِ في بُؤْرَةٍ كما هُوَ الحالُ في العَدَسَةِ العاديَّةِ .



الشكل ١٦ : عدسة اسطوانية مستوية محدبة



الشكل ١٧ : العدسة الاسطوانية المستوية المقعرة



الشكل ١٨ : العدسة الاسطوانية الكرية (خط الطول المحوري واقع في مستوى الرسم)، الخطوط البؤرية، ومسافة ستيرم.

وَيُمْكِنُنا تَمْيِيزُ خَطِّي طَوِيلٍ مُتَعَامِدَيْنِ عَلَى الْمِخْوَرِ الْبَصَرِيِّ : خَطَّ الطَوِيلِ الْمِخْوَرِيِّ الَّذِي لَا يَخْدُثُ عِنْدَهُ أَيُّ انْكِسَارٍ، وَخَطَّ طَوِيلِ الْقُوَّةِ الَّذِي يَخْدُثُ عِنْدَهُ أَكْبَرُ انْكِسَارٍ مُمَكِنٍ . إِنَّ عَمَلَ الْعَدْسَةِ الْأَسْطَوَانِيَّةِ الْمُسْتَوِيَةِ الْمَحْدَبَةِ يُشَبَّهُ تَمَامًا عَمَلَ الْعَدْسَةِ الْمُفَرَّقَةِ (الشكل ١٧) . أَمَّا فِي الْعَدْسَةِ الْأَسْطَوَانِيَّةِ الْكُرِّيَّةِ أَوِ الْعَدْسَةِ الْأَسْطَوَانِيَّةِ الْمُركَّبَةِ ، حَيْثُ

يكون أحد السطحين كُرِيًّا وَالْآخَرُ أُسْطَوَانِيًّا، فَإِنَّ الصُّورَةَ الَّتِي تُسْقِطُهَا لِحْجَمٌ نُقْطِيٌّ عِبَارَةٌ عَنْ شَكْلِ بُؤْرِيٍّ مُجَسِّمٍ وَمُعَقَّدٍ يُعْرَفُ بِحِجَمِ سْتِيرْمِ المخروطاني Sturm's Conoid . وَيُظْهِرُ الشَّكْلُ ١٨ بَعْضَ المَقَاتِيعِ العَرْضِيَّةِ لِحِجَمِ سْتِيرْمِ المخروطاني؛ وَتُسَمَّى المَسَافَةُ بَيْنَ الخَطَّيْنِ البُؤْرِيَّيْنِ المُتَطَرِّفَيْنِ بِمَسَافَةِ سْتِيرْمِ . وَعِنْدَمَا يَكُونُ الحِجَمُ فِي مَا لَا نِهَآيَةَ فَإِنَّ مَسَافَةَ سْتِيرْمِ تُسَاوِي الفَارَقَ بَيْنَ البُعْدَيْنِ البُؤْرِيَّيْنِ لِلْعَدْسَةِ؛ أَمَّا إِذَا كَانَ الحِجَمُ عَلَى مَسَافَةٍ مَحْدُودَةٍ، فَإِنَّ مَسَافَةَ سْتِيرْمِ تُسَاوِي الفَارَقَ بَيْنَ مَسَافَتَيْ الصُّورَتَيْنِ . وَيُسَمَّى المَقْطَعُ العَرْضِيُّ الدَّائِرِيُّ الوحيدُ لِحِجَمِ سْتِيرْمِ المخروطاني بِدَائِرَةِ «التَّشْوِشِ الأَقْل» circle of least confusion .

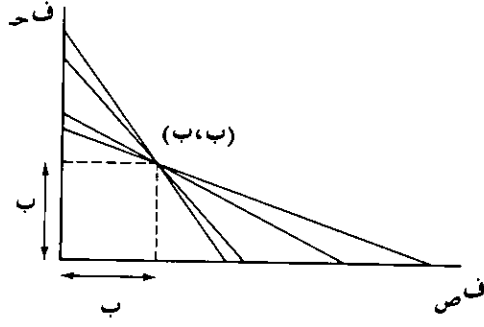
تَعْيِينُ البَعْدِ البُؤْرِيِّ لِلْعَدْسَةِ

١ - إِنَّ إِخْدَى الطَّرَائِقِ لِتَحْدِيدِ البُعْدِ البُؤْرِيِّ لِلْعَدْسَةِ مُجْمَعَةٌ هِيَ تَعْدِيلُ الْعَدْسَةِ لِأَخِذِ صُورَةٍ وَاضِحَةٍ لِحِجَمٍ بَعِيدٍ، ثُمَّ قِيَاسِ مَسَافَةِ الصُّورَةِ، إِذْ أَنَّ مَسَافَةَ الصُّورَةِ هَذِهِ تُسَاوِي البُعْدَ البُؤْرِيَّ لِلْعَدْسَةِ .

٢ - وَفِي حَالَةٍ كَوْنِ الحِجَمِ قَرِيبًا، نَجِدُ مَسَافَةَ الصُّورَةِ وَمَسَافَةَ الحِجَمِ، ثُمَّ نَسْتَخْدِمُ مَعَادَلَةَ الْعَدْسَةِ الرَقِيقَةِ - صِيغَةُ جَاوَسِ $\left(\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o} \right)$ * لِحِسَابِ البُعْدِ البُؤْرِيِّ

لِلْعَدْسَةِ . وَعِنْدَ رَسْمِ مَسَافَاتِ الحِجَمِ عَلَى المِحْوَرِ الصَّادِي وَتَمَثِيلِ مَسَافَاتِ الصُّورَةِ الْمُنَاطِرَةِ عَلَى المِحْوَرِ السِّينِيِّ، فَإِنَّ المَرَّةَ يَحْصُلُ عَلَى الخُطُوطِ المُبَيِّنَةِ فِي الشَّكْلِ ١٩ . وَلَآنَ مَسَافَةَ الحِجَمِ وَمَسَافَةَ الصُّورَةِ يُمْكِنُ إِبْدَالُهُمَا ، فَإِنَّ القِيَاسَ الْوَاحِدَ يُعْطِي خَطَّيْنِ . وَيُلاحِظُ أَنَّ جَمِيعَ تِلْكَ الخُطُوطِ تَتَقَاطَعُ فِي نُقْطَةٍ وَاحِدَةٍ إِحْدَاثِيَّاهَا (ب، ب)، حَيْثُ ب البُعْدُ البُؤْرِيُّ لِلْعَدْسَةِ (ص=س=ب) .

* ظَهَرَتْ هَذِهِ الْمَعَادَلَةُ فِي الصُّورَةِ $\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o}$.



الشكل ١٩ : العلاقة بين مسافة الجسم f_v ومسافة الصورة f_h

٣ - إنَّ طريقة البُؤر المترافقة لبِسل Bessel طريقة أكثر دقةً لِتعيين البُعد البُؤريّ لعدسة .
ووفقَ هذه الطَّريقة، يوضعُ الجسمُ بحيثُ يكونُ بُعدهُ عن السَّتارة التي تَسْتَقْبِلُ
الصُّورة أكبرَ من أربعة أضعاف البُعد البُؤري . وعندَ تحريك العدسة في اتجاه المِحوَرِ
إلى الأمام وإلى الخلف، فإنَّ الصُّورة تكونُ واضحةً في وَضعين من أوضاع العدسة .
وفي أحَد هَذَيْنِ الوُضعين تكونُ الصُّورة مكبَّرةً، بينما تكونُ مصغرةً في الوُضع الآخر.
ومن الشَّكل ٢٠ نَجِدُ أنَّ :

$f_v + f_h = L$ ، $f_v + f_h = L$ ، حيث f_v ، f_h تُشيران إلى
مسافتَي الجسم والصُّورة في الوُضع الآخر. ولأنَّ الوُضعين مُتماثلان، فإنَّ :

$$f_v = f_h$$

$$f_v = f_h$$

ومن الرَّسْم نَجِدُ أنَّ :-

$$f_v + d + f_h = L$$

ومن ثَمَّ يكونُ :

$$2f_v = L$$

$$\text{أي: } \underline{f} = \frac{d - l}{2}$$

كذلك فإن: -

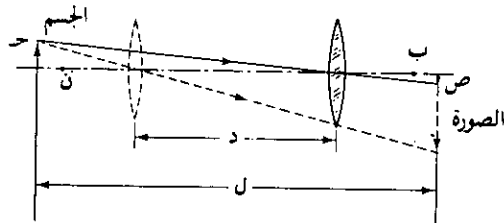
$$f_v = d + \underline{f} = d + \frac{1}{2}(d - l)$$

$$\text{أي: } f_v = \frac{d + l}{2}$$

وبالتعويض في مُعادلة العدسة الرقيقة: ب = $\frac{\underline{f} \cdot f_v}{\underline{f} + f_v}$ ،

نحصلُ على: -

$$[1:3-24] \dots \frac{l^2 - d^2}{4l} = \frac{\frac{(d+l)}{2} \cdot \frac{(d-l)}{2}}{\frac{(d+l)}{2} + \frac{(d-l)}{2}} = b$$



الشكل ٢٠: طريقة بيل لتعيين البعد البؤري

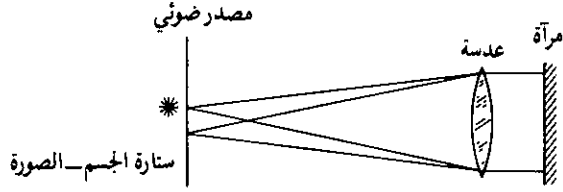
٤ - وَمِنَ الطَّرَائِفِ الأُخْرَى لِتَعْيِينِ البُعْدِ البُؤْرِيِّ طَرِيقَةُ التَّسْدِيدِ الذَّاتِي

autocollimation. فكَما في الشَّكْلِ ٢١، يَوْضَعُ مَصْدَرُ الضَّوِّ والِسْتَارَةُ في مَكَانٍ

وَاحِدٍ عَلَى أَحَدِ طَرَفَيْ المُنْضَدَّةِ البَصْرِيَّةِ؛ كَمَا تَوْضَعُ العَدْسَةُ ومِرآةً مُسْتَوِيَةً في طَرَفِهَا

الآخِر. ثُمَّ يَتَمُّ تحريكُ العدسةِ إلى الأمامِ والخلفِ على المِحْوَرِ حَتَّى تَكُونَ الصُّورَةُ

الظاهرة على الستارة أوضح ما يُمكن . وفي ذلك الوضع تكون المسافة بين العدسة والستارة (حيث يوجد الجسم) مساوية للبعد البؤري للعدسة .



الشكل ٢١: تعيين البعد البؤري لعدسة مجمعة بطريقة التسديد الذاتي

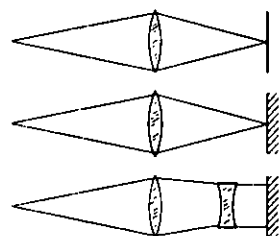
٥ - ويمكنُ تعيينُ البعدُ البؤريُّ لعدسةٍ مُجمَّعةٍ بالتَّكْبِيرِ العَرَضِيِّ الَّذِي تُحْدِثُهُ . وفي هذه الطريقة يتمُّ تكوينُ صورةٍ لِجِسْمٍ ما على سِتارةٍ ، وتُجْعَلُ مسافةُ الجِسْمِ أَكْبَرَ بَقَلِيلٍ مِنْ مسافةِ الصورةِ . ثُمَّ تُقَاسُ مسافةُ الجِسْمِ (ف) ، حَجْمُ الجِسْمِ (ح) ، وَحَجْمُ الصورةِ ح ص . ولما كانَ التَّكْبِيرُ $\frac{ف}{ح}$ ، فإنه يُمكنُ إيجادَ ف ص . وباستخدامِ معادلةِ

العدسةِ الرقيقة - صيغة جاورس يُمكنُ الحصولُ على قيمةِ البعدِ البؤريِّ (ب) :

$$ب = \frac{ف - ف ص}{ف + ف ص} = \frac{ف - ت}{ف + ت} = \frac{ت}{ت + ١} \dots [٢٥-٣:١]$$

٦ - ويمكنُ تعيينُ البعدِ البؤريِّ لعدسةٍ مُفَرَّقةٍ أيضاً بطريقةِ التَّسْدِيدِ الدَّائِي . ويوضَّحُ الشكلُ ٢٢ خطواتِ الطريقةِ اللازمةِ : أَسْتَخْدِمُ عدسَةً مَحْدَبَةً بُعْدها البؤريُّ أَقْصَرُ مِنَ البعدِ البؤريِّ للعدسةِ المُفَرَّقةِ ، ثُمَّ كَوِّنُ بالعدسةِ المُجمَّعةِ صورةً حَقِيقَةً لِمَصْدَرِ ضَوْئِيٍّ على سِتارةٍ (الرسم العلوي) بحيثُ تكونُ مسافةُ الجِسْمِ ضِعْفُ مسافةِ الصورةِ تَقْرِيباً . علَّمْ جَيِّدًا مَوْقِعَ الجِسْمِ ، العدسةِ ، والصورةِ ، ثُمَّ اسْتَعِضْ الآنَ عن الستارةِ بِمِرَاةٍ مُستَوِيَةٍ في مَوْضِعِهَا تماماً (الرسم الوسط) . ضَعِ العدسةَ المُفَرَّقةَ الآنَ بَيْنَ العدسةِ المُجمَّعةِ والمِرَاةِ المُستَوِيَةِ (الرسم السفلي) . إِنَّ الضَّوْءَ يَنْعَكِسُ الآنَ عَنِ المِرَاةِ

المُسْتَوِيَّة مَارًّا بِالْعَدْسَتَيْنِ وَمُكَوَّنًا صُورَةً حَقِيقَةً عَلَى السَّتَارَةِ قُرْبَ الْمَصْدَرِ الضَّوئِيِّ .
عَدَّلَ مَوْقِعَ الْعَدْسَةِ الْمَفْرَقَةِ لِتَحْصَلَ عَلَى أَوْضَحِ صُورَةٍ مُمْكِنَةٍ ، ثُمَّ قَسَّ الْمَسَافَةَ بَيْنَ
الْعَدْسَةِ الْمَفْرَقَةِ وَالْمَرَاةِ الْمُسْتَوِيَّةِ . فَهَذِهِ الْمَسَافَةُ تُسَاوِي الْبُعْدَ الْبُورِيَّ لِلْعَدْسَةِ الْمَفْرَقَةِ .



الشكل ٢٢ : قياس البعد
البوري لعدسة مفرقة بطريقة
التسديد الذاتي

المسائل

- ١-٣:١ تَبْلُغُ قُوَّةُ الْكَسْرِ لِسَطْحِ كَاسِيَرٍ مَنْفَرِدٍ - ٥,٠٠ ديوتر . فَإِذَا كَانَ الْوَسْطُ عَلَى أَحَدِ
جَانِبَيْ السَّطْحِ هَوَاءً ، وَعَلَى الْجَانِبِ الْآخَرِ مَادَّةٌ لَهَا مُعَامِلُ انْكَسَارٍ مُقَدَّارُهُ
١,٦٠ . فَجِدْ نِصْفَ قُطْرِ تَكْوِيرِ السَّطْحِ .
- ٢-٣:١ وَضِعَ جِسْمٌ عَلَى بُعْدِ ٢ سَمَ إِلَى يَسَارِ الظَّرْفِ الْمُحْدَبِ لِقَضِيبٍ زُجَاجِيٍّ نِصْفُ
قُطْرِ تَكْوِيرِهِ ١ سَمَ . فَإِذَا كَانَ مُعَامِلُ انْكَسَارِ الزُّجَاجِ ١,٥ ، فَجِدْ مَسَافَةَ الصُّورَةِ .
- ٣-٣:١ غُمِرَتْ كُرَّةٌ جَوْفَاءُ قُطْرُهَا ١٠ سَمَ فِي زَيْتٍ مُعَامِلُ انْكَسَارِهِ ١,٦٢ . جِدِ الْبُعْدَ
الْبُورِيَّ الثَّانِي لِسَطْحِ الْكُرَّةِ الْأَوَّلِ مُهْمَلًا سُمْكَ زُجَاجِ الْكُرَّةِ .
- ٤-٣:١ قَضِيبٌ أُسْطَوَانِيٌّ لَدُنْ (بَلَاسْتِيكِي) قُطْرُهُ ١٦ مَمَ وَمُعَامِلُ انْكَسَارِهِ ١,٤٦ .
صُقِّلَ أَحَدُ طَرَفَيْهِ فِي شَكْلِ نِصْفِ كُرَّةٍ . جِدْ : (أ) الْبُعْدَ الْبُورِيَّ لِلْقَضِيبِ
خَارِجَ الْبَلَاسْتِيكِ ، (ب) الْبُعْدَ الْبُورِيَّ لِلْقَضِيبِ دَاخِلَ الْبَلَاسْتِيكِ ، وَ (ج)
قُوَّةَ كَسْرِ السَّطْحِ نِصْفِ الْكَرِيِّ .
- ٥-٣:١ حَوْضٌ مَائِيٌّ كَبِيرٌ فِيهِ نَافِذَةٌ صَغِيرَةٌ فِي شَكْلِ سَطْحٍ كُرِّيٍّ قُطْرُهُ ٦ سَمَ وَجُرْؤُهَا
الْمُحْدَبُ إِلَى خَارِجِ الْحَوْضِ . وَضِعَ مَصْدَرُ ضَوْئِيٍّ عَلَى بُعْدِ ٣٠ سَمَ مِنَ النَافِذَةِ :
(أ) خَارِجَ الْحَوْضِ أَوَّلًا (ب) دَاخِلَ الْحَوْضِ ثَانِيًا . جِدْ مَسَافَةَ الصُّورَةِ فِي
الْحَالَتَيْنِ ، ثُمَّ بَيِّنْ نَوْعَ الصُّورَةِ الْمُتَكَوِّنَةِ : حَقِيقَةً أَمْ خَيَالِيَّةً ، وَهَلْ تَقَعُ دَاخِلَ
الْمَاءِ أَمْ خَارِجَهُ ؟
- ٦-٣:١ وَضِعْتَ سَمَكَةً ذَهَبِيَّةً وَشَطَّ تَجْوِيفٍ كُرِّيٍّ قُطْرُهُ ٤٠ سَمَ . جِدْ قُوَّةَ الْكَسْرِ
لِلْسَّطْحِ ، ثُمَّ بَيِّنْ أَتَيْنَ تَبْدُو السَّمَكَةُ لِمُشَاهِدٍ خَارِجَ التَّجْوِيفِ . أَهْمِلْ سُمْكَ
زُجَاجِ جِدَارِ التَّجْوِيفِ .

٧-٣:١ عَدَسَةٌ مَحْدَبَةٌ الْوَجْهَيْنِ نِصْفُ قَطْرِ تَكْوِيرٍ كُلٌّ مِنْ سَطْحَيْهَا ١٢ سَم وَقُوَّةُ كَسْرِهَا - ١٠,٠٠ دِيُوتَر. جِدْ مُعَامِلَ انْكِسَارِ مَادَّتِهَا .

٨-٣:١ عَدَسَةٌ مُحْدَبَةٌ مُسْتَوِيَةٌ بُعْدُهَا الْبُؤْرِيُّ + ١٦ سَم مَصْنُوعَةٌ مِنْ زُجَاجٍ مُعَامِلُ انْكِسَارِهِ ١,٥ . أَحْسَبْ نِصْفَ قَطْرِ تَكْوِيرِهَا .

٩-٣:١ وَضِعْ جِسْمٌ عَلَى بُعْدِ ١,٥ م مِنْ سِتَارَةٍ . جِدِ الْبُعْدَ الْبُؤْرِيَّ (بِالْسَّنْمَتَاتِ) لِعَدَسَةٍ تَكُونُ صُورَةً حَقِيقِيَّةً مَقْلُوبَةً لَهُ وَمَكْبَرَةً ٥ مَرَّاتٍ .

١٠-٣:١ عَدَسَةٌ رَقِيقَةٌ مُعَامِلُ انْكِسَارِ مَادَّتِهَا ١,٥ ، وَبُعْدُهَا الْبُؤْرِيُّ ٢٠ سَم . فَإِذَا كَانَ نِصْفُ قَطْرِ تَكْوِيرِ سَطْحِهَا الْخَلْفِيِّ - ٨ سَم ، فَاحْسَبْ نِصْفَ قَطْرِ تَكْوِيرِ سَطْحِهَا الْأَمَامِيِّ .

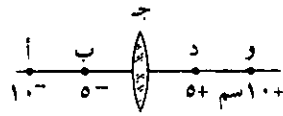
١١-٣:١ وَضَعْتَ عَدَسَةً عَلَى بُعْدِ مِترٍ وَاحِدٍ مِنْ جِسْمٍ ، فَكَوْنَتْ لَهُ صُورَةٌ حَقِيقِيَّةٌ عَلَى بُعْدِ مِثْرَيْنِ مِنْهَا . جِدِ قُوَّةَ الْكَسْرِ لِلْعَدَسَةِ بِاسْتِخْدَامِ طَرِيقَةِ الْإِمَالَةِ .

١٢-٣:١ وَضِعْ جِسْمٌ عَلَى بُعْدِ ٣٠ سَم مِنْ عَدَسَةٍ بُعْدُهَا الْبُؤْرِيُّ + ١٠ سَم . جِدِ مَسَافَةَ الصُّورَةِ بِاسْتِخْدَامِ مُعَادَلَةِ الْعَدَسَةِ الرَقِيقَةِ : (أ) صِغَةً جَاوِسَ (ب) صِغَةً نِيُوتِن .

١٣-٣:١ عَدَسَةٌ مُجَمَّعَةٌ مُعَامِلُ انْكِسَارِهَا ١,٥ ، وَبُعْدُهَا الْبُؤْرِيُّ ٥ سَم . جِدِ بُعْدُهَا الْبُؤْرِيَّ عِنْدَ غَمْرِهَا فِي الْمَاءِ .

١٤-٣:١ عَدَسَةٌ رَقِيقَةٌ مَحْدَبَةٌ الْوَجْهَيْنِ : مُعَامِلُ انْكِسَارِ مَادَّتِهَا ١,٥ ، وَبُعْدُهَا الْبُؤْرِيُّ فِي الْهَوَاءِ ٢٠ سَم ؛ وَعِنْدَ غَمْرِهَا فِي سَائِلٍ مَا وَجِدَ أَنَّ بُعْدُهَا الْبُؤْرِيَّ يُسَاوِي ٦٠ سَم . جِدِ مُعَامِلَ انْكِسَارِ السَّائِلِ .

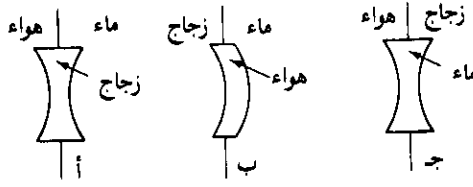
١٥-٣:١ فِي الشَّكْلِ ٢٣ : أَلْبَعْدُ الْبُؤْرِيُّ لِلْعَدَسَةِ ٥ سَم . قُرْبَ أَيِّ النِّقَاطِ تَتَكَوَّنُ الصُّورَةُ فِي الْحَالَاتِ التَّالِيَةِ :



الشكل ٢٣

- (أ) الجِسْمُ مَوْضُوعٌ فِي النُّقْطَةِ أ.
 (ب) الجِسْمُ مَوْضُوعٌ فِي مَالَا نِهَآيَةِ إِلَى الْيَسَارِ.
 (ج) الجِسْمُ مَوْضُوعٌ بَيْنَ ب وَ ج.
 (د) الجِسْمُ مَوْضُوعٌ فِي وَ
 (هـ) الجِسْمُ مَوْضُوعٌ فِي ب

١٦-٣:١ لِيَتَعَرَّفَ نَفْسُكَ بِأَصْطِلَاحَاتِ الْأَشَارَاتِ الْمُسْتَعْمَلَةِ فِي هَذَا الْكِتَابِ، يَبَيِّنُ إِذَا كَانَ سَطْحًا كُلٌّ مِنَ الْعَدَسَاتِ أ، ب، ج، د، فِي الشَّكْلِ ٢٤ مُحَدِّثِينَ أَمْ مَقْعَرِينَ. يَبَيِّنُ أَيْضًا إِشَارَةَ الْبُعْدِ الْبُورِيَّ (+ أَوْ -) لِلْسَّطْحَيْنِ مُتَفَصِّلِينَ وَلِلْعَدْسَةِ فِي كُلِّ حَالَةٍ. وَأَخِيرًا أَرْسَمَ شَكْلًا يُبَيِّنُ كَيْفَ يَنْكَسِرُ الضَّوُّ الْمُتَوَازِي السَّاقِطُ عَلَى الْعَدْسَةِ وَكَيْفَ يَخْرُجُ مِنْهَا



الشكل ٢٤

- ١٧-٣:١ وَضَعَ جِسْمٌ فِي نَقْطَةِ مِحْوَرِيَّةٍ عَلَى بُعْدِ ٢٥ سَم إِلَى يَسَارِ عَدْسَةٍ رَقِيقَةٍ: قُوَّةُ كَسْرِهَا +١٠,٠٠ م-١. وَيَعْمَلُ شُعَاعٌ ضَوْئِيٌّ صَادِرٌ مِنَ الْجِسْمِ زَاوِيَةً ١٠ مَعَ الْمِحْوَرِ. جِدِ النُّقْطَةَ الَّتِي يَقْطَعُ عِنْدَهَا ذَلِكَ الشَّعَاعُ الْمِحْوَرِ بَعْدَ انْكَسَارِهِ.
- ١٨-٣:١ عَدْسَةٌ مَجْمَعَةٌ بُعْدُهَا الْبُورِيُّ ٢٠ سَم. افْتَرِضْ أَنَّ جِسْمًا وَضِعَ عَلَى مَسَافَاتٍ مُتَفَاوِتَةٍ مِنَ الْعَدْسَةِ: ١٠ سَم، ٢٠ سَم، ٣٠ سَم. جِدْ مَسَافَاتِ الصُّورَةِ الْمُنَاطَرَةِ، وَأَرْسَمِ الْمُنْحَنَى الَّذِي يُوَضِّحُ الْعِلَاقَةَ بَيْنَ مَسَافَةِ الصُّورَةِ وَمَسَافَةِ الْجِسْمِ. وَبِاسْتِخْدَامِ الْبَيَانَاتِ نَفْسِهَا، أَرْسَمِ الْمُنْحَنَى الَّذِي يُبَيِّنُ عِلَاقَةَ التَّكْبِيرِ الْخَطِّيِّ الْعَرَضِيِّ بِمَسَافَةِ الْجِسْمِ.

١٩-٣:١ أَلْمَسَافَةُ بَيْنَ مَوْضِعِ الصُّورَةِ عِنْدَمَا يَكُونُ الْجِسْمُ فِي مَالَا نِهَائِيَّةٍ وَمَوْضِعِهَا عِنْدَمَا يَكُونُ الْجِسْمُ عَلَى بُعْدِ ٢, ٥ م مِنَ الْبُورَةِ الْأُولَى (جِهَةُ الْجِسْمِ) لِعَدْسَةٍ مُحَدَّبَةٍ تُسَاوِي ٨ سَم.

جِدِ الْبُعْدَ الْبُورِيَّ لِلْعَدْسَةِ.

٢٠-٣:١ يَبْلُغُ الْبُعْدُ الْبُورِيُّ لِلْعَدْسَةِ الشَّيْئِيَّةِ Objective lens فِي كَامِيرَا تَصْوِيرٍ ٥٠ مَم؛ كَمَا يَبْلُغُ نِصْفُ قُطْرِ تَكْوُّرِ السَّطْحِ الْأَمَامِيِّ الْمُحَدَّبِ لِلْعَدْسَةِ ٢٠٠ مَم. أَرَادَ غَوَاصٌّ أَنْ يَأْخُذَ الْكَامِيرَا مِنْ دُونِ غِلَافِهَا الْحَامِي تَحْتَ الْمَاءِ، بِحَيْثُ يُلَاقِ الْمَاءَ السَّطْحَ الْأَمَامِيَّ لِلْعَدْسَةِ مِنْ دُونِ التَّنَاقُذِ إِلَى دَاخِلِ الْكَامِيرَا. فَإِذَا أَرَادَ الْغَوَاصُّ أَخْذَ صُورَةٍ لَجِسْمٍ عَلَى بُعْدٍ مَتَرَيْنِ، فَمَا الْمَسَافَةُ الَّتِي يَنْبَغِي أَنْ يُكَتِّفَ فَلَمْ هَا لِأَخْذِ صُورَةٍ وَاضِحَةٍ لِلْجِسْمِ.

الفصل ١ : ٤

الرَّسْمُ الشعاعي *

Ray Tracing

يَعْنِي الرَّسْمُ الشعاعيُّ تَتَبُّعَ مَسَارِ الشعاعِ الضَّوئِيِّ عِبْرَ المنظومةِ البَصَرِيَّةِ ، وَتَطْبِيقَ قَانُونِي الانكسارِ فِي كُلِّ مَرَّةٍ يَتَقاطَعُ فِيهَا الشعاعُ مَعَ السَّطْحِ . وَنُمَيِّزُ هُنَا فِئَتَيْنِ مِنَ الأشعةِ :

١ - الأشعةُ مِثْلَ خُطوطِ الطولِ أَوْ الأشعةِ الزَّوَالِيَّةِ Meridional rays : وَهِيَ الأشعةُ الَّتِي تَقْطَعُ المِحْوَرَّ البَصَرِيَّ مَرَّةً أَوْ مَرَاراً ؛ وَتَقَعُ لَذَلِكَ فِي مُسْتَوًى يَتَحَدَّدُ بِأَيَّةِ قِطْعَةٍ مِنَ الشعاعِ وَبِمِحْوَرِّ المَجْمُوعَةِ البَصَرِيَّةِ . إِنَّ رَسْمَ الشعاعِ الزَّوَالِيِّ أَمْرٌ سَهْلٌ بِالمُقَارَنَةِ (نَسْباً) لِأَنَّ المَسْأَلَةَ مَسْأَلَةً فِي المِثْلثَاتِ المُسْتَوِيَّةِ .

٢ - الأشعةُ الَّتِي لَا تَقْطَعُ المِحْوَرَّ قَبْلَ الانعكاسِ أَوْ الانكسارِ أَوْ بَعْدَهُمَا ، وَتُسَمَّى هَذِهِ الأشعةُ المُلْتَوِيَّةُ Skew rays . إِنَّ القِطْعَةَ المُسْتَقِيمَةَ الْمُخْتَلِفَةَ مِنْ هَذِهِ الأشعةِ لَا تَقَعُ فِي مُسْتَوًى وَاحِدٍ ؛ وَلِذَا فَإِنَّ رَسْمَ الشعاعِ المُلْتَوِي مَسْأَلَةً فِي المِثْلثَاتِ الفَرَاغِيَّةِ Solid trigonometry تَتَطَلَّبُ وَقْتاً أَطْوَلَ مِنْ رَسْمِ الأشعةِ الزَّوَالِيَّةِ ، الأَمْرُ الَّذِي جَعَلَ رَسْمَ الأشعةِ ، قَبْلَ ظَهْوَرِ الحَاسِبَاتِ الإِلِكْتَرُونِيَّةِ السَّرِيعَةِ ، مَقْصُوراً عَلَى الأشعةِ الزَّوَالِيَّةِ .

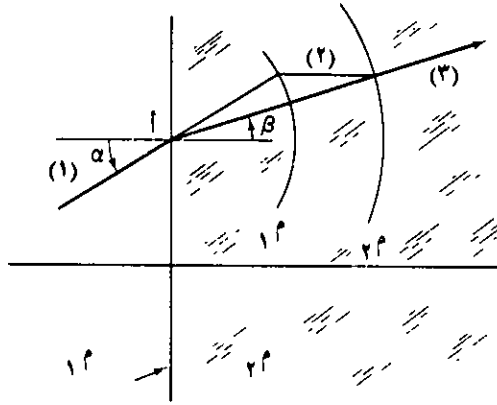
الرَّسْمُ الشعاعيُّ عِبْرَ سَطْحٍ مُسْتَوٍ

إِنَّ الضَّوْءَ السَّاقِطَ بِزَاوِيَةِ سُقُوطٍ α عَلَى سَطْحٍ مُسْتَوٍ فَاصِلٍ بَيْنَ وَسْطَيْنِ : خَفِيفٍ وَكَثِيفٍ يَنْكَسِرُ مُقْتَرِباً مِنَ العَمُودِ الْمُقَامِ عَلَى السَّطْحِ عِنْدَ نُقْطَةِ السُّقُوطِ . وَهَكَذَا عِنْدَمَا

• الرَّسْمُ بالأشعةِ

يَكُونُ $m_1 > m_2$ ، نَحْصَلُ مِنْ قَانُونِ سَنِلِ فِي الْإِنْكَسَارِ (جَا α / جَا $\beta = \frac{m_2}{m_1}$) عَلَى أَنَّ زَاوِيَةَ الْإِنْكَسَارِ أَقْلُ مِنْ زَاوِيَةِ السُّقُوطِ ، أَيْ أَنَّ $\alpha > \beta$.

وَلِتَتَّبِعْ مَسَارَ شُعَاعٍ عَبْرَ سَطْحٍ مُسْتَوٍ نَسْتَخْدِمُ طَرِيقَةَ الشُّعَاعِ الْمُوَازِي method Parallel-ray (الشكل ١) . إِنَّ الشُّعَاعَ السَّاقِطَ (١) يَقْطَعُ السَّطْحَ عِنْدَ النُّقْطَةِ أ . أَرْسُمْ قَوْسَيْنِ مِنَ النُّقْطَةِ أ: نِصْفَا قُطْرَيْهِمَا مُتَنَاسِبَانِ مَعَ m_1 ، m_2 ، ثُمَّ مَدِّ الْخَطَّ (١) حَتَّى يَقْطَعَ الْقَوْسَ m_1 ، وَ مَدِّ الْخَطَّ (٢) الْعَمُودِيَّ عَلَى السَّطْحِ أَيْ الْمُوَازِيَّ لِلْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ حَتَّى يَقْطَعَ الْقَوْسَ m_2 . صِلْ بَعْدَ ذَلِكَ النُّقْطَةَ الْآخِرَةَ الْحَاصِلَةَ بِالنُّقْطَةِ أ ، وَ مَدِّ الْخَطَّ بَيْنَهُمَا (٣) إِلَى جِهَةِ الْيَمِينِ ، وَمِنْ قَانُونِ سَنِلِ نَتَبَيَّنُ أَنَّ الْخَطَّ (٣) هُوَ الشُّعَاعُ الْمُنْكَسِرُ .



الشكل ١: الرسم الشعاعي عبر سطح فاصل مستو ($m_1 > m_2$)

الرسم الشعاعي عبر سطح كُرِّي منفرد

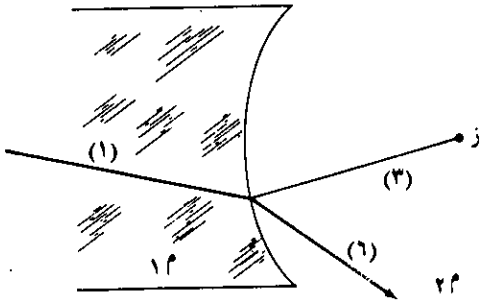
طريقة الشعاع الموازي

إِذَا كَانَ مُعَامِلَا انْكِسَارِ الْوَسْطَيْنِ عَلَى جَانِبِي السَّطْحِ الْفَاصِلِ مَعْرُوفَيْنِ ، وَكَذَلِكَ نِصْفُ قُطْرِ تَكْوِيرِ السَّطْحِ ، فَإِنَّا نَسْتَخْدِمُ طَرِيقَةَ الشُّعَاعِ الْمُوَازِي (الشكل ٢) . الشُّعَاعُ السَّاقِطُ هُوَ (١) ، أَيْ نَقْطَةُ التَّقَاءِ الشُّعَاعِ السَّاقِطِ بِالسَّطْحِ ، الْقَوْسَانِ m_1 ، m_2 يُرْسَمَانِ مِنْ

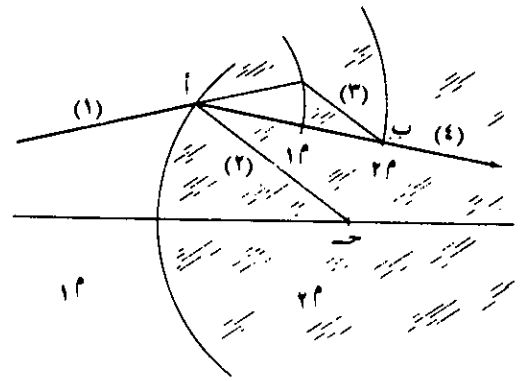
* m_1 ، m_2 هُمَا مُعَامِلَا انْكِسَارِ الْوَسْطَيْنِ ؛ وَ يُسْتَخْدَمَانِ هُنَا بَدْلًا مِنْ n_1 ، n_2 .

أ، والشعاع (١) يمتد حتى يقطع القوس م. أما الخط (٢) فلا يرسم موازياً للمحور، ولكنّه، كما في الشكل ١، يرسم عمودياً على السطح الفاصل عند النقطة أ؛ فهو بذلك نصف قطر يصل النقطة أ بمركز التكوّن (ن). يرسم الآن الخط (٣) موازياً للخط (٢). إن رسم الخطوط المتوازية يسهل كثيراً عند استخدام آلة الرسم. الخط (٣) يقطع القوس م. في ب. توصّل ب بالنقطة أ، ويمدّ الخط الواصل إلى اليمين. فذلك الخط (٤) هو الشعاع المنكسر.

وإذا كان هنالك سطحان أو أكثر يراود تتبع مسار الأشعة عبرهما على التوالي، فإن الرسومات تصبح مزدحمة بالخطوط لوجود الأقواس م، م، م. وفي تلك الحالة، فإن من الأفضل رسم تلك الأقواس في شكل مساعد كما يتضح ذلك في الشكل ٣، حيث يمكن تتبع مسار الأشعة عبر سطح كروي مقعر. وفي المثال في الشكل ٣، الوسط (١) له معامل الانكسار الأكبر $n_1 < n_2$ ، الشعاع الساقط هو (١). يرسم الآن القوسان م، م، من نقطة ما «ن» بعيداً عن الرسم الأصلي؛ ثم يرسم (٢) موازياً لـ (١)، ويمدّ حتى يقطع القوس م. ثم يرسم نصف القطر (٣)، ويرسم الخط (٤) في الشكل المساعد موازياً للخط (٣). ومن نقطة تقاطع الخط (٤) بالقوس م، يرسم الخط (٥) الذي يصل نقطة التقاطع تلك بالنقطة ن، ثم يرسم أخيراً الخط (٦) موازياً للخط (٥)؛ ويكون الخط (٦) هو الشعاع المنكسر.



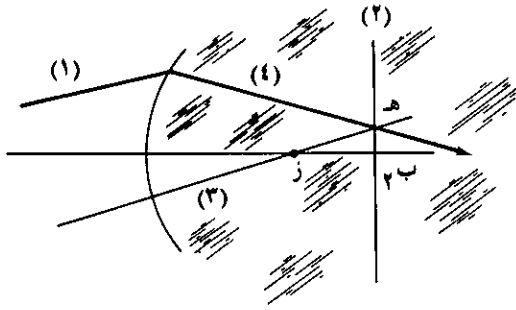
الشكل ٣: طريقة الشعاع الموازي باستخدام الشكل المساعد؛ $n_1 < n_2$.



الشكل ٢: طريقة الشعاع الموازي المبسطة لتتبع مسار الشعاع عبر سطح كروي: نق، م، م، م. نقطة؛ $n_1 > n_2$.

طريقة الشعاع المائل Oblique ray method

نستخدم طريقة الشعاع المائل (الشكل ٤) إذا عُرِفَ نصف قطر تكوّر السطح وبعده البؤري الثاني (الجهة اليمنى). وفي الشكل ٤، (١) هو الشعاع الساقط من جهة اليسار؛ (٢) يُمثّل المستوى البؤري المارّ بالبؤرة الثانية ب_٢؛ الخطّ (٣) يُرسمُ موازياً للخطّ (١) ومارّاً بمركز التكوّر (ز)، ثمّ يمدّد ليَقطَعَ الخطّ (٢) في نقطة هـ؛ الخطّ (٤) يصلُ بين النقطة هـ ونقطة السقوط، وهو يُمثّل الشعاع المنكسر. [ملاحظة: لما كان الخطان (١)، (٣) متوازيين، فإنّهما بعد الانكسار ينضمّان معاً في المستوى البؤري الثاني. وحقيقةً فإنّ الشعاع (١) سيَنكسرُ، أمّا الشعاع (٣) فلا يَنكسرُ؛ إذ أن الشعاع (٣) هو الشعاع الأساسي الذي يُعرّفُ بأنّه الشعاع الذي يَستمرُّ في خطّ مُستقيم. وفي حالة وجود سطح كاسرٍ واحدٍ فقط، فإنّ الشعاع الأساسي يمرُّ بمركز التكوّر. فإذا كانت هنالك عدّة أشعةٍ مُوازيةٍ كلّها للشعاعين (١) و (٣)، فإنّها سوف تلتقي في نقطةٍ واحدةٍ هي النقطة هـ].



الشكل ٤: طريقة الشعاع المائل لرسم الأشعة عبر سطح منفرد؛ نق، ب_٢ معطيان؛ $m > m_2$

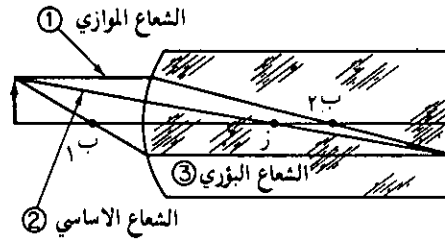
رسم الأشعة

إذا أعطينا جسماً بدّل أن نُعطى شعاعاً مُعيّناً، فمن الممكن إيجاد موقع الصورة بطريقةٍ مُماثلةٍ للطريقتين السابقتين اللتين تمّ تناوُلُهُما في حالة السطح الكروي (المِرآة الكرويّة). فكّما في الشكل ٥، يُرسم من أعلى نقطةٍ في الجسم ثلاثة أشعةٍ على التّحوّ التالي:-

١ - أشعاعُ المُوازي (1) وَهُوَ شُعاعٌ يُوازي المحورَ البَصريَّ، وَيمُرُّ بَعْدَ انْكِسارِهِ في البُؤرة الواقعة في جِهَةِ الصُّورة.

٢ - أشعاعُ الأساسيّ (2) الذي يُرسمُ ماراً بِمركزِ التَّكويرِ ولا يَنكسرُ أبداً.

٣ - أشعاعُ البُؤريُّ (3) الذي يَمُرُّ بالبُؤرة جِهَةِ الجِسمِ، وَينكسرُ مُوازيّاً للمُحورِ البَصريِّ.

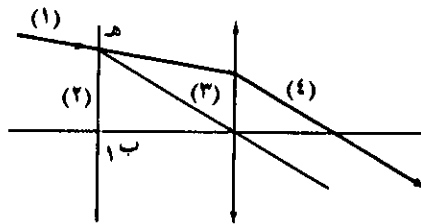


الشكل ٥: تعيين الأشعة المارة عبر سطح كروي منفرد.

الرَّسْمُ الشُّعاعيُّ عَبرَ عَدْسَةٍ رَقِيقَةٍ

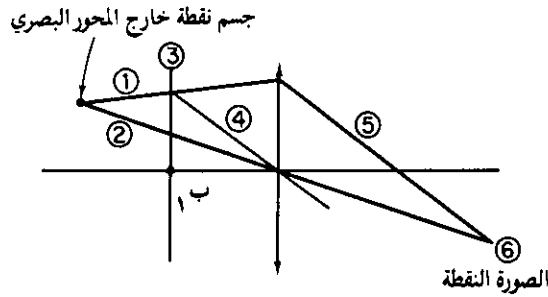
أَلْعَدْسَةُ الْمُجَمِّعَةُ Converging lens

تُمَثِّلُ العَدْسَةُ بِسَهْمٍ مُزدوج. فكَمَا في الشَّكْلِ ٦، افترض أَنَّ شُعاعاً زَوَالِيّاً سَقَطَ على عَدْسَةٍ، بُعْدُهَا البُؤريُّ مَعْرُوفٌ وَمُحَدَّدٌ بِمَوْقِعِ البُؤرة ب_١. مُدَّ الخَطِّ (١) حَتَّى يَقَطَعَ العَدْسَةَ، ثُمَّ ارْسُمِ المُستوى البُؤريَّ (٢) المارَّ بالبُؤرة ب_١. ومن نَقْطَةِ تقاطع (١) وَ (٢)، ارْسُمِ خَطّاً (٣) يَمُرُّ بِالمركزِ البَصريِّ لِلْعَدْسَةِ. إِنَّ الخَطَّ (٣) يُمَثِّلُ الشُّعاعَ الأساسيّ الذي هُوَ بالتَّعَرِيفِ الشُّعاعُ المارَّ بِالْعَدْسَةِ مِنْ دونِ انْجِرَافٍ. وأخيراً، ارْسُمِ الشُّعاعَ (٤) مُوازيّاً للشُّعاعِ (٣)؛ فيكونُ الشُّعاعُ (٤) هُوَ الشُّعاعُ المُنكسرُ المَطْلُوبُ.



الشكل ٦: الرَّسْمُ الشُّعاعيُّ عَبرَ عَدْسَةٍ مُجَمِّعَةٍ بِاسْتِخدامِ طَرِيقَةِ الشُّعاعِ المائِلِ؛ البعدُ البُؤريُّ ب_١ مَعْرُوفٌ.

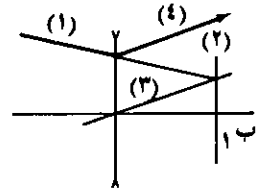
وَالآنَ عَوَضاً مِنْ أَسْتِخْدَامِ الشُّعَاعِ الْأَصْلِيِّ كَمَا فِي الشَّكْلِ ٦ ، أَسْتَحْدِمُ شُعَاعاً آخَرَ سَاقِطاً عَلَى الْعَدْسَةِ بِزَاوِيَةِ سُقُوطٍ مُخْتَلِفَةٍ . فَمَا دَامَ الشُّعَاعُ السَّاقِطُ يَمُرُّ بِالنَّقْطَةِ هـ ، فَإِنَّهُ يَخْرُجُ مِنَ الْعَدْسَةِ مُوَازِئاً لِلشُّعَاعِ الْأَسَاسِيِّ ، ذَلِكَ أَنَّ الضَّوْءَ الصَّادِرَ مِنَ النَّقْطَةِ هـ وَالوَاقِعَ فِي الْمَسْتَوَى الْبُورِيَّ بـ_١ يَخْرُجُ بَعْدَ انْكِسَارِهِ مُوَازِئاً لِلشُّعَاعِ الْأَسَاسِيِّ الَّذِي يُرْسَمُ مِنَ النَّقْطَةِ هـ . فَإِذَا كَانَ لَدَيْنَا جِسْمٌ (مِثْلُ نَقْطَةٍ) غَيْرُ وَاقِعٍ عَلَى الْمَحْوَرِّ الْبَصَرِيِّ عَوَضاً مِنَ الشُّعَاعِ الْمَأْخُوذِ ، فَإِنَّا بِحَاجَةٍ إِلَى شُعَاعَيْنِ صَادِرَيْنِ مِنَ ذَلِكَ الْجِسْمِ : أَحَدُهُمَا شُعَاعٌ اغْتِبَاطِيٌّ مِثْلُ (١) فِي الشَّكْلِ ٧ ، وَثَانِيَهُمَا الشُّعَاعُ (٢) الَّذِي يُمَكِّنُ لِلتَّبْسِيطِ أَنْ يَكُونَ الشُّعَاعُ الْأَسَاسِيُّ . أَسْتَمِرُّ الْآنَ فِي الرَّسْمِ ، كَمَا تُشِيرُ إِلَى ذَلِكَ أَرْقَامُ الْأَشْعَةِ .



الشكل ٧ : تحديد موقع صورة خارجية عن المحور البصري

العدسة المُفرِّقة Diverging Lens

قَدْ نَعْرِفُ مَوْقِعَ شُعَاعٍ مَا (١) وَأَتَجَاهَهُ وَالْبُعْدَ الْبُورِيَّ لِلْعَدْسَةِ (الشَّكْلِ ٨) . وَكَمَا ذُكِرَ سَالِفاً ، فَإِنَّ (٢) يُمَثِّلُ الْمَسْتَوَى الْبُورِيَّ الْأَوَّلَ ، أَيِ الَّذِي يَقَعُ إِلَى يَمِينِ الْعَدْسَةِ . مَدَّةُ (١) عَبْرَ الْعَدْسَةِ حَتَّى يَقْطَعَ (٢) ؛ ثُمَّ ارْسُمِ الشُّعَاعَ الْأَسَاسِيَّ (٣) بِوَضْعِهِ مَرَكِّزَ الْعَدْسَةِ بِنُقْطَةِ تَقَاطُعِ الْخَطَّيْنِ (١) وَ (٢) . ارْسُمِ الشُّعَاعَ (٤) مُوَازِئاً لِلشُّعَاعِ الْأَسَاسِيِّ ؛ فَالشُّعَاعُ (٤) هُوَ الشُّعَاعُ الْمُتَنَكِّسِرُ .



الشكل ٨ : الرسم الشعاعي عبر عدسة مفرقة

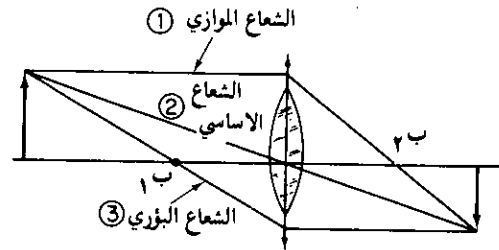
رَسْمُ الْأَشْعَةِ

إِذَا أُعْطِينَا جِسْماً ، وَلَمْ نُعْطَ شُعَاعاً مَا ، فَإِنَّا نَقُومُ كَمَا فِي السَّابِقِ بِرَسْمِ الشُّعَاعِ الْمَوَازِي

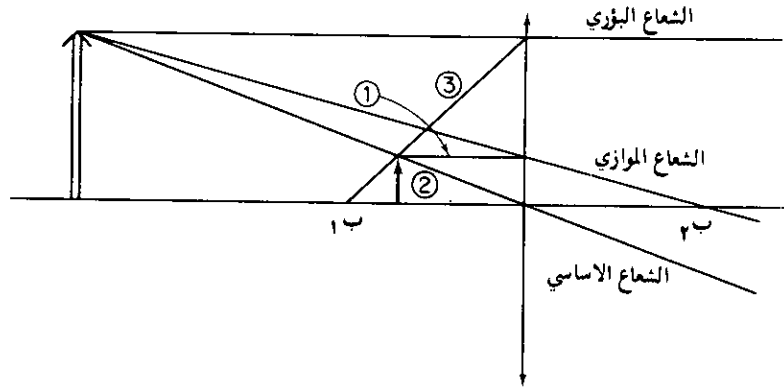
(١)، الشعاع الأساسي (٢)، والشعاع البؤري (٣). وإذا كان الجسم حقيقياً، ويقع خارج البعد البؤري للعدسة، فإن الصورة المتكونة تكون حقيقية مقلوبة (الشكل ٩). وفي تلك الحالة، وخلافاً للسطح المنفرد، فإن الشعاع الأساسي يمر بمركز العدسة بدل المرور بمركز التكون. وفي العدسة الرقيقة، يُمكن تجاهل الأزاحة الجانبية الضئيلة الحاصلة للشعاع الأساسي؛ ولذا فإن الشعاع يجب أن يرسم مثل خطٍ مُستقيم. وإذا وقع الجسم داخل البعد البؤري البؤري للعدسة فإن الصورة المتكونة تكون خيالية وهمية، مُعتدلة، ومكبرة (الشكل ١٠).

وإذا كان الجسم وهمياً وواقعاً إلى يمين العدسة، فإننا نقوم بالعمل كما في الشكل ١١. تذكر أن الشعاع الموازي يمر بالبؤرة ب_٢، وأن الشعاع البؤري يمر بالبؤرة ب_١. وتكون النتيجة صورة حقيقية، مُعتدلة، ومُصغرة.

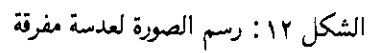
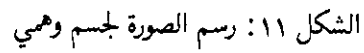
ويتم رسم الأشعة لعدسة مُفرقة كما في الشكل ١٢. وهنا مهما يكن موقع الجسم، تكون العدسة صورة وهمية، مُعتدلة، ومُصغرة.



الشكل ٩: الجسم خارج البعد البؤري لعدسة مجمعة

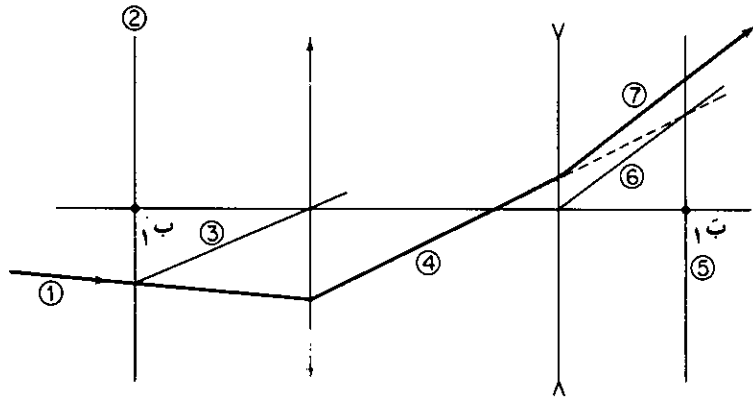


الشكل ١٠: العدسة المجمعة المستخدمة مثل مُكبر

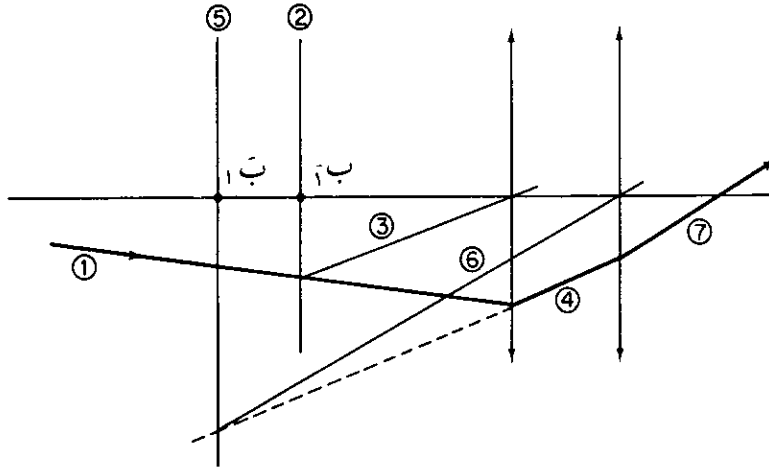
 Λ

أَلْخَطُّ (٢) يُمَثِّلُ الْمُسْتَوَى الْبُؤْرِيَّ لِلْعَدْسَةِ الْمَجْمُوعَةِ، (٣) هُوَ الشُّعَاعُ الْأَسَاسِي، (٤) يُمَثِّلُ الشُّعَاعَ الْمُنْكَسِرَ بِالْعَدْسَةِ الْمَجْمُوعَةِ، وَهُوَ الشُّعَاعُ السَّاقِطُ عَلَى الْعَدْسَةِ الْمُفْرَقَةِ. أَرْسَمِ الْمُسْتَوَى الْبُؤْرِيَّ ب، أَيْ (٥) لِلْعَدْسَةِ الْمُفْرَقَةِ، وَكَذَلِكَ الشُّعَاعَ الْأَسَاسِيَّ (٦). فَالشُّعَاعُ (٧) هُوَ الشُّعَاعُ الْمُنْكَسِرُ الْخَارِجُ مِنَ الْمَجْمُوعَةِ.

وَإِذَا كَانَتِ الْعَدْسَتَانِ قَرِيبَتَيْنِ جَدًّا بِحَيْثُ يَتَدَاخَلُ بُعْدَاهُمَا الْبُؤْرَتَانِ، فَإِنَّ طَرِيقَةَ الرَّسْمِ هِيَ مِنْ حَيْثُ الْمَبْدَأُ، نَفْسُ الطَّرِيقَةِ السَّابِقَةِ، مَعَ أَنَّهَا قَدْ تَكُونُ مُرَبَّكَةً فِي الْبَدَايَةِ. وَنُقَدِّمُ فِي الشَّكْل ١٤ عَدَسَتَيْنِ مُجْمَعَتَيْنِ مِثَالًا عَلَى تِلْكَ الطَّرِيقَةِ. افْتَرَضْ أَنَّ الْعَدْسَةَ الثَّانِيَةَ لَهَا بُعْدُ بُؤْرِيٍّ أَطْوَلُ مِنَ الْعَدْسَةِ الْأُولَى. فَمِنْ رَسْمِكَ لِلشُّعَاعِ السَّاقِطِ (١) وَحَتَّى إِيجَادِكَ الشُّعَاعِ الْمُنْكَسِرِ (٤) السَّاقِطِ عَلَى الْعَدْسَةِ الثَّانِيَةِ، يَكُونُ الرَّسْمُ الشُّعَاعِيُّ فِي هَذِهِ الْحَالَةِ كَمَا هُوَ فِي السَّابِقِ. وَبَعْدَ رَسْمِ الشُّعَاعِ (٤)، أَرْسَمِ الشُّعَاعَ (٥) الَّذِي هُوَ الْمُسْتَوَى الْبُؤْرِيُّ الْأَوَّلُ لِلْعَدْسَةِ جِهَةَ الْيَمِينِ. وَيَكُونُ الشُّعَاعُ الَّذِي يُمَثِّلُ الشُّعَاعَ الْأَسَاسِيَّ الْمَارَّ بِمَرْكَزِ الْعَدْسَةِ هُوَ (٦). وَأَخِيرًا يَكُونُ الْخَطُّ (٧) الْمَوَازِي لِلشُّعَاعِ (٦) هُوَ الشُّعَاعُ الْمُنْكَسِرُ الْخَارِجُ مِنَ الْمَجْمُوعَةِ.



الشكل ١٣: طريقة الشعاع المائل للرسم الشعاعي عبر مجموعة من عدسة موجبة وعدسة سالبة.
العدسة الى يمين الشكل يشار الى بُؤرتها بشرطة على الرمز.



الشكل ١٤: الرسم الشعاعي عبر عدستين مجتمعتين؛ الرمز المشار إليه بشرطة يشير إلى العدسة إلى اليمين.

مفهوم النقاط الرئيسية أو الكاردينالية Cardinal Points

لكل عدسة ست نقط رئيسية: البؤرتان (ب_١، ب_٢)، النقطتان الأساسيتان (ه_١، ه_٢)، والنقطتان العقديتان (ع_١، ع_٢).

النقطتان الأساسيتان Principal Points

لقد ذكرت البؤرتان في الفصول السابقة، ونقدم هنا النقطتين الأساسيتين أو المستويين الأساسيين للعدسة. والمستويان الأساسيان هما مستويان يُنشآن عند النقطتين الأساسيتين عمودياً على المحور البصري.

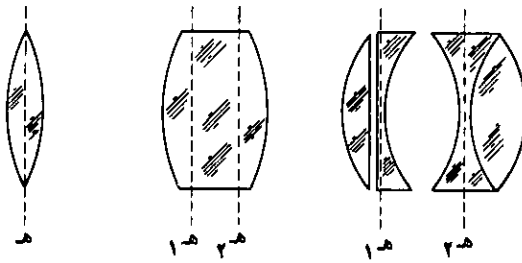
لقد أدخل فكرة المستويين الأساسيين موبيس (Mobius) وجاوس (Gauss)، وهما يُحددان المستويين في العدسة اللذين يُفترض أن يحدث الانكسار عندهما، من دون الإشارة إلى النقطتين التي يحدث الانكسار عندها فعلاً. وفي العدسة المتماثلة يُطبق المستويان الأساسيان، ويقعان في وسط العدسة - الشكل ١٥ إلى اليسار؛ بينما في العدسة السميكة

فَهُمَا يَتَفَصَّلَانِ - الرَّسْمُ فِي الْوَسْطِ . أَمَّا مَجْمُوعَةُ الْعَدَسَاتِ - أَلْرَسْمُ إِلَى الْيَمِينِ - فَلَهَا كَذَلِكَ
مُسْتَوِيَانِ أُسَاسِيَانِ فَقَطْ ، وَهُمَا كَمَا يُقَالُ الْمُسْتَوِيَانِ اللَّذَانِ نَفْتَرِضُ أَنَّ قُوَّةَ كَسْرِ الْمَجْمُوعَةِ
مَرْكَزَةٌ فِيهِمَا .

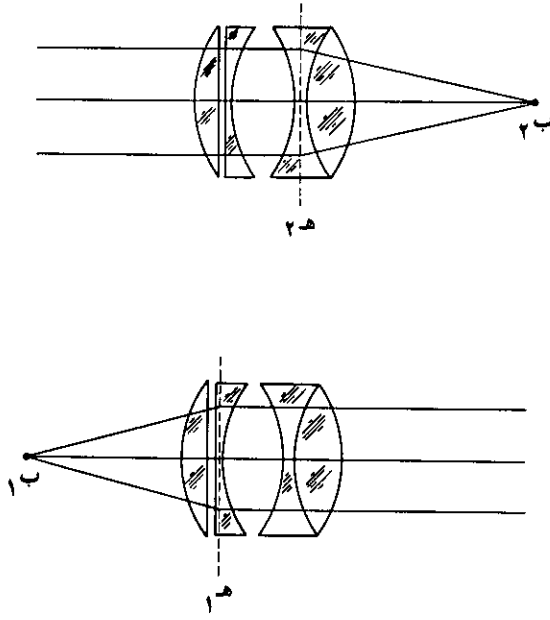
وَالْمُسْتَوِيَيْنِ الْأَسَاسِيَيْنِ أَهْمِيَّةٌ بِالْعَةِ لِسَبَبَيْنِ :

١ - إِنَّ مَعْرِفَةَ مَوْجِعِهِمَا تُعِينُ فِي الرَّسْمِ الشُّعَاعِي : افْتَرِضْ ضَوْءاً مُتَوَازِياً سَاقِطاً مِنْ جِهَةِ
الْيَسَارِ (الشَّكْل ١٦) ؛ إِنَّ كُلَّ سَطْحٍ فِي مَجْمُوعَةِ الْعَدَسَاتِ سَيَعْكِسُ الضَّوْءَ بِطَرِيقَةٍ
أَوْ أُخْرَى ؛ لَكِنَّ جَمِيعَ الْأَشْعَةِ فِي نِهَآيَةِ الْأَمْرِ تَتَجَمُّعُ فِي الْبُورَةِ الثَّانِيَةِ ب ٢ . وَإِذَا مَدَدْنَا
الْأَشْعَةَ السَّاقِطَةَ إِلَى الْأَمَامِ وَالْأَشْعَةَ الْمُنْكَسِرَةَ إِلَى الْخَلْفِ ، مِنْ دُونِ الْإِلْتِفَاتِ إِلَى مَوْجِعِ
الْانْكَسَارِ الْفَعْلِيِّ ، فَإِنَّا نَجِدُ أَنَّ الْأَشْعَةَ الْمُرَافِقَةَ تَتَقَاطِعُ فِي مُسْتَوًى وَاحِدٍ هُوَ الْمُسْتَوًى
الْأَسَاسِيُّ الثَّانِي هـ ٢ . وَبصُورَةٍ مُمَآثِلَةٍ ، فَإِذَا صَدَرَ الضَّوْءُ مِنَ الْبُورَةِ ب ١ ، فَإِنَّهُ يَتَنَكَّرُ
أَشْعَةً مُتَوَازِيَةً بِالتَّعْرِيفِ ، وَيَكُونُ الْمُسْتَوًى الَّذِي يُفْتَرَضُ أَنْ يَحْدُثَ الْانْكَسَارُ عِنْدَهُ
هُوَ الْمُسْتَوًى الْأَسَاسِيُّ الْأَوَّلُ هـ ١ . لَاحِظْ أَنَّ هُنَاكَ تَنَاظِراً تَاماً ، أَيُّ نَقْطَةٍ مُقَابِلُ
نُقْطَةٍ ، يَتَنَ الْمُسْتَوِيَيْنِ الْأَسَاسِيَيْنِ : فَكُلُّ مِنْهُمَا صُورَةٌ مُعْتَدِلَةٌ مُمَآثِلَةٌ لِلْآخَرِ ، أَيُّ بِتَكْبِيرٍ
مِقْدَارُهُ وَاحِدٌ .

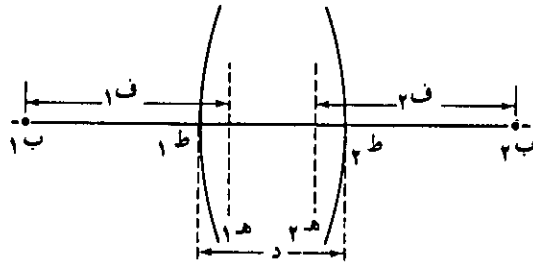
٢ - إِنَّ الْمُسْتَوِيَيْنِ الْأَسَاسِيَيْنِ هُمَا الْمَوْضِعَانِ اللَّذَانِ يُقَاسُ مِنْهُمَا الْبُعْدَانِ الْبُورِيَانِ -
الشَّكْل ٧ . وَلِذَلِكَ فَإِذَا عُرِفَ مَوْجِعُ الْمُسْتَوِيَيْنِ الْأَسَاسِيَيْنِ ، أَمْكَنَ رَسْمُ الْأَشْعَةِ
وَالصُّورَةِ بِسُهُولَةٍ ، كَمَا هُوَ الْأَمْرُ فِي رَسْمِ الْعَدَسَاتِ الرَّقِيقَةِ بِاسْتِخْدَامِ 'ثَلَاثِ الْعَدْسَةِ
الرَّقِيقَةِ .



الشَّكْل ١٥ : الْمُسْتَوِيَانِ الْأَسَاسِيَانِ لِعَدْسَةٍ رَقِيقَةٍ ، عَدْسَةٍ سَمِيكَةٍ ، وَلِمَجْمُوعَةٍ مِنَ الْعَدَسَاتِ



الشكل ١٦: تحديد موقعي المستويين الأساسيين لمجموعة من العدسات المجمعة؛ B_1 و B_2 هما البؤرتان.



الشكل ١٧: يُقاسُ البعدان البؤريان: واحدٌ على كل جانب من المستويين الأساسيين. f_1 ، f_2 هما البعدان البؤريان.

• يَغتَمِدُ موقعُ المستويين الأساسيين على قُوَّةِ الكَسْرِ الكُلِّيَّةِ للعدسة، قُوَّتَيِ كَسْرِ السَّطْحَيْنِ، وَشَمْلِكِ العدسة. فإذا كانت P_1 ، P_2 هما قُطْبَا العدسة، H_1 ، H_2 هما المُستويان الأساسيان، Q_1 ، Q_2 هما قوتا كسر السطحين، D شَمْلُ العدسة، M مُعَامِلُ انكسارِ مادةِ العدسة، Q : قُوَّةُ الكَسْرِ المكافئة للعدسة، فإنَّ:-

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{ق_٢}{ق_١} = \frac{د}{م} \\ \frac{ق_١}{ق_٢} = \frac{د}{م} \end{array} \right. \quad [١:٤-١]$$

ملاحظة: لو جُمعت قوتا كسر السطحين لحصلنا على قيمة تقريبية لقوة كسر العدسة، أي $ق_١ + ق_٢$ ، وليس لقوة الكسر المكافئة $ق_١$. إن قوة الكسر المكافئة تأخذ بالحسبان سُمك العدسة، وهي تُعرف بأنها مقلوب المسافة بالأمتار بين المستوى الأساسي والمستوى البؤري، أي أن: -

$$ق = ق_١ + ق_٢ - \frac{د}{م} \quad [٢:٤-١]$$

وهناك مفهوم آخران يُشابهان نوعاً ما قوة الكسر المكافئة وهما القوة المعادلة **Neutralizing Power** والقوة الفاعلة **effective power**: أما القوة المعادلة $ق_١$ فتُعرف بقوة كسر العدسة عند سطحها الأمامي:

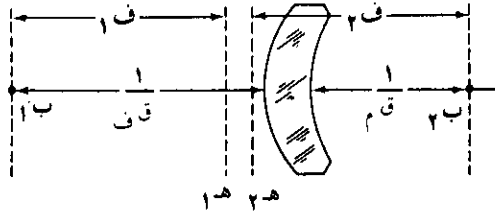
$$ق_١ = ق_١ + ق_٢ - \frac{د}{م} \quad [٣:٤-١]$$

أما القوة الفاعلة $ق_٢$ فتُعرف بقوة العدسة عند سطحها الخلفي:

$$ق_٢ = ق_١ + ق_٢ - \frac{د}{م} \quad [٤:٤-١]$$

إن القوتين المعادلة والفاعلة هما في أساسهما مقلوبا مسافتين - الشكل ١٨. ويُحسب البعد البؤري لعدسة سميكة: من نصف قطرها تكوّر سطحها $ق_١$ ، $ق_٢$ وسُمكها بالمعادلة التالية: -

$$[٥:٤:١] \quad \dots \left[\frac{(١-م)د}{نق٢} - \frac{١}{نق٢} + \frac{١}{نق١} \right] (١-م) = \frac{١}{ف}$$

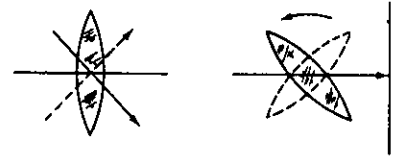
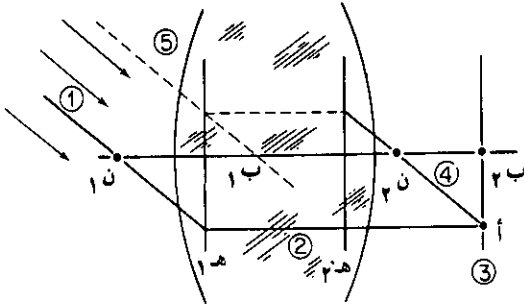


الشكل ١٨: البعدان البؤريان، المستويان الأساسيان، والقوتان: المعادلة والفاعلة لعدسة سميكة موجبة هلالية. ب_١، ب_٢ هما البؤرتان؛ هـ_١، هـ_٢ هما المستويان الأساسيان؛ ف_١، ف_٢ هما البعدان البؤريان؛ ق_م: القوة المعادلة؛ ق_ن: القوة الفاعلة.

النقطتان العقديتان Nodal points

رأينا أنَّ المُستويين الأساسيين يُمكنُ اعتبارُهُما المَوْضِعَين اللّذين يَتَكَثَّفُ كلُّ الانكسار عندهما. وبصورةٍ مُماثلةٍ، يُمكنُ اعتبارُ النقطتين العقديتين أنَّهما النقطتان اللتان لا يَحْدُثُ أنْكَسارٌ عندهما. ففي العدسة الرقيقة، نَفْتَرِضُ أنَّ الضَّوءَ المارَّ في مَرَكِزِها لا يَنْحَرِفُ، مَهْمَا أُمِيلَتِ العَدْسَةُ عن المِحْوَِرِ البَصْرِيِّ - الشكل ١٩. لكننا نَرى عِنْدَ الانتقالِ مِنَ العَدْسَةِ الرَقيقَةِ إلى العَدْسَةِ السَّميكةِ أنَّ المُستويين الأساسيين يَتَفَصِّلَان. ونَحْنُ مُهْتَمُونَ الآنَ بالكَشْفِ فيما إذا كان نَفْسُ الشَّيْءِ يَحْدُثُ لمركزِ العدسة. تَحَيَّلْ أنَّ لَدَيْكَ عَدْسَةُ سَميكةٍ: مُستوياها الأساسيان هما هـ_١، هـ_٢. إنَّ الشُّعاعَ البُؤْرِيَّ (١) يَمُرُّ في ب_١، وَ يَسْقُطُ على هـ_١؛ إذ يَنْكَسِرُ هُنَاكَ وَيَمُرُّ مُوازيًا للمِحْوَِرِ البَصْرِيِّ - الشُّعاعُ (٢)، ثُمَّ يَقْطَعُ المُستوى البُؤْرِيَّ الثَّانِي (٣) في نُقْطَةِ أ. وإذا كَانَتْ هُنَاكَ أشْعَةٌ أُخْرَى مُوازيَةً للشُّعاعِ (١)، مِثْلَ الأشْعَةِ المُشارِ إليها بالأشْهُمِ في الشَّكْلِ ٢٠، فَإِنَّهَا تَتَجَمَّعُ في النُقْطَةِ أ. وَلَكِنْ هُنَاكَ شُعاعاً واحداً (٤) يَخْرُجُ مِنْ هـ_٢ مُوازيًا للشُّعاعِ (١)؛ وإذا ما تَتَبَّعْنَا أَصْلَ هَذَا الشُّعاعِ نَحْصِلُ على الشُّعاعِ (٥) الَّذِي يَقْطَعُ عِنْدَ مَدِّهِ في اتِّجَاهِ سُقُوطِهِ المِحْوَِرَ البَصْرِيَّ في ن_١ مِنْ دُونِ انْكَسارٍ. كَذَلِكَ يَقْطَعُ الشُّعاعُ (٥)، عِنْدَ مُرُورِهِ في مَسَارِهِ المُتَتَبِّعِ عِبْرَ العَدْسَةِ، المِحْوَِرَ

في النقطة ن_٢ . ومن المهم أن نلاحظ أن موضعي النقطتين ن_١ ، ن_٢ لا يتوقفان على اتجاه الأشعة الساقطة ؛ ولذا فإن هاتين النقطتين تتصفان بأن الشعاع المار في إحدهما (ن_١) يتبعث من الأخرى (ن_٢) في اتجاه مواز لاتجاهه الأصلي . وتسمى هاتان النقطتان النقطتين العقديتين ، وهما تقومان تماماً بدور مركز العدسة السميكية . أما للسطح العاكس المنفرد ، فإن النقطة العقدية تكون مركز تكوير السطح .



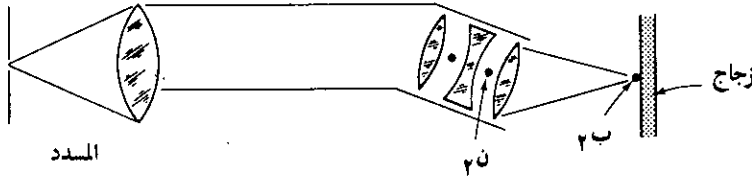
الشكل ٢٠ : اشتقاق مفهوم النقطتين العقديتين .

الشكل ١٩ : الأشعة المارة بمركز العدسة الرقيقة تمر بالعدسة من دون انكسار - الرسم الى اليسار ؛ وبصورة مماثلة فإن العدسة يمكن امالتها عن المحور البصري من دون أي تأثير على موقع الصورة - الرسم الى اليمين .

طريقة المنزلق العقدي Nodal Slide method

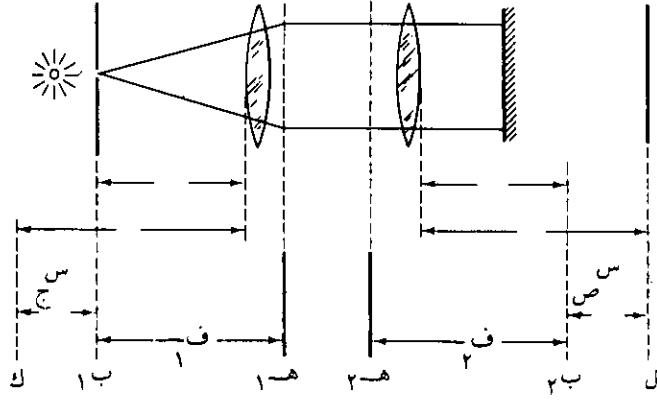
يُمكن تحديد موقعي النقطتين العقديتين بالتجربة بطريقة المنزلق العقدي . إن المنزلق العقدي هو نوع من حامل العدسة الذي يُمكن أن يُدار على محور رأسي إلى الأمام والخلف . وبإجراء مثل ذلك الدوران ، نتمكن من مراقبة أية حركة جانبية للصورة المتكونة بالعدسة ؛ فإذا لم يحدث هنالك أية حركة جانبية ، فإن محور الدوران الجانبي يمر بالنقطتين العقديتين . ومن ناحية تطبيقية ، يُسقط الضوء المُسدّد على عدسة أو مجموعة عدسات ، ثم يتجمع على ستارة بعد مروره فيها - الشكل ٢١ أ لرسم إلى اليمين . وتبعاً للاتجاه الذي تتحرك فيه الصورة عند دوران العدسة على المحور ، فإن العدسة وحاملها يُحرّكان إلى الأمام وإلى الخلف على المنزلق العقدي ، من أجل إعادة تركيز الصورة باستمرار على الستارة . وفي

حالة الحصول على الوضع الذي لا تحدث فيه إزاحة في الصورة، تُقاس المسافة من محور الدوران إلى الستارة؛ ثم تُدار العدسة ١٨٠°، وتعاد الطريقة السابقة. وبهذه الوسيلة يتم تعيين المسافة بين البؤرتين والنقطتين العقديتين.



الشكل ٢١: طريقة المنزلق العقدي - كما ترى من الأعلى. ان دوران مجموعة العدسات حول ب ن لا يتسبب في اية حركة للصورة ب ن.

ثم نستخدم بعد ذلك طريقة نيوتن Newton's method لتعيين مسافتي البؤرتين من سطحي العدسة الخارجيتين الأقربيتين؛ ويتم ذلك بطريقة التثديد أو الأيزاء الذاتي، كما يوضحها الشكل ٢٢- الرسم العلوي. فعندما تكون الصورة واضحة تماماً يكون موقع الستارة في المستوى البؤري ب_١؛ ثم تُقاس المسافة بين ب_١ وأقرب سطح للعدسة. وبعد القيام بذلك، تُدار العدسة نصف دورة، ثم تُطبق الطريقة السابقة على السطح الآخر للعدسة. وبعد ذلك تُبعد العدسة من الشق الطولي فتتكون صورة حقيقية على ستارة موضوعة على بُعد ما إلى اليمين. وبهذه الوسيلة، يُحدد موقعاً المستويين المترافقين ك و ل - الشكل ٢٢، الرسم السفلي. وعندما تكون الصورة أوضح ما يمكن، يُقاس بُعدا ك و ل من وجهي العدسة المقابلين. ويُطرح من كلٍّ من المسافتين المسافة بين البؤرة والسطح، كما تم حساب ذلك سابقاً. وبذلك نحصل على المسافتين ك ب_١، ب_٢ ل، وهاتان المسافتان بالتعريف هما مسافتا نيوتن خارج البؤرتين أي س_٢، س_١، اللتان يمكن منعهما، وباستخدام معادلة نيوتن (ع^٢ = س_٢ س_١)، حساب البعد البؤري للعدسة. وأخيراً، ولأننا نعرف الآن البعد البؤري ع، يمكننا أن نحدد موقعي المستويين الأساسيين هـ ١، هـ ٢.



الشكل ٢٢: طريقة نيوتن

تعيين البعد البؤري لمنظومة عدسات

إذا كانت لدينا عدسة سميكة أو مجموعة مُعَقَّدة من العدسات، فلا يمكننا تعيين البعد البؤري لها من معرفة مسافتي الجسم والصورة؛ ذلك لأن هاتين المسافتين تُقاسان من المستويين الأساسيين اللذين لا يُعرفان مُسبقاً. وعوضاً من ذلك، يُمكن إيجاد البعد البؤري بطريقة أبي (Abbé)، حيث يُستخدم التكبير لإيجاد البعد البؤري، ومن ثم موقعي المستويين الأساسيين.

ضع مصدر الضوء قريباً من الطرف الأيسر للمنظمة الضوئية، وتأكد من أن المنصورة مُجهزة بمقياس سنتمتري، يُمكن بوساطته قراءة المواقع المطلوبة. إن مجموعة العدسات ينبغي أن تكون مجموعة مُجمَّعة. كوّن صورة على الستارة، ثم اجعل مسافة الجسم أقصر قليلاً من مسافة الصورة، وسجل موقع الجسم. ولنفرض أن الموقع كما يُقرأ على المقياس هو r . قس حجم الجسم وحجم الصورة، وأحسب التكبير من المعادلة:

$t = \frac{h}{h'}$. وبإبقاء العدسة في مكانها، حرّك الجسم أي المصدر الضوئي قليلاً إلى جهة اليمين، واخصل له على أوضح صورة. ويتطلب الحصول على أوضح صورة تحريك الستارة أيضاً. ثم سجل موقع الجسم الجديد وسمّه r_2 ، وحدد التكبير الجديد (t_2) كما سبق. وبإمكانك حساب البعد البؤري الآن من معادلة أبي:-

[٦-٤:١]

$$..... \frac{r_2 - r_1}{\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1}} = e$$

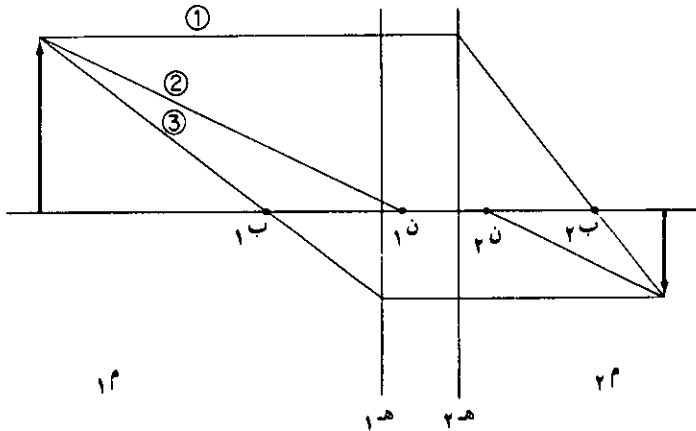
الرَّسْمُ الشَّعَاعِيُّ عَبْرَ عَدْسَةٍ سَمِيكَةٍ

يُمْكِنُ رَسْمُ الْأَشْعَةِ عَبْرَ عَدْسَةٍ سَمِيكَةٍ بِطَرِيقَةٍ مُمَاطِلَةٍ لِرَسْمِ الْأَشْعَةِ عَبْرَ عَدْسَةٍ رَقِيقَةٍ مَعَ مُرَاعَاةِ الشَّرْطَيْنِ التَّالِيَيْنِ:

١ - تُرَسَّمُ جَمِيعُ الْأَشْعَةِ فِي الْمُنْطَقَةِ مَا بَيْنَ الْمُسْتَوِيَيْنِ الْأَسَاسِيَيْنِ مُوَازِيَةً لِلْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ.

٢ - يُزَاوَحُ الشُّعَاعُ السَّاقِطُ عَلَى النِّقْطَةِ الْعُقْدِيَّةِ الْأُولَى جَانِبِيًّا، بِحَيْثُ يَصْدُرُ مِنَ النِّقْطَةِ الْعُقْدِيَّةِ الثَّانِيَةِ مُوَازِيًا لِاتِّجَاهِهِ الْأَصْلِيِّ - الشَّكْلُ ٢٣.

وَلَمَّا كَانَ الشَّكْلُ ٢٣ لَا يُظْهِرُ الْعَدْسَةَ الْفِعْلِيَّةَ الْمُمَثَّلَةَ هُنَا بِمُسْتَوِيَيْنِ أُسَاسِيَيْنِ، فَمِنْ الْمُمْكِنِ أَنْ يُقَادَ تَفْكِيرُ الْمَرْءِ خَطَأً إِلَى ضَرُورَةِ كَوْنِ حَجْمِ الْعَدْسَةِ مُسَاوِيًا لِحَجْمِ الْجِسْمِ، لَيْسَتْهُمُ اسْتِقْبَالُ الشُّعَاعِ (١). إِلَّا أَنَّ عَلَيْنَا أَنْ لَا نَقْلُقَ؛ فَحَجْمُ الْعَدْسَةِ هُنَا لَا يَهْمُنُنَا، ذَلِكَ لِأَنَّا نَحْصُرُ نِقَاشَنَا فِي الْأَشْعَةِ الْمِخْوَريَّةِ الْمُحَازِيَةِ؛ فَثَمَّةُ مَبَالِغَةٍ فِي رَسْمِ الْأَشْكَالِ فِي اتِّجَاهٍ عَمُودِيٍّ عَلَى الْمِخْوَرِ الْبَصَرِيِّ.



الشَّكْلُ ٢٣: الرَّسْمُ الشَّعَاعِيُّ عَبْرَ عَدْسَةٍ سَمِيكَةٍ: حَالَةُ $m_1 > m_2$

مثال : نُقدِّمُ هنا مثلاً آخرَ على رسمِ الشعاعِ عبرَ عدسةٍ مُحدَّبةٍ - مستوية، يَصْدُرُ الضَّوءُ مِنْ مُستواها البُوريِّ الأولِ . وبالتَّعَرِيفِ، فَإِنَّ الضَّوءَ يُصْبِحُ مُوازياً لِلْمِحْوَرِ البَصْرِيِّ بَعْدَ الانكِسارِ، كما يَكُونُ المُستوى الأساسيُّ الثاني هـ ٢ مماساً لِلسَّطْحِ الخَلْفِيِّ لِلعدسةِ . ومن الرِّسْمِ في الشَّكْلِ ٢٤، نَجِدُ أنَّ :-

$$ع = ف + د - و ، \quad \text{أي أن:} -$$

$$و = ف + د - ع$$

إنَّ المسافتَيْنِ ف وَ د يُمكنُ قياسُهما بسهولة : ف بِطريقةِ التَّسْيِيدِ الذاتِيِّ وَ د ألياً . وعند إدارة العدسةِ نَصِفَ دَوْرَةَ، نَجِدُ ع ١ وَ هـ ٢ بنفسِ الطَّرِيقَةِ . وإذا ما عَرَفْنَا مَوْقِعَ هـ ١ ، أَمَكُنَّا رَسْمَ أَيِّ شُعاعٍ صَادِرٍ مِنْ ب ١ . وَيَظْهَرُ لَنَا أَنَّ :-

$$\text{ظا } \alpha = \frac{\text{ط}}{د - و} ، \quad \text{ظا } \beta \approx \frac{\text{ط}}{د}$$

وَبَدْمَجِ المُعادلتَيْنِ السابقتين، وَبِحَذْفِ ط، نَحْصُلُ على :

$$(د - و) \text{ ظا } \alpha \approx \text{ظا } \beta$$

$$\text{أي } \frac{\text{ظا } \alpha}{\text{ظا } \beta} \approx \frac{د}{د - و}$$

ولأنَّ α وَ β صَغِيرَتَانِ، فَيُمْكِنُ القَوْلُ إِنَّ :-

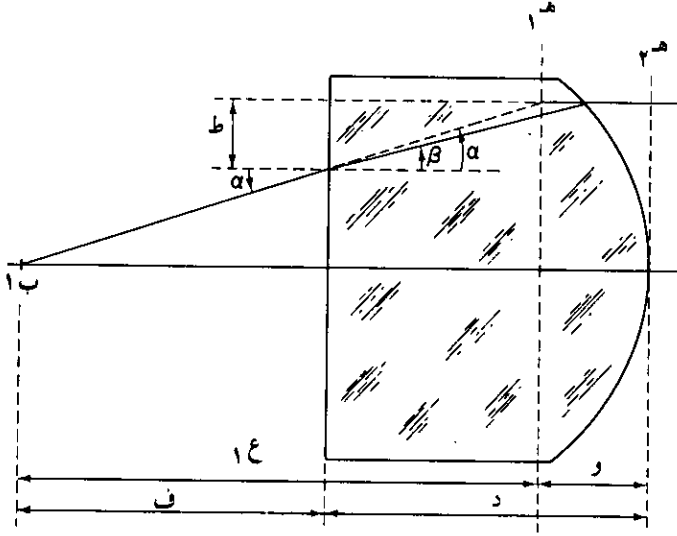
$$\frac{\text{ظا } \alpha}{\text{ظا } \beta} \approx \frac{\text{جا } \alpha}{\text{جا } \beta} = م ، \quad \text{حيث } م \text{ معامل الانكسار؛}$$

وَمِنْ ثَمَّ، فَإِنَّ :

$$\frac{د}{د - و} \approx م ، \quad \text{و } د \approx \frac{(م - ١)}{م}$$

وهكذا، فالمسافةُ بَيْنَ المُستويين الأساسيين لِلزُّجَاجِ الَّذِي مُعَامِلُ انكِسارِهِ ١,٥ تَكُونُ :

$$و \approx \frac{١}{٣} د .$$



الشكل ٢٤: الرسم الشعاعي عبر عدسة سميكة محدبة مستوية.

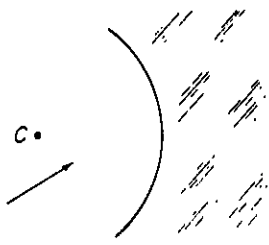
اقتراحات للقراءة الاضافية

- F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, 3rd ed. (New York: McGraw-Hill Book Company, 1957).
- M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics* (New York: Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc., 1958).
- J. P. C. Southall, *Mirrors, Prisms, and Lenses*, 3rd ed. (New York: The Macmillan Company, 1936).

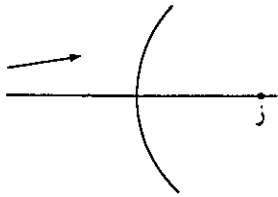
المسائل

١-٤- باستخدام طريقة الشعاع الموازي للرسم الشعاعي عبر سطح مُستوٍ، وبالرجوع إلى الشكل (١) من هذا الفصل، بَيِّن تحليلياً أَنَّ ذلك الرسم يُعطي فعلاً اتجاه الشعاع.

١-٤-٢ لَدَيْكَ ضوءٌ ساقِطٌ على سطحٍ مُقعَّرٍ كما في الشكل ٢٥. فإذا كَانَ الهَوَاءُ إلى يَسَارِ السَّطحِ، والزُّجاجُ ($n=1.5$) إلى يَمِينِهِ، فَجِدْ الشعاعَ المُنكسِرَ بطريقة



الشكل ٢٥



الشكل ٢٦

الرَّسْمُ الشُّعَاعِي. أَرْسُمُ جَمِيعَ خُطُوطِ الرَّسْمِ نَحِيفَةً فَاتِحَةً اللَّوْنَ، وَارْسُمُ مَسَارَ الشُّعَاعِ الْفِعْلِيِّ غَامِقَ اللَّوْنِ.

٣-٤:١ يُبَيِّنُ الشَّكْلُ ٢٦ الشُّعَاعَ السَّاقِطَ عَلَى سَطْحٍ كُرِّيٍّ كَاسِرٍ مُنْفَرِدٍ، زَمْرَكُزِ تَكْوِيرِ السَّطْحِ:

(أ) جَذُّ مَسَارِ الشُّعَاعِ الْمُنْكَسِرِ مُفْتَرَضاً أَنَّ الْمَاءَ إِلَى يَسَارِ السَّطْحِ وَالزُّجَاجَ إِلَى يَمِينِهِ (م زجاج = ١,٥).

(ب) جَذُّ مَسَارِ الشُّعَاعِ الْمُنْكَسِرِ مُفْتَرَضاً أَنَّ الزُّجَاجَ إِلَى يَسَارِ السَّطْحِ، وَالْمَاءَ إِلَى يَمِينِهِ.

٤-٤:١ صَدَرَ شُعَاعٌ ضَوْئِيٌّ مِنْ نُقْطَةٍ عَلَى الْمَحْوَرِ الْبَصْرِيِّ خَارِجَ ضِعْفِي الْبُعْدِ الْبُورِيِّ لِعَدْسَةٍ مُجْمَعَةٍ. جَذُّ الصُّورَةِ الْمُرَافِقَةِ الْمَكُونَةِ بِالْعَدْسَةِ بِطَرِيقَةِ الرَّسْمِ الشُّعَاعِي.

٥-٤:١ وَضِعَ جِسْمٌ صَغِيرٌ فِي مُنْتَصَفِ الْمَسَافَةِ بَيْنَ مَرْكَزِ كُرَةِ مُصْمَتَةٍ قُطْرُهَا ٤٠ سَم، وَسَطَحُهَا فِي الْجِهَةِ الْيُمْنَى؛ مُعَايِلُ انْكَسَارِ الزُّجَاجِ ١,٥. جَذُّ بِالرَّسْمِ الشُّعَاعِيِّ مَوْقِعَ الصُّورَةِ عِنْدَ النَّظَرِ إِلَى الْكُرَةِ مِنَ الْجِهَةِ الْيُمْنَى، ثُمَّ دَقِّقْ إِجَابَتَكَ حِسَابِيًّا بِاسْتِخْدَامِ مُعَادَلَةِ جَاوَسَ.

٦-٤:١ نُظِرَ إِلَى جِسْمٍ مِثْلِ نُقْطَةٍ مِخْوَريَّةٍ عَبْرَ عَدْسَةٍ مُفَرَّقَةٍ مَوْضُوعَةٍ عَلَى مَسَافَةٍ مِنَ الْجِسْمِ تَبْلُغُ مَرَّةً وَنِصْفًا قَدْرَ الْبُعْدِ الْبُورِيِّ لَهَا؛ جَذُّ بِالرَّسْمِ الشُّعَاعِيِّ الصُّورَةَ الْمُرَافِقَةَ.

٧-٤:١ سَقَطَ الضَّوُّ الْمُنْبَعِثُ مِنْ جِسْمٍ نُقْطَةٍ يَبْعُدُ ٢ سَم عَنْ الْمَحْوَرِ الْبَصْرِيِّ عَلَى عَدْسَةٍ رَقِيقَةٍ، قُوَّتُهَا +١٠,٠٠ م^{-١}. وَبَعْدَ انْكَسَارِهِ، بَقِيَ الضَّوُّ مُتَفَرِّقًا بِحَيْثُ أَنَّ الشُّعَاعَ الَّذِي يَصْدُرُ مِنَ الْجِسْمِ مُوَازِيًا لِلْمَحْوَرِ الْبَصْرِيِّ يَعْمَلُ بَعْدَ انْكَسَارِهِ مَعَ الشُّعَاعِ الْأَسَاسِيِّ زَاوِيَةً مِقْدَارُهَا ٧°. جَذُّ مَسَافَةَ الصُّورَةِ.

٨-٤:١ إِذَا أَسْتُخْدِمَ فِي السُّؤَالِ السَّابِقِ عَدْسَةٌ قُوَّتُهَا -١٠,٠٠ م^{-١} عِوَضًا مِنَ الْعَدْسَةِ السَّابِقَةِ، فَجِدِ الْآنَ الزَّاوِيَةَ بَيْنَ الشُّعَاعَيْنِ وَكَذَلِكَ مَسَافَةَ الصُّورَةِ.

٩-٤:١ عَدَسَةٌ سَمِيكَةٌ هِلَالِيَّةٌ: قُوَّةُ سَطْحِهَا الْأَوَّلِ ٢٢,٠٠ م-١، وَقُوَّةُ سَطْحِهَا الثَّانِي -٦,٠٠ م-١، وَسُمْكُهَا فِي وَسْطِهَا ٢٠ سم، وَهِيَ مَصْنُوعَةٌ مِنَ الزُّجَاجِ الَّذِي مُعَامِلُ انْكَسَارِهِ ١,٥٢٣.

جـ: (أ) قُوَّتُهَا التَّقْرِيبِيَّةُ (ب) قُوَّتُهَا الْمُكَافِئَةُ (ج) قُوَّتُهَا الْمُعَادِلَةُ (د) قُوَّتُهَا الْفَعَالَةُ؛ ثُمَّ قَارِنْ بَيْنَ مَقَادِيرِ الْقُوَى الْمَحْسُوبَةِ.

١٠-٤:١ غُمِرَتْ كُرَةٌ زُجَاجِيَّةٌ قُطْرُهَا ٦ سم، وَمُعَامِلُ انْكَسَارِهَا ١,٥ فِي الْمَاءِ؛ حَدِّدْ مَوْقِعِي الْمَسْتَوِيَيْنِ الْأَسَاسِيَيْنِ، وَحَدِّدِ الْبُعْدَ الْبُورِيَّ لِلْكُرَةِ.

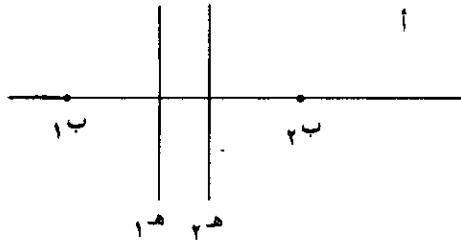
١١-٤:١ تَخَيَّلْ أَنَّ لَدَيْكَ عَدَسَةٌ هِلَالِيَّةٌ سَمِيكَةٌ: نِصْفًا قُطْرِ تَكْوَرِ سَطْحِهَا مُتَسَاوِيَانِ مِقْدَاراً وَمُخْتَلِفَانِ فِي الْإِشَارَةِ.

(أ) إِذَا مَرَّ الضَّوُّ عَبْرَ الْعَدَسَةِ مِنْ سَطْحِهَا الْمُقَعَّرِ أَوَّلًا، فَهَلْ تَتَغَيَّرُ إِمَالَةُ الضَّوِّ، وَلِمَاذَا؟ وَضَّحْ إِجَابَتَكَ.

(ب) أَجِبْ عَنِ الْفَرْعِ السَّابِقِ مُفْتَرِضًا أَنَّ سَطْحِي الْعَدَسَةِ مُشْتَرِكَانِ فِي مَرْكَزِ التَّكْوَرِ.

١٢-٤:١ أَرَسِّمْ مَسَارَاتِ خُزْمَةٍ ضَوْئِيَّةٍ مُتَوَازِيَةٍ سَاقِطَةٍ عَلَى كُرَةٍ جَوْفَاءٍ مَغْمُورَةٍ فِي الْمَاءِ.

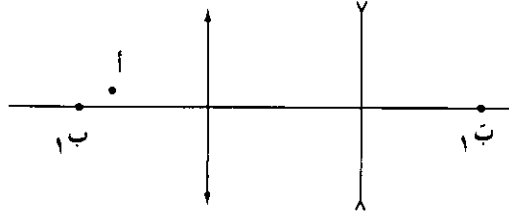
١٣-٤:١ فِي الشَّكْلِ ٢٧ أَذْنَاهُ، حَدِّدِ النُّقْطَةَ فِي الْجِسْمِ الَّتِي تَتَرَفَّقُ مَعَ نَقْطَةِ الصُّورَةِ أ.



الشكل ٢٧

١٤-٤:١ فِي الشَّكْلِ ٢٨، حَدِّدِ الصُّورَةَ الَّتِي تَتَرَفَّقُ وَالْجِسْمَ الْمُسْتَعْمَدُ مِنْ مَجْمُوعَةٍ مِنْ

عَدَسَتَيْنِ: مُجْمَعَةٍ وَمُفَرَّقَةٍ، عَلِّمْنَا أَنَّ الرَّمُوزَ الَّتِي عَلَيْهَا شَرْطَةُ تَشِيرٍ إِلَى الْعَدَسَةِ إِلَى جِهَةِ الْيَمِينِ.



الشكل ٢٨

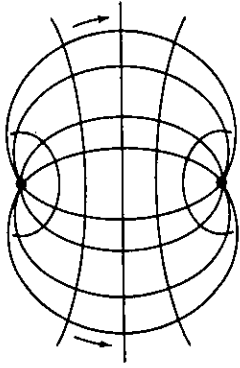
١٥-٤:١ أفتَرَضْ أَنَّ شُعَاعاً ضَوْئياً صَدَرَ مِنْ جِسْمٍ نَقْطَةٍ عَلَى الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ . تَتَبَعَ
 بِالرَّسْمِ الشُّعَاعِيَّ الشَّعَاعَ الَّذِي يَمُرُّ عَبْرَ مَجْمُوعَةٍ مِنْ عَدَسَةٍ مُفَرِّقَةٍ قَرِيبَةٍ مِنْ
 الْجِسْمِ وَعَدَسَةٍ مُجْمَعَةٍ ، عَلِمَا أَنَّ الْعَدَسَتَيْنِ مُنْفَصِلَتَانِ وَمَوْضُوعَتَانِ بِحَيْثُ
 تَنْطَبِقُ الْبُورَةُ الْيُمْنَى لِلْعَدَسَةِ الْمَفْرِقَةِ عَلَى الْبُورَةِ الْيُسْرَى لِلْعَدَسَةِ الْمُجْمَعَةِ .

الفصل ١ : ٥

الثقوب والبآبيء وبصريات الالياف

Apertures, Pupils, Fiber Optics

يَتَحَدَّدُ المَقْطَعُ العَرَضِيّ لِحُزْمَةِ الضَّوءِ المَارَّةِ فِي أَيْةِ أَدَاةٍ بَصَرِيَّةٍ بِالحَجْمِ المَحْدُودِ لِلْعَدْسَةِ أَوِ المَوْشُورِ أَوِ المِرَاةِ أَوْ بِأَيَّةِ حَوَاجِزَ أَوْ ثُقُوبٍ إِضَافِيَّةٍ تَعْتَرِضُ مَسَارَهَا . وَإِذَا اسْتَطَعْنَا أَنْ نَصْنَعَ أَدَاةً بَصَرِيَّةً تَخْلُو مِن هَذِهِ التَّقْيِيدَاتِ وَمِنْ أَيِّ زَوَاجِنَ ، فَإِنَّ الصُّورَةَ المَتَكَوِّنةَ تَكُونُ مُثَقَّنَةً تَمَامًا تَحْوِي مِنَ المَعْلُومَاتِ مِثْلَ مَا فِي الجِسْمِ - الشَّكْل ١ ؛ غَيْرَ أَنَّهُ يَضَعُ بَصُورَ تَحْقِيقِ ذَلِكَ مِنْ نَاحِيَةٍ عَمَلِيَّةٍ .

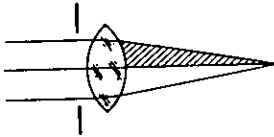


الشكل ١ : تَكُونُ الصُّورَةُ المَتَقَّنَةُ

الحواجز Stops

الحاجز ذو الثقب Aperture Stop

حَقِيقَةً ، إِنَّ الضَّوءَ الَّذِي يَمُرُّ مِنَ الجِسْمِ إِلَى الصُّورَةِ يَتَحَدَّدُ دَائِمًا بِقَدْرٍ مَا فِي مَكَانٍ بَيْنَهُمَا . وَأَشْيَعُ مُحَدِّدٍ لِلْحُزْمَةِ هُوَ الثُّقْبُ ، وَهُوَ عِبَارَةٌ عَنْ فَتْحَةٍ فِي حَاجِزٍ مُعْتَمٍ تَكُونُ غَالِبًا دَائِرِيَّةَ الشَّكْلِ .



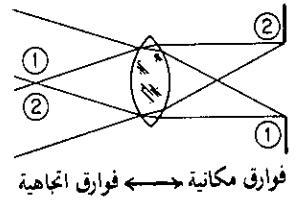
الشكل ٢ : الثقب والفتحة الزاوية

وَفِي الأَدَاةِ البَصَرِيَّةِ البَّسِيطَةِ ، تُشَكِّلُ حَافَةُ العَدْسَةِ أَوِ المِرَاةِ الحَاجِزَ ذَا الثُّقْبِ ، وَيَمَكُنُ تَضْيِيقُ ذَلِكَ الثُّقْبِ بِحَاجِزٍ مُتَفَصِّلٍ . وَتُسَمَّى نِصْفُ زَاوِيَةِ المَخْرُوطِ الَّتِي تَقَابِلُ الثُّقْبَ الفَتْحَةُ الزَاوِيَّةُ **angular operture** - الجزء المظللُ فِي الشَّكْلِ ٢ . وَالفَتْحَةُ الزَاوِيَّةُ وَثِيقَةُ العِلَاقَةِ بِالفَتْحَةِ العَدَدِيَّةِ لِلْمِيكْرُوسَكُوبِ الَّتِي سَتُبَحِّثُ فِيهَا بَعْدَ . وَفِي الكَامِيرَا يُعَرَّفُ العَدَدُ

البُؤري (f-number) بنسبة البُعد البُؤري إلى قُطر الفتحَة، فمثلاً إذا كان البُعد البُؤري للعدسة الشبكية لكاميرا ٥٠ مم، وقُطر الفتحة ١,٢٥ سم، فإنَّ العدَدَ البُؤريَّ $= \frac{50}{1.25} = 40$. ويُنظَّم الثقبُ تدفق الطاقة الضوئية إلى الأداة البصرية، فثقب أضيق تُصبح الصورة معتمَة أكثر دون كثير تغيّر فيها من التواحي الأخرى؛ كذلك فإنَّ الثقب يُساعد في تقليل الزوغان الذي سيُشرح فيما بعد.

حاجز المجال Field Stop

إنَّ حاجز المجال هو نوع من مُحدّدات الحُزْمَة الضوئية يُوضَع في مستوى الصورة للعدسة - الشكل ٣. ويُنظَّم حاجز المجال مجال النّظر المرئي بالأداة البصرية؛ وعند إنقاص قُطر حاجز المجال فإنَّ مجال الرؤية يضيق.

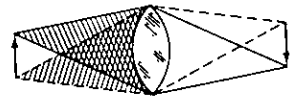


الشكل ٣: تترجم العدسة الفوارق الاتجاهية إلى فوارق مكانية، والعكس بالعكس. تشير الخطوط الغامقة إلى حاجز المجال.

ويُعرّف الحُجْم الزاوي لمجال الرؤية بزاوية القبول acceptance angle. ويتضح دور حاجز المجال عندما نأخذ بعين الاعتبار أنَّ من المَهَمَّات الرئيسة للعدسة ترجمة الفوارق في الاتجاهات إلى فوارق مكانية أو بالعكس.

البآبيء Pupils

البؤبؤ هو مقطع عرضي لحُزْمَة ضوئية تشترك فيه كلُّ أشعتها. وعندما يكون الجسم نُقْطَةً، يكون هنالك عدد غير مُتناهٍ من البآبيء بين الجسم والعدسة؛ أما إذا كان الجسم مُمتدّاً، فإنَّ هنالك مقطعاً عرضياً واحداً في الحُزْمَة، تختلط فيه كلُّ الأشعة الصادرة من جميع نقاط الجسم، وذلك البؤبؤ أي المقطع العرضي المُشترك هو فتحة العدسة - الشكل ٤. والآن، إذا وُضع حاجز ذو ثقب بين الجسم المُمتد والعدسة، فإنَّ ذلك الثقب يُصبح هو البؤبؤ - الشكل ٥. وفي تلك الحالة نرى أنَّ الثقب هو المقطع العرضي المُشترك لكلِّ الأشعة. ومن جهة أخرى، فإنَّ الضوء الصادر من نقاط مُختلفة في الجسم سيمرُّ عبر أجزاء مُختلفة من العدسة؛ ومن ثمَّ فإنَّ العدسة لا تكون هي البؤبؤ. وبالتحديد فإنَّ الثقب

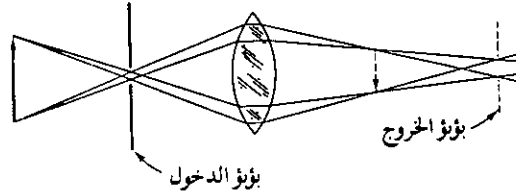


الشكل ٤: عدسة تعمل كالبؤبؤ

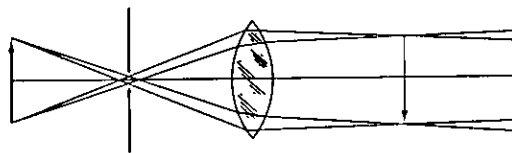
سيكون **بؤبؤ الدخول** entrance pupil، أما **بؤبؤ الخروج** exit pupil فيترافق مع **بؤبؤ الدخول** في فراغ الصورة. وفي التلسكوب أو الميكروسكوب تكون العدسة الشيئية نفسها **بؤبؤ الدخول**، ويكون **بؤبؤ الخروج** هو صورة العدسة الشيئية التي تتكون بالعدسة العينية. وكما نشاهد في الشكل ٥ توجد كثافة الضوء العظمى في ذلك المستوى، أي المستوى الذي ينبغي أن يوضع فيه **بؤبؤ العين**.

وللعدسة في الشكل ٥ وظيفتان: (١) فهي تكون صورة للجسم (أي تُسقط الجسم صورة) و (٢) تربط بين **بؤبؤ الدخول** و **بؤبؤ الخروج** المترافق معه. فإذا حرك **بؤبؤ الدخول** قريباً من العدسة، يتحرك **بؤبؤ الخروج** بعيداً عنها؛ وإذا كان محل **بؤبؤ الدخول** في المستوى البؤري الأول، كان **بؤبؤ الخروج** في ما لا نهاية. ومن ثم، فإن مسار الضوء يسمى المسار المركزي البعيد جهة الصورة - الشكل ٦. وبصورة مماثلة، فإذا وقع **بؤبؤ الخروج** في المستوى البؤري الثاني جهة الصورة، فإن **بؤبؤ الدخول** يكون في ما لا نهاية، ويقال للاداة البصرية إنها **تركز عن بُعد جهة الجسم telecentric on the object side**.

لقد رأينا أن العدسة في الشكل ٥ تؤدي غرضاً مزدوجاً، وهذا مبدأ يُستخدم غالباً في تصميم الأدوات البصرية. ونقدم فيما يلي مثلاً على ذلك مبدأ كهلر المستخدم للإضاءة الميكروسكوبات.



الشكل ٥: بؤبؤ الدخول و بؤبؤ الخروج

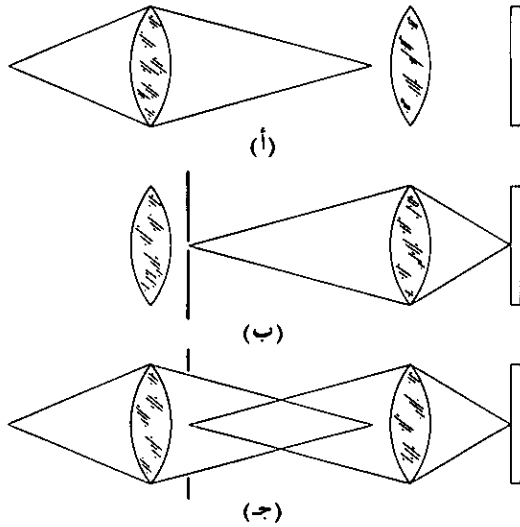


الشكل ٦: الاداة البصرية التي تركز جهة الصورة

* مَبْدَأُ كُوهْلَرِ Köhler's principle

يُمْكِنُ فَهْمُ مَبْدَأِ كُوهْلَرِ فِي الْإِضَاءَةِ أَحْسَنَ فَهْمٍ بِتَقْسِيمِهِ إِلَى خُطَوَتَيْنِ :

- ١ - يَجِبُ أَنْ يَكُونَ لِلْمِضْبَاجِ مَجَالٌ مُتَحَرِّكٌ أَوْ عَدْسَةٌ جَامِعَةٌ وَحَاجِزٌ بِهِ فَتْحَةٌ يَوْضَعُ أَمَامَ الْمِضْبَاجِ .
 أَنْقَلِ الْعَدْسَةَ الْجَامِعَةَ وَهِيَ فِي حَامِلِهَا إِلَى الْأَمَامِ وَإِلَى الْخَلْفِ ، حَتَّى تَخْصَلَ عَلَى صُورَةٍ مُرَكَّزَةٍ
 لِفِتِيلَةِ الْمِضْبَاجِ فِي مُسْتَوَى حَاجِزِ مَوْضُوعٍ تَحْتَ مُكْتَفَفِ الْمِيكْرُوسَكُوبِ - الشَّكْلُ ٧ أ .
 وَيُمْكِنُكَ بِاسْتِخْدَامِ وَرَقَةٍ تَوْضَعُ قَرِيبَةً مِنْ ذَلِكَ الْحَاجِزِ أَنْ تُسَهِّلَ تَرْكِيزَ الصُّورَةِ . ثُمَّ أَنْظُرْ إِلَى
 الصُّورَةِ الظَّاهِرَةِ عَلَى الْوَرَقَةِ مِنَ الْأَسْفَلِ .



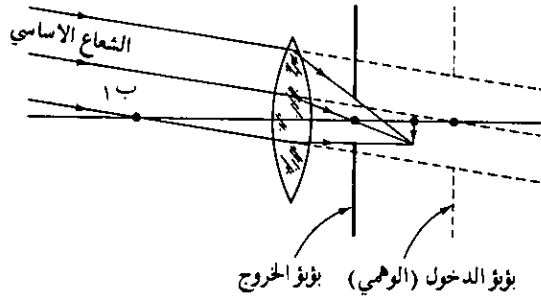
الشَّكْلُ ٧ : مَبْدَأُ كُوهْلَرِ فِي الْإِضَاءَةِ .

- ٢ - أَغْلِقْ فَتْحَةَ الْحَاجِزِ الْمَوْضُوعِ أَمَامَ مَصْدَرِ الضَّوءِ ، وَحَرِّكْ مُكْتَفَفَ الْمِيكْرُوسَكُوبِ إِلَى الْأَعْلَى وَإِلَى
 الْأَسْفَلِ ، حَتَّى تَظْهَرَ صُورَةُ تِلْكَ الْفَتْحَةِ فِي مُسْتَوَى عَيْنَةِ الْفَحْصِ - الرَّسْمُ ب مِنْ الشَّكْلِ ٧ . ثُمَّ
 أَنْظُرْ إِلَى الْعَدْسَةِ الْعَيْنِيَّةِ لِتَرَى تِلْكَ الصُّورَةَ ، وَعَدِّلْ بَعْدَ ذَلِكَ تِلْكَ الْعَدْسَةَ حَتَّى تَكُونَ صُورَةُ الْعَيْنَةِ
 الْمَفْحُوصَةِ specimen أَوْضَحَ مَا يُمْكِنُ تَرْكِيزًا . إِنَّ صُورَةَ فَتْحَةِ حَاجِزِ الْمِضْبَاجِ سَتَظْهَرُ مُتْرَاكِبَةً

على العينة ؛ وإذا لم تكن صورة فتحة الحاجز في مركز مجالي النظر، أملي المرآة على المنصّة بقدر ما يلزم؛ ثم افتح، وأغلق فتحة حاجز المصباح، فستشاهد أن صورتها في مستوى العينة المفحوصة تفتح وتغلق. أفتح الآن فتحة الحاجز حتى تُضيء مجال النظر كاملاً ؛ فإذا لم تتمكن من ذلك أزل العدسة الأمامية من المكثف أو المكثف بكامله.

أجمع الآن الخطوتين (١) و (٢) نتحصل على مبدأ كوهلر - الرسم جـ من الشكل ٧ الذي يُعرض هنا لتوضيح كيف تؤدي عدسة المكثف أي العدسة جهة اليمين في الشكل ٧ غرضين : فهي تملأ مجال العينة المفحوصة بالضوء، في نفس الوقت الذي تحصر فيه إضاءة المجال في الحجم المترافق مع فتحة الحاجز أمام المصباح ؛ كذلك فإن عدم الانتظام في توزيع شدة إضاءة المصدر لا تتسبب في عدم انتظام شدة إضاءة المجال . *

وإذا وُضِعَ حاجز ذو ثقب أمام عدسة، فإن ذلك الحاجز يُسمى الحاجز الأمامي ؛ وإذا ما وُضِعَ خلف العدسة سُمي الحاجز الخلفي. ويضبط الشعاع الذي يمر في مركز الثقب هو الشعاع الأساسي. وبالنسبة لحزمة ضوئية مائلة في سقوطها لا يعود الشعاع الأساسي يمر بمركز العدسة. ولما كان بؤبؤ الدخول وبؤبؤ الخروج مترافقين، فإن الشعاع الأساسي سيمر أيضاً بمركز بؤبؤ الخروج. وإذا كان الحاجز داخل البعد البؤري للعدسة، فإن الموضع المترافق - كما هو الحال في العدسة المكبرة - يقع في الجهة نفسها - الشكل ٨. وفي مجموعة بصرية معقدة، تتحدد الحزمة الضوئية عادة بعنصر واحد منها فقط ؛ وإذا كان الأمر كذلك، فإن بؤبؤ الدخول للمجموعة البصرية هو صورة ذلك الحاجز التي تكوّنوها العدسات السابقة للمجموعة ؛ أما بؤبؤ الخروج فيكون الصورة المتكوّنة بالعدسات اللاحقة للمجموعة.



الشكل ٨: إن الحاجز الخلفي الفعلي هو بؤبؤ الخروج ؛ أما بؤبؤ الدخول فهو صورته الوهمية.

بصريّات الألياف Fiber Optics

يُنكِرُ تَمْرِيرُ الضَّوئِ مِنْ دُونِ خَسَارَةٍ كَبِيرَةٍ بِانْعِكَاسِهِ عَنْ جُذُرَانِ أُسْطُوَانِيٍّ مَصْنُوعَةٍ مِنْ مَادَّةٍ شَفَافَةٍ. وَمِنْ السُّهُولَةِ مُشَاهَدَةُ ذَلِكَ عِنْدَ النَّظَرِ فِي اللَّيْلِ إِلَى نَافُورَةِ مَاءٍ مُضَاعَةٍ مِنَ الْأَسْفَلِ؛ إِذْ يَبْدُو الضَّوُّ حَقًّا أَنَّهُ يَتَّبِعُ مَسَارَاتِ الْمَاءِ الْمُثْنِيَّةِ. وَالْوَاقِعُ أَنَّ الضَّوَّ لَا يَنْحَنِي، وَلَكِنَّهُ يَنْتَقِلُ فِي مَسَارٍ مُتَعَرِّجٍ، وَيَنْعَكِسُ فِي كُلِّ مَرَّةٍ يَصُدُّ فِيهَا السَّطْحُ. وَإِذَا مَا اسْتُخْدِمَتْ أُسْطُوَانَاتٌ شَفَافَةٌ أَوْ أَلْيَافٌ، وَكَانَتْ نَوْعًا مَا رَفِيعَةً، أَمَكُنْ نَقْلُ صُورٍ بِاِكْمَالِهَا مِنْ دُونِ الْاِقْتِصَارِ عَلَى نَقْلِ الضَّوئِ فَقَط. وَهَذَا إِمكَانٌ اقْتَرَحَهُ أَوَّلُ الْأَمْرِ بَيْرْد * Baird عام ١٩٢٨. وَفِي يَوْمِنَا هَذَا طُوِّرَ هَذَا الْاِقْتِرَاحُ إِلَى فَرْعٍ جَدِيدٍ كَامِلٍ فِي عِلْمِ الْبَصَرِيَّاتِ يُدْعَى بَصَرِيَّاتِ الْأَلْيَافِ.

وَيَسْهُلُ كَثِيرًا الْانْعِكَاسُ عَنْ سَطْحِ اللَّيْفِ، وَمِنْ ثَمَّ انْتِقَالُ الضَّوئِ وَالصُّورِ إِذَا مَا غُطِّيَتْ الْأَلْيَافُ بِغِلَافٍ مُعَامِلُ انْكَسَارِهِ فِي أَحْسَنِ الْأَحْوَالِ يَقِلُّ عَنْ مُعَامِلِ انْكَسَارِ اللَّيْفِ؛ فَمِثْلُ ذَلِكَ يُوقِّرُ الْانْعِكَاسَ الدَّاخِلِيَّ الْكُلِّيَّ. وَفِي أَيَّامِنَا هَذِهِ تُصْنَعُ الْأَلْيَافُ الْبَصَرِيَّةُ بِهَذِهِ الطَّرِيقَةِ: فَهِيَ تَتَأَلَّفُ مِنْ قَلْبٍ مَرْكَزِيٍّ شَفَافٍ مَكْسُوبٍ بِعَازِلٍ مُعَامِلُ انْكَسَارِهِ - إِنْ أَمَكُنْ ذَلِكَ - أَقَلُّ بِكَثِيرٍ مِنْ مُعَامِلِ انْكَسَارِ الْقَلْبِ الْمَرْكَزِيِّ.

لِنَأْخُذْ أَوَّلًا أُسْطُوَانَةً عَازِلَةً مُعَامِلُ انْكَسَارِهَا m ، يَسْقُطُ عَلَيْهَا الضَّوُّ الْقَادِمُ مِنْ وَسْطِ مُعَامِلِ انْكَسَارِهِ M . بِزَاوِيَةِ سُقُوطٍ مَعَ مِخْوَرِهَا مِقْدَارُهَا α - الشَّكْلُ ٩؛ وَلْنَفَرِّضْ أَنَّ الْأُسْطُوَانَةَ مُحَاطَةً بِمَادَّةٍ عَازِلَةٍ مُعَامِلُ انْكَسَارِهَا m . فَطَالَمَا كَانَتْ زَاوِيَةُ السَّقُوطِ عَلَى السَّطْحِ الْفَاصِلِ بَيْنَ الْأُسْطُوَانَةِ وَغِلَافِهَا أَيْ زَاوِيَةَ γ أَكْبَرَ مِنَ الزَّاوِيَةِ الصَّغْرَى لِلانْعِكَاسِ الدَّاخِلِيِّ الْكُلِّيِّ، فَإِنَّ الضَّوَّ يَظَلُّ مَحْصُورًا دَاخِلَ الْأُسْطُوَانَةِ حَتَّى يَخْرُجَ مِنْ طَرَفِهَا الْآخِرِ؛ أَمَّا إِذَا كَانَتْ α كَبِيرَةً جَدًّا، فَإِنَّ الضَّوَّ يَنْقُدُ إِلَى غِلَافِ الْأُسْطُوَانَةِ وَيَتَبَدَّدُ.

وَمِنْ تَعْرِيفِ الزَّاوِيَةِ الصَّغْرَى لِلانْعِكَاسِ الدَّاخِلِيِّ الْكُلِّيِّ، وَمِنْ الرَّسْمِ، نَحْصُلُ عَلَى:-

$$\text{جا } \gamma = \frac{m}{M} = \frac{1}{2} \dots\dots\dots \frac{b}{a} \quad [١:٥-١]$$

* ج. ل. بيرد، براءة الاختراع البريطانية رقم ٢٨٥٧٣٨، ١٥ شباط ١٩٢٨.

وَأُفٍّ = أُفٍّ + جُفٍّ + ...

$$\frac{ج}{٢١} + \frac{ب}{٢١} = ١ \text{ ، أي :}$$

$$r\left(\frac{r}{r}\right) - 1 = r\left(\frac{\text{ب}}{\text{ب}}\right) - 1 = r\left(\frac{\text{ح}}{\text{ح}}\right)$$

$$\dots \beta_j = \sqrt{\left(\frac{r_j}{1_j}\right) - 1} = \frac{r_j}{1_j}$$
$$\dots \sqrt{r^2 - 1^2} = \sqrt{\left(\frac{r^2}{1^2}\right) - 1} \sqrt{1} = \beta \text{ جا } 1, \alpha \text{ جا } 1$$

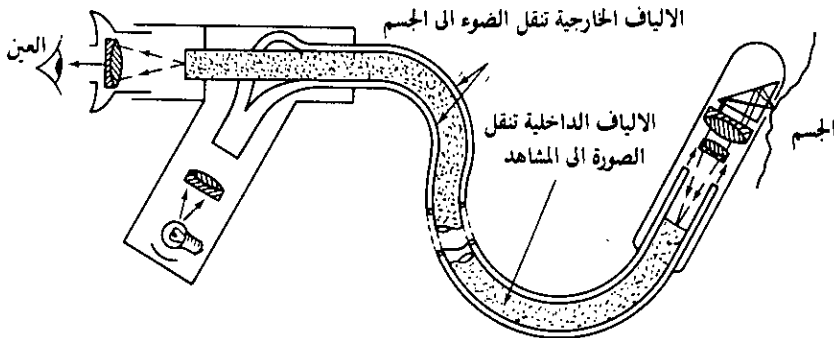
The diagram shows a three-layer system with a central layer of thickness $2l$ and two outer layers of thickness $2r$. An incident ray from the left strikes the interface between the outer and central layers at an angle α . Part of the ray is reflected back at an angle α . The transmitted ray enters the central layer at an angle β , reflects off the interface with the bottom layer at an angle γ , and then refracts back into the top layer at an angle δ . The central layer is labeled with $2l$ and the outer layers with $2r$.

— ۱۱۱ —

تطبيقات

يُمْكِنُ سَخْبُ الألياف رَفيعةً جداً إلى أَقطارٍ تَبْلُغُ بَضْعَةَ أَجزاءٍ مِنْ أَلْفٍ مِنْ المِيلِيْمِترِ (١.٠٠٠ مم) فَقَطْ. وَلِيُمَثِّلِ هَذِهِ الأليافُ تَطْبِيقَاتٍ مُتَنَوِّعةً وَاسِعَةً، وَرُبَّمَا يَكُونُ أَبْسَطُ تَطْبِيقَاتِهَا نَقْلَ الضَّوءِ إِمَّا لِإِضاءةِ أَمَاكِنَ يَضَعُ أَنْ يَصِلَ إِلَيْهَا وَإِمَّا لِتَوْصِيلِ الضَّوءِ مِنْ تِلْكَ الأَمَاكِنِ إِلَى خَلِيَّةٍ كَهْرَوَضَوِيَّةٍ مَوْضُوعَةٍ فِي مَكَانٍ يُمْكِنُ الوُصُولُ إِلَيْهِ بِيسْرٍ.

وَلَعَلَّ المِجْهَرَ اللَّيْفِيَّ اللَّدَنَ flexible fiberscope مِنْ أَشْبَحِ تِلْكَ التَّطْبِيقَاتِ؛ وَيُمْكِنُ صُنْعُ هَذَا المِجْهَرِ بِطَوِيلٍ قَدْ يَصِلُ ٤ م، وَمِسَاحَةٍ مَقْطَعٍ عَرْضِيٍّ تَبْلُغُ ١ سم، وَبَعْدَدٍ مِنْ الأليافِ قَدْ يَصِلُ ٥٠,٠٠٠ لِف. وَتُسْتَخْدَمُ بَعْضُ تِلْكَ الأليافِ لِتَوْصِيلِ الضَّوءِ إِلَى تَجْوِيفٍ يُرَادُ فَحْصُهُ، كَذَلِكَ تُسْتَخْدَمُ الأليافُ الأُخْرَى إِلَى إِرْجَاعِ الصُّورَةِ إِلَى المُشَاهِدِ - الشَّكْل ١٠. وَيُشَبِّهُ المِجْهَرَ اللَّيْفِيَّ بَعْضَ الشَّيْءِ المِيكْرُوسْكُوبُ تَحْتَ الجِلْدِيِّ ذُو الأليافِ البَصْرِيَّةِ fiber-optic hypodermic microscope؛ وَلَكِنَّهُ أَضْعَفُ حَجْماً مِنَ المِجْهَرِ اللَّيْفِي، مِمَّا يَسْمَحُ بِاسْتِخْدَامِهِ لِلْفَحْصِ البَصْرِيِّ المَبَاشِرِ لِلْخَلَايَا الْحَيَّةِ وَالْأَنْسِجَةِ دَاخِلَ الجِسْمِ *.



الشكل ١٠: المجهر الليفي اللدن

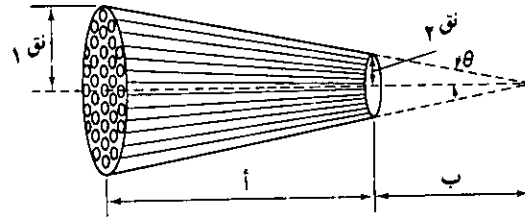
وَإِذَا كَانَتِ الأليافُ رَفيعةً جَدًّا وَذَاكَ أَقطارٍ مِنْ نَفْسِ رُبْنَةِ طَوِيلٍ مُوجَّةِ الضَّوءِ، فَلَا يُمْكِنُ أَعْتَابُهَا بَتَاتًا أَنَايِبَ ضَوْيَّةً؛ بَلْ تُعْتَبَرُ بِذَلِكَ كَالْأَدِلَّةِ المَوْجِيَّةِ wave guide، فَتَنْقُلُ الطَّاقَةَ الضَّوْيِيَّةَ ذَاتِ الأنْمَاطِ المُعْقَدَةِ الَّتِي لَا يُمْكِنُ فَضْلُ نَمَطِ مِنْهَا عَنِ الْآخَرِ.

* ش. لونغ II، أ. بروشكو، ود. أ. بونتريلي: «الميكروسكوب تحت الجلد ذو الألياف البصرية»، مجلة Applied Optics، ٣ (١٩٦٤)، ١٠٣١-١٠٣٢.

وَيُظْهِرُ الضَّوُّ الْخَارِجُ مِنْ تِلْكَ الْأَلْيَافِ عَلَى هَيْئَةِ كِمِيَّاتٍ مُرَكَّزَةٍ مِنَ الطَّاقَةِ تُسَمَّى الْأَنْمَاطَ أَوِ الصِّبْغِ الطَّاقِيَّةَ **modes**. كَذَلِكَ فَكَلَّمَا أَصْبَحَ اللَّيْفُ أَرْفَعَ، انْتَقَلَ مَزِيدٌ مِنَ الطَّاقَةِ خَارِجَ الْمُوَصِّلِ الضَّوِّيِّ بَدَلَ الْإِنْتِقَالِ فِي دَاخِلِهِ؛ وَمِنْ ثَمَّ فَإِنَّ انْتِقَالَ الضَّوِّ عَبْرَ لَيْفٍ مَا يُمَكِّنُ أَنْ يُشِيرَ رَدَّ فِعْلٍ فِي لَيْفٍ آخَرَ، وَهِيَ ظَاهِرَةٌ تُشَبِّهُ مَا هُوَ مَعْرُوفٌ فِي تِكْنُولُوجِيَا الْمَيْكْرُووَيْفِ.

وَيُمْكِنُ اسْتِخْدَامُ أَيِّ حَشْدٍ مِنَ الْأَلْيَافِ الْمُسَوَّجَةِ عَشَوَاتِيًّا فِي تَرْكِيبِ الْمَعْلُومَاتِ الْبَصَرِيَّةِ وَتَفْكِيكِهَا **Coding and decoding**؛ وَإِذَا مَا شُوْهِدَ جِسْمٌ مِنْ خِلَالِ هَذَا الْحَشْدِ مِنَ الْأَلْيَافِ أُمْكِنَ اسْتِقْبَالُ نَمِطٍ مِنَ الْمَعْلُومَاتِ الْبَصَرِيَّةِ لَا يُمَكِّنُ التَّعَرُّفُ إِلَيْهِ فِي الظَّرْفِ الْآخَرِ أَيُّ عِنْدَ عَيْنِ الْتَاظِرِ؛ وَإِذَا مَا أُعِيدَ ذَلِكَ التَّمِطُ بِخُزْمَةِ الْأَلْيَافِ نَفْسِهَا أَوْ بِخُزْمَةٍ مُمَازِلَةٍ، فَإِنَّهُ سَيُحَوَّلُ إِلَى صِفَتِهِ الْأَصْلِيَّةِ.

وَيُمْكِنُ تَكْبِيرُ الصُّورَةِ الَّتِي تُنْقَلُ بِاللَّيْفِ أَوْ إِزَالَةُ تَكْبِيرِهَا فِي حُدُودٍ مُعَيَّنَةٍ، إِذَا كَانَ كُلُّ لَيْفٍ (أَوْ خُزْمَةُ الْأَلْيَافِ بِكَامِلِهَا) مُسْتَدِقَّ الظَّرْفِ أَوْ مَخْرُوطِيًّا؛ فَالْخُزْمَةُ اللَّيْفِيَّةُ مِنْ حَيْثُ تَأْثِيرُهَا تَعْمَلُ عَمَلَ قِنَمَجٍ ضَوْئِيٍّ؛ فَهِيَ تُجَمِّعُ الضَّوِّ مِنْ مَسَاحَةٍ مَا وَتُرَكِّزُهُ فِي مَسَاحَةٍ أَصْغَرَ. وَإِذَا كَانَ نَقْ ١ نِصْفَ قُطْرِ فَتْحَةِ الدَّخُولِ لِلْقِمْعِ، وَنَقْ ٢ نِصْفَ قُطْرِ فَتْحَةِ الْخُرُوجِ، فَإِنَّا نَجِدُ مِنَ الرَّسْمِ فِي الشَّكْلِ (١١) أَنَّ:-



الشكل ١١: القِمْعُ الضَّوِّيُّ

$$[١: ٥-٥] \quad \frac{1}{\text{نق} ٢} = \frac{أ + ب}{ب} = \frac{1}{\text{نق} ١} \dots \dots \dots$$

وَبِمُقَارَنَةِ شِدَّتَيْ الضَّوِّ عِنْدَ الظَّرْفَيْنِ، وَبِإِهْمَالِ أَيِّ فُقْدَانٍ فِي انْتِقَالِ الضَّوِّ نَجِدُ أَنَّ:

[١:٥-٦]

$$\frac{ش٢}{ش١} = \frac{أ١}{أ٢} \dots\dots$$

حيث أ_١ وأ_٢ هما مساحتا المَقْطَعَيْنِ العَرَضِيَّيْنِ وش_١، ش_٢ هما شِدَّتَا الإِضَاءَةِ عِنْدَهُمَا.

اقتراحات لقراءات اضافية

N. S. Kapany, *Fiber Optics, Principles and Applications* (New York: Academic Press, Inc., 1967).

W. P. Siegmund, "Fiber Optics," in *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. IV, *Optical Instruments*, ed. R. Kingslake (New York: Academic Press, Inc., 1967), Part I, 1-29.

المسائل

- ١-٥:١ جُهِّزَتِ العَدْسَةُ الشَّيْثِيَّةُ لِكَامِيرَا التِّي يَبْلُغُ بُعْدُهَا الْبُورِي ٥٠ سم، بحيثُ كَانَتْ فَتْحَتُهَا تُسَاوِي $\frac{ع}{٤}$ ؛ فَإِذَا جُهِّزَتِ الْكَامِيرَا لِأَخْذِ صُورَةٍ مُرَكَّزَةٍ لِجِسْمٍ عَلَى بُعْدٍ ٢٠ سم عَنْهَا، فَمَا الْعَدْدُ الْبُورِي الْفَعَالُ لَعَدْسَتِهَا؟
- ٢-٥:١ إِذَا كَانَ $\frac{١}{١٠٠}$ مِنَ الثَّانِيَةِ هُوَ زَمَنُ التَّعْرِيطِ الصَّحِيحِ لِحَاجِزِ عَدْسَةٍ جُهِّزَتِ عَلَى (ع/٣,٥). فَجِدْ زَمَنَ التَّعْرِيطِ الْإِلَازِمَ عِنْدَ تَجْهِيْزِ الْعَدْسَةِ عَلَى (ع/٢٢)، عِلْمًا أَنَّ زَمَنَ التَّعْرِيطِ الْإِلَازِمَ يَتَنَاسَبُ تَنَاسُبًا عَكْسِيًّا مَعَ مَسَاحَةِ الْمَقْطَعِ الْعَرَضِيِّ لِحُزْمَةِ الضَّوءِ الَّتِي تَسْمَحُ أَلْعَدْسَةُ بِتَمْرِيرِهَا.
- ٣-٥:١ لَدَيْكَ عَدْسَةٌ رَقِيْقَةٌ بُعْدُهَا الْبُورِي ٥٠ سم وَفُطْرُهَا ٤ سم. وَضِعْ حَاجِزَ بَفْثَحَةٍ دَائِرِيَّةً فُطْرُهَا ٢ سم عَلَى بُعْدٍ ٣ سم إِلَى يَسَارِ الْعَدْسَةِ، كَمَا وَضِعْ جِسْمٌ نَقْطَةً عَلَى الْمِخْوَرِ وَعَلَى بُعْدٍ ٢٠ سم إِلَى يَسَارِ الْحَاجِزِ.
- (أ) أَيُّ مِنَ الْاِثْنَيْنِ: فَتْحَةُ الْحَاجِزِ أَمْ فَتْحَةُ الْعَدْسَةِ يُقَيَّدُ مُرُورَ الضَّوءِ عَبْرَ هَذِهِ الْمَنْظُومَةِ؟

ب) ما العدْدُ البُورِيُّ الفَعَالُ للمَنْظُومَةِ؟

ج) أين وعلى أيَّة مسافَةٍ من العدْسَةِ يُوجَدُ بُؤْيُ الخُروجِ؟

٤-٥:١ مَنظُومَةٌ بَصَرِيَّةٌ تتألَّفُ من عَدَسَتَيْنِ، تَبْعُدُ الواحِدَةَ عن الأُخْرَى ١٠ سم؛ البُعْدُ

البُورِيُّ للعدْسَةِ الأولى + ١٠ سم وقُطْرُهَا ٥ سم، أما العدْسَةُ الثَّانِيَةُ فَبُعْدُهَا

البُورِيُّ - ٢٠ سم وقُطْرُهَا ٣ سم. فإذا وُضِعَ في مُنْتَصَفِ المسافَةِ بَيْنَ العدْسَتَيْنِ

ثُقْبٌ قُطْرُهُ ١ سم، فَبَدَّ مَوْقِعِي بُؤْيِي الدُّخُولِ والخُروجِ وقُطْرِيهِمَا؟

٥-٥:١ ثُقْبٌ دائِرِيٌّ قُطْرُهُ ١ سم يَعْمَلُ عَمَلُ بُؤْيٍ دُخُولٍ، وَوُضِعَ في مُنْتَصَفِ المسافَةِ بَيْنَ

مَصْدَرِ ضَوْئِي مُمْتَدِّ وَعَدْسَةِ بُعْدُهَا البُورِيُّ ١٠ سم تَكُونُ صُورَةُ للمَصْدَرِ على

سِنَارَةٍ تَبْعُدُ ١٤ سم من العدْسَةِ؛ فَبَدَّ قُطْرُ بُؤْيِ الخُروجِ.

٦-٥:١ عَدَسَتَانِ رَقِيقَتَانِ: بُعْدَاهُمَا البُورِيَّانِ + ١٠ سم و + ٦ سم على الترتيب، وَفُتِحَتْ

كُلٌّ مِنْهُمَا ٥ سم، وَوُضِعَتَا بِحَيْثُ كَانَتِ المسافَةُ بَيْنَهُمَا ٤ سم؛ ثُمَّ وُضِعَ ثُقْبٌ

قُطْرُهُ ٢ سم في مُنْتَصَفِ المسافَةِ بَيْنَ العدْسَتَيْنِ، كما وَضِعَ جِسْمٌ ارْتِفَاعُهُ ٤ سم

أمام العدْسَةِ الأولى بِحَيْثُ كَانَ بُعْدُ مَرْكَزِهِ عَنْهَا ١٠ سم، فَبَدَّ:

أ) مَوْقِعَ بُؤْيِ الدُّخُولِ وقُطْرَهُ.

ب) مَوْقِعَ بُؤْيِ الخُروجِ وقُطْرَهُ.

ج) مَوْقِعَ الصُّورَةِ النَّهَائِيَةِ بِرَسْمِ الشُّعَاعَيْنِ الْمُتَطَرِّقَيْنِ (الْحَدِيثَيْنِ) وَالشُّعَاعِ

الْأَسَاسِيِّ مِنْ أَعْلَى نَقْطَةٍ فِي الْجِسْمِ.

٧-٥:١ تَقُومُ العدْسَةُ فِي كَثِيرٍ مِنَ الآلَاتِ البَصَرِيَّةِ بِوُضُوعَيْنِ فِي نَفْسِ الْوَقْتِ، بَيْنَ

بِالِاسْتِعَانَةِ بِرَسْمِ شُعَاعِيٍّ كَيْفَ يُسْتَخْدَمُ هَذَا الْمَبْدَأُ فِي تَصْمِيمِ عَارِضِ الشَّرَاحِ.

[مُلاحَظَةٌ: تُسْتَخْدَمُ عَادَةً عَدْسَةٌ ذَاتُ مَقْطَعٍ عَرْضِيٍّ أَكْبَرَ مِنْ شَرِيحَةِ الْعَارِضِ

لِتَكُونِ صُورَةُ لِمَصْدَرِ الضَّوءِ أَمَامَ عَدْسَةِ الْإِسْقَاطِ أَوْ الْعَرَضِ].

٨-٥:١ إِذَا وُجِّهَتِ الْكَامِيرَا ذَاتُ الثُّقْبِ إِلَى الْأَعْلَى، وَكَانَتْ مَمْلُوءَةً بِالماءِ، فَإِنَّا

نَحْصِلُ بِشَكْلِ خَاصٍّ عَلَى مَجَالِ رُؤْيَا وَاسِعٍ، فَمَا الَّذِي يُحَدِّدُ مَجَالَ الرُّؤْيَا فِي

هَذِهِ الْحَالَةِ؟ وَمَا التَّغْيِيرُ الَّذِي يَحْدُثُ لَوُ مُلْتِ الْكَامِيرَا بَدَلِ الْمَاءِ بِسَائِلِ مُعَامِلٍ

انْكِسَارِهِ أَكْبَرَ مِنْ مُعَامِلِ انْكِسَارِ الْمَاءِ؟

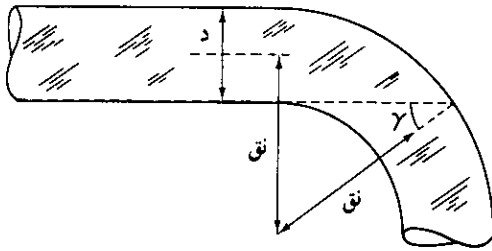
٩-٥:١ ليف بصري قلبه من الصوان الكثيف الذي معامل انكساره ١,٦٦ ومكسو

بغلاف من الزجاج التاجي الذي معامل انكساره ١,٥٢؛

فما أكبر فتحة زاوية (أي نصف زاوية رأس مخروط الضوء الداخل إلى الليف) للضوء المثقل عبر الليف المستقيم؟ لا تتجاهل انكسار الضوء عند دخوله الليف.

١٠-٥:١ سقط ضوء متواز على ليف بصري قطره د. فبالرجوع إلى الشكل ١٢ حدد

أصغر نصف قطر نق يمكن أن يحنى إليه الليف في المسألة ٩-٥:١؟ لاحظ أن γ ينبغي أن تكون ذات مقدار مناسب ليتم حدوث الانعكاس الداخلي الكلي.



الشكل ١٢

١١-٥:١ ليف قطره قلبه ٠,٥ مم ومعامل الانكسار لقلبه ١,٥٢ ولغلافه ١,٦٦؛ فما

أقل نصف قطر يمكن أن يحنى إليه الليف من دون أي فقدان بالغ للضوء الداخل إليه؟

١٢-٥:١ إذا كان لديك ليف أسطواني؛ وجهاه عند الطرفين مستويان ومتعامدان على

محوره البصري، فإن زاوية خروج الضوء من الليف تساوي زاوية سقوطه عليه؛ فهل تنطبق هذه النتيجة في حالة الألياف المخروطية التي تستخدم للحصول على درجة تكبير متوسطة؟ افترض أن قطر الليف ٠,٥ مم، وطوله ٢٥ مم، وتكبيره $\times 2$.

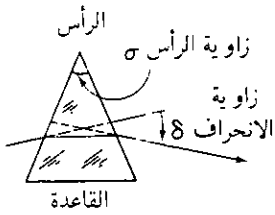
الفصل ١ : ٦

المواشير وتحليل الضوء

Prisms and Dispersion

نَبَحْتُ في هذا الفصلِ الموشوراتِ وتأثيراتها في الضوءِ أحاديِّ الموجةِ (الانحراف) وفي الضوءِ الذي يحوي أكثرَ من موجةٍ واحدةٍ (التحليل).

الموشورات

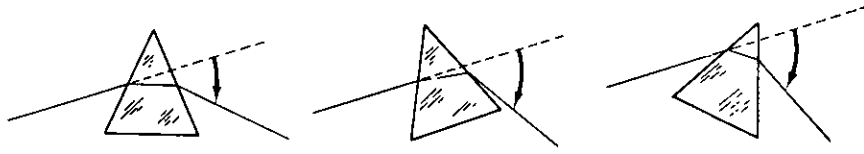


الشكل ١ : عناصر الموشور

بخلاف الشريحة متوازية الوجهين ، فإنَّ الضوءَ المارَّ في الموشور لا يُزاح بل ينحرفُ ، وتُسمَّى حافتهُ الموشور التي يلتقي عندها السطحان البصريَّان برأسِ الموشور apex - الشكل ١ ، وتُعرَّفُ زاويةُ الرأسِ التي تُسمَّى أيضاً بزاوية الكسْرِ أو زاوية الموشور apex angle بأنها الزاويةُ بين السطحين البصريَّين ، ويُسمَّى الوجهُ المقابلُ للرأسِ بقاعدةِ الموشور ، ويربطُ بين رأسِ الموشور وقاعدته خطُّ القاعدة - الرأسِ أو مُستوى القاعدة - الرأسِ . وإذا سقطَ الضوءُ على السطحِ الأولِ للموشور بزاوية سقوطٍ تختلفُ عن ٩٠° ، فإنه ينكسرُ ؛ كما ينكسرُ الضوءُ عادةً عن سطحهِ الثاني ، ويُسمَّى الانحرافُ الكليُّ للضوءِ بزاوية الانحرافِ the angle of deviation .

معادلة الموشور Prism equation

عند إدارة الموشور حول محورٍ موازٍ للرأسِ كما في الشكل ٢ ، نجدُ أنَّ زاوية الانحرافِ تتغيَّرُ ؛ وهي تأخذُ قيمتها الصغرى عندما يمرُّ الضوءُ في الموشور مُروراً تماثلياً .



الشكل ٢: يأخذ الانحراف المشار اليه بسهم غامق ثخين قيمة صغرى - الرسم الى اليسار - عندما يمر الضوء في الموشور تماثلياً .

وفي تلك الحالة كما يُظهِر الرَّسْمُ في الشكل ٣ ، نَجِدُ أنَّ :-

$$\frac{\sigma}{\tau} = {}_r\alpha = {}_1\beta \quad {}_r\beta = {}_1\alpha$$

$$\frac{\sigma}{\tau} - {}_r\beta = {}_r\alpha - {}_r\beta = \frac{\delta}{\tau} = {}_r\delta = {}_1\delta$$

وَمِنْهَا نَجِدُ أَنَّ :-

$$\frac{\delta}{\tau} + \frac{\sigma}{\tau} = {}_r\beta$$

وَإِذَا كَانَ مُعَامِلُ انكسارِ الموشورِ وَمُعَامِلُ انكسارِ الوَسْطِ خَارِجَهُ م . ، فنَجِدُ مِنْ قَانُونِ سَنِيَلْ أَنَّ :-

$$\frac{م}{.م} = \frac{\text{جا } {}_r\beta}{\text{جا } {}_r\alpha} \text{ ، أو }$$

$$\text{جا } {}_r\beta = \frac{م}{.م} \text{ جا } {}_r\alpha \dots\dots [١-٦:١]$$

وَبِالتَّعْبِيرِ عَنْ β ، α بِدَلَالَةِ σ ، δ تُصْبِحُ الْمَعَادِلَةُ [١-٦:١] عَلَى التَّحْوِ التَّالِي :-

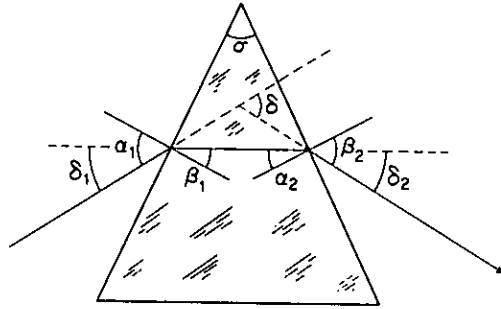
$$\text{جا } \left(\frac{\sigma}{\tau} \right) = \frac{م}{.م} \text{ جا } \left(\frac{\delta + \sigma}{\tau} \right)$$

أَيُّ :-

[٢-٦:١]

$$\frac{\text{جا } \frac{1}{2} (\delta + \sigma)}{\text{جا } \frac{1}{2} \sigma} = \frac{m}{1} \dots\dots$$

حيث σ هي زاوية الرأس و δ هي زاوية الانحراف الأصغر.



الشكل ٣: اشتقاق معادلة الموشور للانحراف الاصغر

وتبدو المعادلة السابقة على نحو أكثر بساطة للموشور النحيف، ذلك لأن جيبتي σ و δ صغيران، وفي هذه الحالة يمكن اعتبار قيمة الجيب مساوية للزاوية نفسها عند قياسها بالتقدير الدائري. وإذا كان الأمر كذلك، وكانت قيمة $m = 1$ ، تُبسّط المعادلة [٢-٦:١] إلى:-

$$m \approx \frac{\delta + \sigma}{\sigma}, \text{ وهي مكافئة لـ: -}$$

[٣-٦:١]

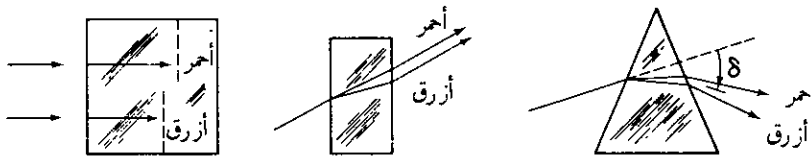
$$\delta \approx (1-m) \sigma \dots\dots$$

لاحظ أن صفة الكسر للموشور كمية متجهة، فهي تُدَّكَّرنا نوعاً ما بمصفوفة الانكسار R التي تصف الدوران. إنَّ متجه الانكسار يقع في وسط عموديين على الشعاع الساقط ويتجه صوب قاعدة الموشور، شريطة أن يكون الموشور ذا معامل الانكسار الأعلى؛ كذلك تُجمع قوى الكسر لمواشير نحيفة جمعاً متجهياً. وتُسمى وحدة قوة الكسر للموشور بـ السنتراد

Centrad التي يُرمز لها بالرمز ^٢ ، وتُعرف أنها القوّة التي تُسبب انحرافاً في الضوء بمقداره $\frac{1}{100}$ زاوية نصف قطرية. أي أن الموشور الذي له ^٢ ١ يعرف الضوء على مسافة متر انحرافاً يساوي ١ سم ، أما الموشور ^٢ ٤ فيخرف الضوء عند مسافة ٥ م بمقدار ٢٠ سم. أما ديوبترات الموشور prism diopters التي يُرمز لها بالرمز ^د فهي مشابهة للسنتراد، ولكنها مفيدة فقط للموشورات الخفيفة.

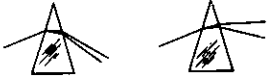
تحليل الضوء Dispersion

تختلف درجة الانحراف باختلاف أطوال الموجات الضوئية. حقاً فالشريحة الزجاجية متوازية الوجهين يُمكن استخدامها لفصل ألوان الضوء المختلفة. فعند سقوط الضوء عمودياً عليها تتخلف الجبهات الموجية القصيرة أي موجات اللون الأزرق عن الجبهات الموجية للون الأحمر - الشكل ٤ ؛ أما إذا سقط الضوء عليها مائلاً، فيحدث بعض الفصل الجانبي للألوان - الرسم في الوسط ؛ غير أن ظاهرة الفصل هذه تكون أكثر وضوحاً في حالة الموشور - الرسم إلى اليمين.



الشكل ٤ : تحليل الضوء بشريحة زجاجية (الرسم إلى اليسار)، شريحة متوازية الوجهين (الرسم في الوسط)، وبالموشور (الرسم إلى اليمين).

وفي الهواء يكون هنالك تحليل طفيف للضوء؛ أما في الفراغ فلا يكون هنالك أي تحليل. ويمكن رؤية ذلك عند مشاهدة النجم المغمم في نجم ثنائي مخسوف عندما يمر أمام رفيقه الأكثر سطوعاً؛ إذ في تلك اللحظة تختفي جميع الألوان، ثم تظهر معاً في نفس الوقت، ذلك لأنه إذا كانت سرعة لون ما أكبر من سرعة لون آخر، فإن الانخفاض في شدة الإضاءة النجمية stellar intensity عند ذلك اللون المتخلف سيكون أمامه الوقت الكثير في



الشكل ٥: موشورات ذات قوى تحليل مختلفة: الى اليسار انكسار مرتفع وتحليل منخفض ؛ والى اليمين انكسار منخفض وتحليل عالٍ.

سنوات السفر العديدة إلى الأرض لِيَتَقَدَّمَ الألوان الأخرى. وَقَدْ خَمَّنَ نِيوتُن أنَّ التحليل يَتَنَاسَبُ مَعَ الانكسار؛ فالموادُّ التي مُعَامِلُ انكسارِها أَكْبَرُ لها قُدْرَةُ تَحْلِيلٍ أَكْبَرُ مُعْطِيَةً بِذَلِكَ فَضْلاً أَوْسَعَ لألوان الطيف. وَلَكِنَّ آلانكسار والتحليل لَا يَرْتَبِطَانِ بِعِلَاقَةٍ بَسِيطَةٍ. فَبَعْضُ المَوَادِّ لها مُعَامِلُ انكسارٍ مُرتَفِعٌ وَتَحْلِيلٌ طَفِيفٌ، بَيْنَمَا هُنَاكَ مَوَادُّ لها مُعَامِلُ انكسارٍ مُنْخَفِضٌ وَتَحْلِيلٌ عالٍ. وَبِاخْتِيَارِ المَوَادِّ اخْتِيَاراً صَحِيحاً، يُمَكِّنُ جَعْلُ المَوَاشِيرِ ذاتِ صِفَةٍ مُغَايِرَةٍ تَمَاماً لِمَا أَعْتَقَدَ نِيوتُن أنَّه مُمَكِّنُ - الشكل ٥؛ وَمِنْ ثَمَّ يَلْزَمُنَا قِيَاسُ عَدَدِي لِيُوصَفَ تِلْكَ الصِّفَةُ. وَقَدْ جَرَتْ العَادَةُ أَنْ تُشِيرَ إِلَى أطوالٍ مُوجِيَّةٍ ثَلَاثَةٍ مُعْرِفَةٍ تَمَاماً تَقَعُ فِي الطيفِ المَرْتَنِيِّ، وَكُلُّ مِنْهَا يُوَصَفُ بِخَطٍّ مِنْ خُطُوطِ فِرُونهوفر Fraunhofer line *، وهذه الخُطُوطُ هِيَ: خَطُّ F الأزرقِ الذي طَوْلُ مَوْجَتِهِ $\lambda \approx 486$ نَم وَالَّذِي يُعَرَّفُ مُعَامِلُ الانكسارِ n_F ، وَخَطُّ الصُّوْدِيومِ الأَصْفَرِ D حَيْثُ $\lambda \approx 589$ نَم وَيُعَرَّفُ n_D ، وَخَطُّ C الأحمرِ حَيْثُ $\lambda \approx 656$ نَم وَيُعَرَّفُ n_C .

وَيُسَمَّى التَّحْلِيلُ عَبْرَ الطَّيْفِ المَرْتَنِيِّ الكَامِلِ أَوْ فَارَقُ مُعَامِلِ الانكسارِ $n_F - n_C$ بِالتَّحْلِيلِ C-F. وَتَتَغَيَّرُ النِّسْبَةُ بَيْنَ آلانكسار والتحليلِ تَغْيِراً وَاسِعاً لِلْمَوَادِّ المُخْتَلِفَةِ، وَيُمْكِنُ التَّعْبِيرُ عَنْهَا بِالمُعَادَلَةِ التَّالِيَةِ:

[٤-٦٠١]

$$\frac{n_F - n_C}{n_D - 1} = \Delta \dots\dots$$

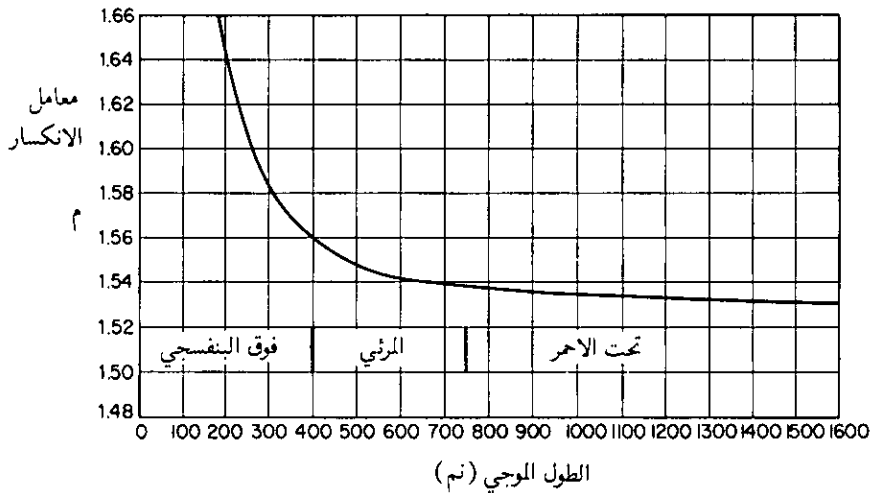
حَيْثُ Δ هُوَ التَّحْلِيلُ النِّسْبِيُّ أَوْ قُوَّةُ التَّحْلِيلِ dispersive power. وَمِنَ القِيَمِ المِثْلَةِ لِي Δ مَا يَلِي: $\frac{1}{5}$ أَوْ ٠,٢، لِلزُّجَاجِ التَّاجِيِّ الَّذِي لَهُ قُوَّةُ تَحْلِيلٍ مُنْخَفِضَةٌ، $\frac{1}{3}$ أَوْ ٠,٣٣، لِلزُّجَاجِ الصُّوَانِيِّ الَّذِي لَهُ تَحْلِيلٌ عالٍ؛ وَيُسَمَّى المِقْدَارُ $\frac{1}{\Delta}$ الَّذِي يُرْمَزُ إِلَيْهِ أحياناً بِالرَّمْزِ γ بِعَدَدِ أَبِي Abbe. وَيُظْهِرُ الجَدْوَلُ ١ قَائِمَةً بِمُعَامِلَاتِ الانكسارِ الَّتِي يُمَكِّنُ مِنْهَا حِسَابُ التَّحْلِيلِ وَقُوَّةُ التَّحْلِيلِ لِأَهَمِّ نَوْعَيْنِ مِنَ الزُّجَاجِ. أَمَّا الشَّكْلُ ٦ فَيَقْدِّمُ رَسْماً مُمَثِّلاً لِلتَّحْلِيلِ أَيْ رَسْماً بِمُعَامِلِ انكسارِ مَادَّةٍ شَفَافَةٍ فِي مُقَابِلِ الطُّوْلِ المَوْجِي. وَنُلاحِظُ مِنَ الشَّكْلِ أَنَّ: - (أ) مُعَامِلُ الانكسارِ يَزْدَادُ بِتَقْصَانِ الطُّوْلِ المَوْجِيِّ وَ (ب) مُعَدَّلُ الزِّيَادَةِ فِي

* سَتُبَحِّثُ هَذِهِ بِمَزِيدٍ مِنَ التَّفْصِيلِ فِي فَصْلِ الاتِّصَاصِ.

مُعامل الانكسار تَکبُرُ عِندَ الأطوالِ الموجيةِ القصيرةِ، أيّ بعبارةٍ أخرى يَزْدادُ مِثْلُ المُنحنى الذي يُقاسُ بِـ $\frac{f}{\lambda}$ في اتجاهِ الأطوالِ الموجيةِ القصيرةِ.

أجدولُ ١ : مُعاملاتُ الانكسارِ للزجاجينِ التاجي والصواني عِندَ أطوالٍ موجيةٍ مختلفةٍ

خط فرونهوفر	اللون	الطول الموجي (نم)	معامل الانكسار الزجاج التاجي	معامل الانكسار الزجاج الصواني
F	الازرق	٤٨٦,١	١,٥٢٨٦	١,٧٣٢٨
D	الأصفر	٥٨٩,٦	١,٥٢٣٠	١,٧٢٠٥
C	الأحمر	٦٥٦,٣	١,٥٢٠٥	١,٧٠٧٦



الشكل ٦ : تحليل الكوارتز

التحليل العادي Normal dispersion

يَشعُ من الشرح السابق أنَّ الطرفَ الأزرقَ لِلطَّيفِ الذي يُكوِّنه الموشورُ يَتَشَبَّهُ أَكثَرَ من الطرفِ الأحمرِ؛ وَلَكِنْ لَاحِظْ أَنَّ لِلْمَوَادِّ العازلةِ المختلفةِ مُنحنياتٍ لَا يُمكنُ عُمُوماً تَحْوِيلُ

أي منها إلى الآخر بِمُجَرَّدِ تَغْيِيرِ مِقْيَاسِ الرَّسْمِ . وَقَدْ قَامَ كُوشِي Cauchy عام ١٨٣٦ باولي المحاولات لِتَمَثِيلِ مُنْحَنِيَّاتِ التَّحْلِيلِ العَادِيَّ بِمُعَادَلَةٍ رِيَاضِيَّةٍ ، قَوَّضَ مَا يُعْرَفُ بِمُعَادَلَةِ كُوشِي الَّتِي تَنْطَبِقُ طَالَمَا لَمْ يَحْصُلْ أَمْتِصَافٌ لِلضَّوْءِ ضَمَّنَ الْمَدَى الْمُوجِيَّ الْمُعْتَبَرِ ؛ وَهَذِهِ الْمُعَادَلَةُ هِيَ :-

$$[٥-٦:١] \quad \dots + \frac{ج}{\lambda^2} + \frac{ب}{\lambda^2} + أ = م$$

حَيْثُ م هُوَ مُعَامِلُ الْانكِسَارِ، λ الطُّوْلُ الْمُوجِيَّ، وَأ، ب، ج ثَوَابِتُ تَخُصُّ الْمَادَّةَ قِيَدَ الْاِعْتِبَارِ . وَلِإِجَادِ الْقِيَمِ الْعَدَدِيَّةِ لِلثَّوَابِتِ أَغْلَاهُ يَلْزَمُ مُعَامِلُ الْانكِسَارِ لِأَطْوَالٍ مَوْجِيَّةٍ ثَلَاثَةٍ ؛ وَهَكَذَا يُمَكِّنُ إِنْشَاءَ ثَلَاثِ مُعَادَلَاتٍ يُمَكِّنُ حَلُّهَا مَعًا لِلْحُصُولِ عَلَى قِيَمِ الثَّوَابِتِ . وَيكفي غَالِبًا اسْتِخْدَامُ الْحَدَّثَيْنِ الْأَوَّلَيْنِ فِي مُعَادَلَةِ كُوشِي ($م = أ + \frac{ب}{\lambda^2}$) وَتَحْدِيدُ قِيَمَةِ م لِطَوَلَيْنِ مُوجِيَّيْنِ . وَعِنْدَ إِجَادِ مُشْتَقَّةِ مُعَادَلَةِ كُوشِي الْمُخْتَصِرَةِ بِالنِّسْبَةِ إِلَى λ نَحْصُلُ عَلَى :-

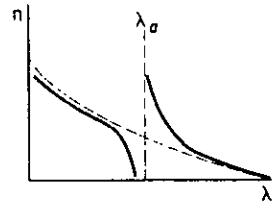
$$[٦-٦:١] \quad \dots \quad \frac{٢-ب}{\lambda^3} = \frac{م}{\lambda^3}$$

وَتُظْهِرُ الْمُعَادَلَةُ الْأَخِيرَةُ أَنَّ التَّحْلِيلَ يَتَنَاسَبُ تَقْرِيبًا عَكْسِيًّا مَعَ الْقُوَّةِ الثَّلَاثَةِ لِلطُّوْلِ الْمُوجِيَّ ؛ فَعِنْدَ الطُّوْلِ الْمُوجِيَّ ٤٠٠ نَم ، يَبْلُغُ التَّحْلِيلُ (٨) أَضْعَافَ قِيَمَتِهِ عِنْدَ الطُّوْلِ الْمُوجِيَّ (٨٠٠) نَم .

وَلَا يَعْتَمِدُ مُعَامِلُ الْانكِسَارِ عَلَى الطُّوْلِ الْمُوجِيَّ فَحَسْبُ ، وَإِنَّمَا كَذَلِكَ عَلَى دَرَجَةِ الْحَرَارَةِ وَالتَّرَكِيبِ الْكِيمِيَاوِيِّ وَحَالَةِ الْمَادَّةِ الْفِيْزِيَاثِيَّةِ . وَيُسَمَّى تَغْيِيرُ مُعَامِلِ الْانكِسَارِ بِدَرَجَةِ الْحَرَارَةِ بِالتَّحْلِيلِ الْحَرَارِيِّ temperature dispersion ، وَعُموماً فَإِنَّ مُعَامِلَ الْانكِسَارِ يَنْقُصُ بِارْتِفَاعِ دَرَجَةِ الْحَرَارَةِ ؛ وَهَذِهِ الظَّاهِرَةُ أَكْثَرُ وَضُوحاً فِي السَّوَائِلِ مِنْهَا فِي الْجَوَائِدِ .

التَّحْلِيلُ الشَّاذُّ Anomalous dispersion

يَكُونُ تَحْلِيلُ الضَّوْءِ عَادِيًّا إِذَا تَنَاقَصَ مُعَامِلُ الْانكِسَارِ تَدْرِيْجًا وَبِاسْتِمْرَارٍ بِازْدِيَادِ الطُّوْلِ الْمُوجِيَّ - الْخَطُ الْمُتَقَطِّعُ فِي الشَّكْلِ ٧ . وَيَكُونُ لِلْمَوَادِّ الشَّفَافَةِ غَيْرِ الْمَلَوْنَةِ مِثْلِ الْمَاءِ وَالزَّجَاجِ



الشكل ٧: التحليل العادي - الخط المتقطع والتحليل الشاذ - المنحنى المتصل. λ_0 تمثل طول الموجي المركزي لنطاق الامتصاص.

«تَحْلِيلٌ» عَادِيٌّ ضَمَّنَ الْمَدَى الْمُرْتَبِيَّ لِلضَّوءِ عَلَى الْاَقْلَ؛ أَمَّا الْمَوَادُّ الَّتِي تَمْتَصُّ الضَّوءَ انْتِقَائِيًّا فَلَا يَصْدُقُ عَلَيْهَا مُنْحَنَى التَّحْلِيلِ الْعَادِيِّ أَوْ مُعَادَلَةُ كُوشِي أَوْ أَيُّهُ مُعَادَلَةٌ مِمَّاثِلَةٌ تَصِفُ ذَلِكَ الْمُنْحَنَى. فَعَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ، عِنْدَمَا يَتْبَعُ الْاِمْتِصَاصُ ذُرْوَتَهُ عِنْدَ الطُّوْلِ الْمَوْجِيِّ λ_0 ، فَإِنَّ تَحْلِيلَ تِلْكَ الْمَادَّةِ يَتَّبِعُ الْآنَ الْخُطُوطَ الْمُتَّصِلَةَ فِي الشَّكْلِ (٧). وَإِذَا اتَّفَقَ أَنْ كَانَ لِلْمَادَّةِ عِدَّةُ نِطَاقَاتٍ لِلْاِمْتِصَاصِ **absorption bands**، فَإِنَّ كُلَّ نِطَاقٍ مِنْهَا مِنَ الْأَطْوَالِ الْمَوْجِيَّةِ سَيُظْهِرُ انْفِصَالًا **discontinuity** فِي الْمُنْحَنِ مِمَّا يُمَيِّزُ التَّحْلِيلَ الشَّاذَّ.

وَلِلتَّحْلِيلِ الْعَادِيِّ وَالتَّحْلِيلِ الشَّاذِّ أَهْمِيَّةٌ مِنْ نَاحِيَةٍ تَارِيخِيَّةٍ فَقَطْ؛ وَإِذَا مَا أَعْتَبَرَ الْمَرْءُ الضَّوءَ فَوْقَ الْبَتْفَسْجِيِّ وَالضَّوءَ تَحْتَ الْأَحْمَرِ، فَإِنَّ جَمِيعَ الْمَوَادِّ تُظْهِرُ اِمْتِصَاصًا، وَمِنْ ثَمَّ التَّحْلِيلَ الضَّوِّيَّ الشَّاذَّ.

وَفِي حَالَةِ الْاِمْتِصَاصِ، فَإِنَّ مُعَادَلَةَ كُوشِي كَمَا هُوَ وَاضِحٌ لَا تَصَحُّ. وَقَدْ قَامَ سِلْمِير Selmeier عامَ ١٨٧١ بِالْمُحَاوَلَةِ الْأُولَى لِاسْتِبْدَالِ مُعَادَلَةِ كُوشِي، وَوَضَعَ مُعَادَلَتَهُ عَلَى النِّحْوِ التَّالِي:

$$[١:٦-٧] \quad \dots\dots\dots \frac{\lambda^2}{\lambda_0^2 - \lambda^2} \sum \frac{1}{p} + 1 = \frac{2}{p} m$$

حَيْثُ λ_0 ثَابِتٌ، λ طَوْلُ الْمَوْجَةِ الَّتِي تَحْدُثُ عِنْدَهَا ذِرْوَةُ الْاِمْتِصَاصِ. وَقَدْ اشْتَقَّتْ هَذِهِ الْمُعَادَلَةُ مِنْ نَظَرِيَةِ الْجَامِدِ-الْمَرِنِ لِلضَّوءِ **Elastic-Solid**: وَفِي تِلْكَ النِّظَرِيَةِ يُفْتَرَضُ أَنَّ دَقَائِقَ الْوَسْطِ تَخْضَعُ لِقُوَى الْمَرُونَةِ وَتَهْتَزُّ بِتَرْدُّدَاتٍ طَبِيعِيَّةٍ؛ فَالْمَوْجَةُ الضَّوِّيَّةُ الْمَارَّةُ فِي وَسْطٍ مَا يُفْتَرَضُ أَنْ تُؤَثِّرَ فِي الدَّقَائِقِ بِقُوَّةِ اهْتِرَازِيَّةٍ دَوْرِيَّةٍ.

أَمَّا فِي الْوَقْتِ الْحَاضِرِ فَيُؤْخَذُ عَوَضًا مِنْ نَظَرِيَةِ سِلْمِيرِ بِنَظَرِيَةِ «التَّحْلِيلِ» الْمَبْنِيَةِ عَلَى نَظَرِيَةِ لُورَنْتِزِ الْكَهْرُومَغْنَطِيْسِيَّةِ **Lorentz** وَنَظَرِيَةِ الْإِلِكْتْرُونِ الَّتِي أَرَسَى فُرُوضَهَا ذُرُودُ **Drude**. وَيُفْتَرَضُ وَفْقَ نَظَرِيَةِ التَّحْلِيلِ هَذِهِ أَنَّ الْإِلِكْتْرُونَاتِ الْوَسْطِ الْمُحَلَّلِ مُقَيَّدَةٌ فِي أَوْضَاعِ اتِّزَانِهَا بِقُوَى خَطِّيَّةٍ تَعْمَلُ عَلَى إِعَادَتِهَا إِلَى أَوْضَاعِ الْاِتِّزَانِ، كَمَا أَنَّهَا تُعَانِي فِي أَثْنَاءِ حَرَكَتِهَا قُوَى مُقَاوِمَةً تُتَنَاسَبُ مَعَ سُرْعَتِهَا.

قوة التبيين Resolving Power

تُعرف قوة التبيين اللوني لموشور بقدرته على تمييز طولين موجيين متقاربين؛ فإذا كانت قوة التبيين عالية، كان مدى الطول الموجي الذي يمكن تمييزه صغيراً. وتُعرف قوة التبيين رياضياً بأنها نسبة الطول الموجي λ إلى أصغر مدى من الطول الموجي $\Delta\lambda$ يمكن تمييزه:

[١-٦:٨]

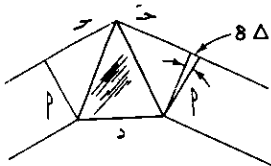
$$\text{قوة التبيين اللوني} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \dots\dots$$

ويستدكر الحقيقة القائلة إن الجبهات الموجية متساوية الطور تقطع مسارات بصرية متماثلة في أطوالها، نجد من الشكل ٨ أن:-

[١-٦:٩]،

$$\text{ج} + \text{ج} = \text{م} \dots\dots$$

حيث م هو معامل انكسار الموشور لطول موجي معين، ود هو طول القاعدة.



الشكل ٨: اشتقاق معادلة قوة التبيين للموشور عند الانحراف الأصغر له.

ولطول موجي مختلف، يكون طول المسار البصري قرب القاعدة مساوياً لـ $(\text{م} + \Delta\text{م})$ د؛ كما أن الجبهة الموجية الخارجة من الموشور ستدور عبر زاوية مقدارها $\Delta\delta$. وبعد ذلك نستخدم معيار ريلي Rayleigh criterion الذي سيُفسر معناه فيما بعد. ووفق معيار ريلي يُعتبر طولان موجيان متميزين أي يمكن تبيينهما إذا كانت النهاية العظمى الأساسية لصورة شق ما (أو الخط الطيفي) تقع على النهاية الصغرى الأولى لصورة شق آخر. ولتقريب مستطيل الشكل عرضه أ، فإن الزاوية التي يُستوفى عندها هذا المعيار هي:-

$$\Delta\delta = \frac{\lambda}{\text{م}}. \text{ ومن ثم فلطول موجي مختلف تُصبح المعادلة [١-٦:٩] كمايلي:-}$$

[١-٦:١٠]

$$\text{ج} + \text{ج} = \lambda + (\text{م} + \Delta\text{م}) \text{ د} \dots\dots$$

ويطرح المعادلة [١-٦:٩] من المعادلة [١-٦:١٠] نحصل على:-

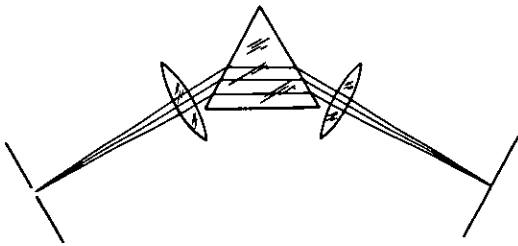
$\lambda = m\Delta$ د؛ وبالقِسْمَةِ على $\lambda\Delta$ ، وبالاستعاضة عن الزيادات الطفيفة بالمشتقة
 $\frac{m}{\lambda} \frac{d\lambda}{d\Delta} = -$ نَحْصُلُ على :-

$$[11:6:1] \quad \dots \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{m}{\lambda\Delta} d\Delta = \frac{\lambda}{\lambda\Delta} \dots$$

وَإِذَا لَمْ يَمَلَأَ الضَّوُّ تَمَاماً فَتَحَةَ المَوْشُورِ، فَإِنَّ طَوَلَ القَاعَةِ (د) يَكُونُ مُسَاوِياً لِفَرْقِ بَيِّنِ طَوَلَيْ المَسَارَيْنِ الضَّوِّيَّيْنِ الْمُتَطَرِّقَيْنِ اللَّذَيْنِ يَقْطَعَانِيهِ (أَيُّ المَوْشُورِ)؛ كَذَلِكَ فَإِنَّ طَوَلَ القَاعَةِ الفَعَّالِ د يُسَاوِي طَوَلَ القَاعَةِ مَضْرُوباً فِي عَدَدِ المَرَاتِ الَّتِي يَقْطَعُ الضَّوُّ بِهَا المَوْشُورَ.

مقياس الطيف الموشوري Prism Spectrometer

إِنَّ الادَّاءَةَ الَّتِي تَرْتَبِطُ بِالمَوْشُورِ ارْتِبَاطاً قَرِيباً هِيَ كَاشِفَةُ الطِّيفِ المَوْشُورِيِّ Spectroscope . فَكَاشِفَةُ الطِّيفِ أَدَاةٌ تُسْتَخْدَمُ لِمَشَاهِدَةِ الطِّيفِ، وَتُسَمَّى مَقْيَاسَ الطِّيفِ إِذَا مَا اشْتَمَلَتْ عَلَى تَرْتِيبَاتٍ لِلْقِيَاسِ، وَإِذَا مَا أُعِدَّتْ لِأَخْذِ صُورٍ فُوتُوغَرَفِيَّةٍ فَإِنَّهَا تُسَمَّى رَاسِمَةً الطِّيفِ spectrograph . وَعَادَةً تُنْبِتُ عَدْسَةً مُجَمَّعةً عَلَى كُلِّ مِنْ جَانِبَيْ المَوْشُورِ - الشَّكْل ٩ . وَتُسَمَّى العَدْسَةُ قَرَبَ شِقِّ الدِّخُولِ بِالمُسَدَّدَةِ، وَتُسَمَّى العَدْسَةُ الأُخْرَى بِعَدْسَةِ الشَّيْثِيَّةِ أَوْ عَدْسَةِ التَّلْسُكُوبِ، وَكِلَاهُمَا يَثْبُتُ بِحَيْثُ يُمَكِّنُ إِدَارَتَهُمَا عَلَى مِخْوَرٍ مُشْتَرَكٍ . وَيُفَحِّصُ الطِّيفُ فِي وَضْعِ الانْحِرَافِ الأَصْغَرِ، لِأَنَّ الخُطُوطَ الطِّيفِيَّةَ فِي ذَلِكَ الْوَضْعِ تَكُونُ أَذَقَّ أَوْ أَرْفَعَ مَا يُمَكِّنُ.



الشَّكْل ٩ : رَسْمٌ لِمَقْيَاسِ الطِّيفِ المَوْشُورِيِّ الَّتِي يَتَأَلَّفُ مِنَ الْمُسَدَّدَةِ (إِلَى الْيَسَارِ)، المَوْشُورِ (الْوَسْطِ)، وَعَدْسَةِ مَرَكِّزَةٍ (إِلَى الْيَمِينِ).

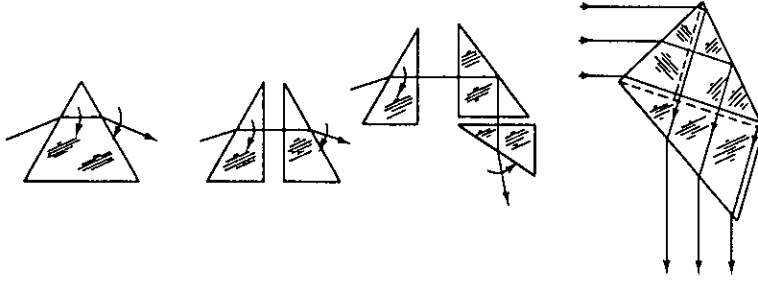
وَتَوْجَدُ مقاييس الطيف الموسورية في أنواع متعددة جداً، ونذكر هنا بعض المقاييس المُمثلة لها. وغالباً ما يكون كل من المسددة والتلسكوب مُكوّناً من مرآيا بدَل العدسات، ولا سيّما إذا كانت الأداة ستُستخدَم لانتقاء طول موجي مُعيّن للإضاءة. ويُسمّى هذا النوع «بالمضيء ذي اللون الأحادي monochromator». إنَّ مقاييس الطيف عالية الدقة، وهي حساسةٌ وغالية الثمن؛ ولكن من المطمئن أن نعلم أنه يُمكن الحصول على نتائج مقبولة أيضاً بمقاييس أقلَّ كلفةً. والمواشير والعدسات الزجاجية كافية للضوء المرئي؛ أما في الضوء فوق البنفسجي فيلزم مواشير من الكوارتز أو الفلورايت. وفي الضوء تحت الأحمر يلزم مواشير وعدسات من ملح الصّخر (NaCl, KCl) أو الصّفير (Al_2O_3). كذلك فإنَّ هنالك طرقاً مختلفة لتثبيت المواشير ستتكلم عنها في الفصل الخاص بالحيود diffraction.

أنواع خاصة من المواشير

المُشور غير الفاصِل للون يُحدِث انحرافاً في الضوء ولا يُحلّله؛ ويُمكن عمل هذا المُشور بضَمّ مُشورَين مُتساويين في قوّة التحليل: الأول مصنوع من الزجاج التاجي والثاني من الزجاج الصّواني، بحيث تستند قاعدة أحدهما إلى رأس الآخر. وفي مقابلة ذلك فإنَّ مُشور الرؤية المباشرة direct-vision prism يحلّل الضوء ولا يُحدِث أيّ انحراف لأيّ طول موجي، وهو يُستخدَم في الكاشفات الطيفية البسيطة التي تُحمل يدوياً. أما التحليل الذي يحدِث على زاوية انحراف ثابتة فيتوقّر في مُشور الانحراف الثابت deviation constant أو مُشور بِلِن - بروكا Pellin-Bruca. تَحَيَّل أن لديك مُشوراً زاويته 60° فُلِقَ نصفين عند مُستوى القاعدة - الرأس - الشكل ١٠، فالمُشوران الحادّان اللذان زاوية كُلّ منهما 30° يُرتبان من جديد، ويضَمّان معاً بمرآة أو بمُشور قائم الزاوية متساوي الساقين ليُعملَ منها المُشور ذو الانحراف الثابت.

* أي. م. ريفس ود. و. نيكولس: «رسم الطيف الموسوري $\frac{E}{1.1}$ الرخيص والبسيط» مجلة الجمعية البصرية الأمريكية ٤٨ (١٩٥٨)، ٣٥٨؛ بُنيت هذه الأداة من كاميرا (٣٥ مم) بعدسة ذات فتحة كبيرة ومُشور زاويته 60°

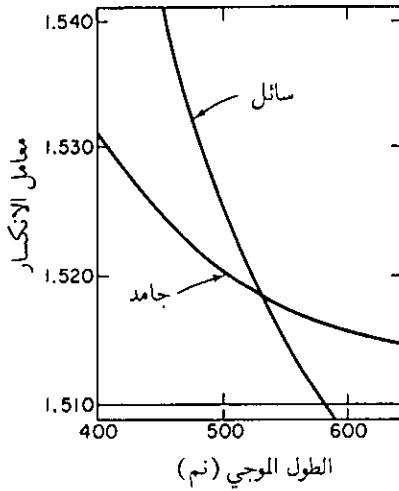
ذي مقطع عرضي كبير. * E. M. Reeves and R. W. Nicholls, "Simple and Inexpensive f/1.1 Prism Spectrograph," J. Opt. Soc. Am. 48 (1958), 358.



الشكل ١٠: موشور بلن-بروكا وكيفية صنعه من موشور زاويته 60° (الى اليسار). الخطوط المتقطعة الى اليمين هي للتوضيح فقط ولا تعتبر جزءاً من التصميم النهائي.

مرشحة كريستيانسن christiansen filter

إن حقيقة أن المواد المختلفة لها قوى تحليل مختلفة قد قادت إلى مرشحة كريستيانسن التي هي خليط من جامد شفاف مسحوق وسائل. وفي العادة يكون الخليط معتماً، إلا أنه يصبح شفافاً عند الطول الموجي الذي يتساوى فيه معامل انكسار الجامد والسيائل - الشكل ١١. وقد استخدم كريستيانسن نفسه مسحوق الزجاج وخليط البترين وثاني كبريتيد الكربون*؛ أما مرشحات كريستيانسن الحديثة فتتألف من الكوارتز المسحوق وعدة سوائل عضوية+.



الشكل ١١: تحدّد نقطة تقاطع منحنى التحليل نفاذية transmissivity مرشحة كريستيانسن.

*C. Christiansen, "Untersuchungen über die optischen Eigenschaften von fein vertheilten Körpern," *Ann. Physik* (3) **23** (1884), 298-306.

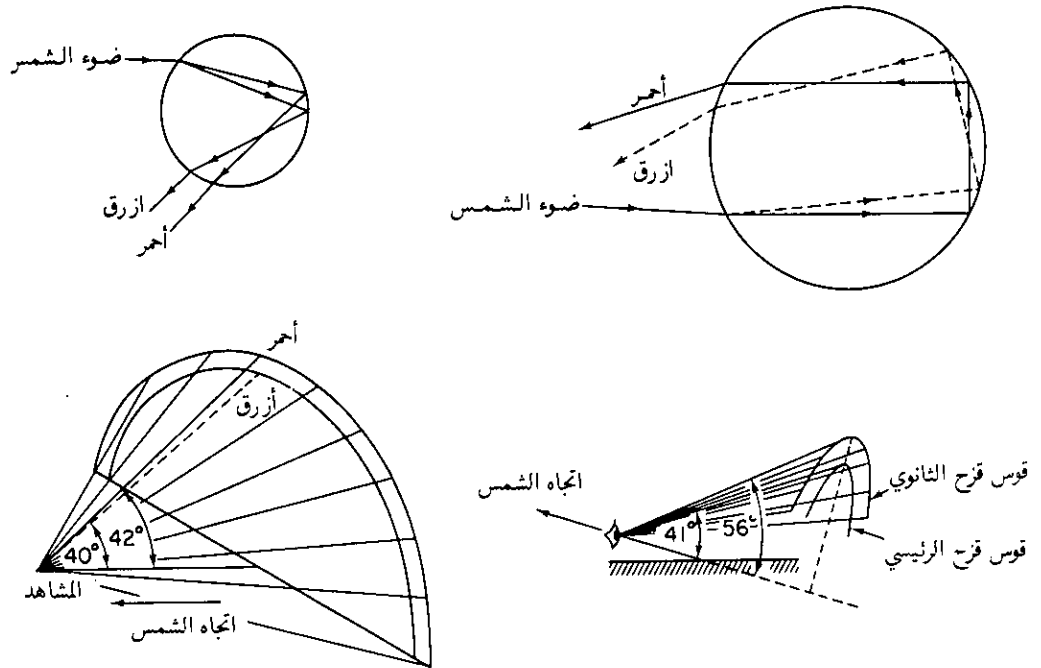
†L. Auerbach, "More Christiansen Filters," *Am. J. Physics* **28** (1960), 743.

بصريّات الجو Meteorological optics

إنّ بعض الظواهر الجوية، مثل قوس فُرح والوميض الأخضر green flash وظواهر بصريّة مُتصلة بانكسار الضوء وتخليله.

قوس المطر (قوس فُرح)

قدّم ديكارت أول نظرية لقوس فُرح عام ١٦٣٧؛ إلا أنها نظرية غير كاملة. وفي أبسط حالة للنظرية ينعكس الضوء مرة واحدة داخل كُلم قطرة ماء- الشكل ١٢؛ ولكن الضوء يَنكسر ويتحلل عند السطح الفاصل بين الماء والهواء. ولما كان مُعامل انكسار الماء حوالي ١,٣٣٣ للضوء الأحمر و١,٣٤٦ للضوء الأزرق، فإنّ مخروط الضوء الأزرق المنعكس مرة واحدة يَعمل زاوية ٤٠° مع الخط الواصل بين الشمس وقطرة الماء، بينما يَعمل مخروط الضوء الأحمر زاوية ٤٢° مع الخط نفسه. وهكذا يَظهر الضوء الأزرق على داخل قوس فُرح الرئيسي في حين يَظهر الضوء الأحمر خارجة.

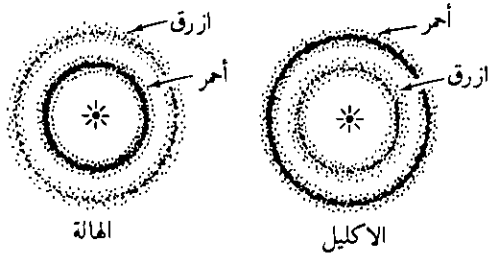


الشكل ١٢: تحليل ضوء الشمس بقطرة ماء: إلى اليسار قوس فُرح الرئيسي وإلى اليمين قوس فُرح الثانوي.

أما قوسُ قُزَحِ الثانويُّ الذي يُرى خارجَ قوسِ قُزَحِ الرئيسيِّ فيُظهِرُ الأحمرَ على داخلِهِ والأزرقَ على خارجِهِ، وهو يتكوَّنُ من الضوءِ الذي انعكسَ مرَّتينِ داخلَ قُطْرَةِ الماءِ قَبْلَ خُرُوجِهِ مِنْهَا. كَذَلِكَ يُمكنُ رؤيةَ أقواسِ قُزَحِ أُخْرَى بِتَكَرُّرٍ أَقلَّ عِنْدَمَا ينعكسُ الضوءُ ثَلَاثَ مَرَّاتٍ أو أَرْبَعَ داخلَ القُطْرَةِ. إِنَّ النظريةَ الكاملةَ لِقوسِ قُزَحِ أَكْثَرُ تَعْقِيداً، وَهِيَ تَشْمَلُ نظريَّتي الانكسارِ والحيودِ.

أهالاتُ Halos

وَيُمكنُ أَنْ تَعزَى الحَلَقَاتُ الَّتِي تُرى أحياناً حَوْلَ الشَّمْسِ أو القَمَرِ إلى الانكسارِ أيضاً، وتُسمَّى هذه الحَلَقَاتُ الهالاتِ. وَيَحْدُثُ الانكسارُ بالبلوراتِ الجليديةِ في السُّحُبِ الرقيقةِ الصُّوفيةِ cirrus clouds؛ وَلَكِنْ نظراً لَعَدَمِ حَدُوثِ أيِّ انعكاسٍ ولأنَّ الحَلَقَاتِ تَقَعُ في نَفْسِ الجِهَةِ الَّتِي يوجَدُ فِيهَا المَصْدَرُ (كما يَرى المُشَاهِدُ)، فَإِنَّ الضوءَ الأزرقَ يَكُونُ على خَارِجِ الهالَةِ والأخمرُ على دَاخِلِهَا - الشَّكْلُ ١٣ إلى اليسارِ. أما إِذَا كَانَ الأَخْمَرُ على الخَارِجِ والأزرقُ على الدَاخِلِ، فَإِنَّ هذه الظَّاهِرَةَ تُسمَّى الأَكْلِيلَ corona، وَهِيَ تُعزَى إلى حَيُودِ الضوءِ عَنِ قُطْرِيَّاتِ الماءِ العالِقَةِ في الضَّبَابِ أو السُّحُبِ؛ إِذْ خِلَافاً لما يَحْدُثُ في الانكسارِ يُعاني الضوءُ الأَخْمَرُ حَيُوداً أَكْثَرَ مِنَ الضوءِ الأزرقِ.



الشَّكْلُ ١٣: هَالَةُ الانكسارِ وَاكْلِيلِ الحَيُودِ

ألومبيضُ الأخضرِ

يُعزَى ألومبيضُ الأخضرِ إلى ظاهرتي تَشَتُّتِ الضوءِ وتَحْلِيلِهِ؛ فَعِنْدَ الغُرُوبِ تُرى الشَّمْسُ فوقَ الأفقِ لِفَتْرَةٍ أَطْوَلَ مِمَّا يُمكنُ تَفْسِيرُهُ بالرَّسْمِ الهَيْدُوسِيِّ. وَيُعزَى ذَلِكَ إلى تَطَبُّقِ كَثَافَةٍ

الهواء stratification of density في الغلاف الغازي. وعلاوة على ذلك، ولأن الضوء الأحمر هو الأقل أنكساراً فإنّ الاقسام الزرقاء والخضراء من ضوء الشمس تدوم فترة أطول. ولكن الضوء الأزرق يتشتت بشدة بجزيئات الهواء؛ ولذا فإنّ الشمس يتفصّل اللون الأزرق عندما تكون قريبة من الأفق. فكل ما يتبقى إذاً هو الضوء الأخضر الذي يرى أحياناً في صورة وميض شديد قصير. ويُعزى ما يُسمّى بالوميض الأخضر الاصطناعي إلى التشتت فقط، ويُمكن رؤيته عند النظر إلى الشمس من خلال ذيل عادم طائرة نفاثة.

اقترحات لقراءات اضافية

- R. E. Hopkins, "Mirror and Prism Systems" in *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. III, ed. R. Kingslake (New York: Academic Press, Inc., 1965), 269-308.
- M. G. J. Minnaert, "Unusual or Neglected Optical Phenomena in the Landscape," *J. Opt. Soc. Am.* **58** (1968), 297-303.
- M. Minnaert, *The Nature of Light and Colour in the Open Air* (New York: Dover Publications, Inc., 1954).
- G. Dietze, *Einführung in die Optik der Atmosphäre* (Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, 1957).

المسائل

- ١-٦:١ موشور رقيق معامل انكساره ١,٥٢٣ يُعطي زاوية انحراف أصغر مقدارها ٥°، جد زاوية رأسه.
- ٢-٦:١ سَقَطَ ضوء أخضر على موشور زاويته ٦٠° ومعامل انكساره ١,٥. جد زاوية الانحراف الأصغر.
- ٣-٦:١ موشور زاويته ٦٠° ومعامل انكساره ١,٦٢:
- (أ) ما زاوية الانحراف الأصغر التي يُعطيها؟
- (ب) ما زاوية الانحراف إذا كانت زاوية السقوط ٧٠°؟
- ٤-٦:١ أرسم الألوان المختلفة لحزمة من الضوء الأبيض عبر موشور زجاجي مغمور في:
- (أ) الهواء (ب) الماء (ج) ثاني كبريتيد الكربون.

- ٥-٦:١ مَوْشُورُ زاوِيَةِ رَأْسِهِ ٧٢ وَمُعَامِلُ انْكَسَارِهِ ١,٦٦، غُمِرَ فِي الْمَاءِ؛ جِدْ زاوِيَةَ الانْحِرَافِ الْأَصْفَرِ.
- ٦-٦:١ سَقَطَ ضَوْءٌ أَبْيَضٌ بِزاوِيَةِ ٨٠ عَلَى سَطْحٍ مَصْقُولٍ لِشَرِيحَةٍ مِنَ الزَّجَاجِ الصُّوَانِيِّ الَّذِي يَحْوِي غُضْرَ الْبَارِزِيومِ؛ فَإِذَا كَانَ مُعَامِلُ انْكَسَارِ ضَوْءِ F الْأَزْرَقِ ١,٧٣٣ وَضَوْءِ C الْأَحْمَرِ ١,٧٠٨، فَجِدِ التَّحْلِيلَ الزَّاوِيَّ بَيْنَ هَذَيْنِ اللَّوْنَيْنِ.
- ٧-٦:١ سَقَطَ ضَوْءٌ أَبْيَضٌ عَلَى مَوْشُورٍ صُّوَانِيٍّ زاوِيَتُهُ ٤٥؛ بَحِثْ كَانَ هُنَالِكَ انْحِرَافٌ أَصْفَرُ؛ فَإِذَا كَانَ مُعَامِلُ انْكَسَارِ الضَّوءِ الْأَزْرَقِ ١,٧٣ وَالْأَحْمَرِ ١,٧١، فَمَا التَّحْلِيلُ الزَّاوِيُّ بَيْنَ الْأَزْرَقِ وَالْأَحْمَرِ؟
- ٨-٦:١ مَوْشُورٌ أَجُوفٌ زاوِيَتُهُ ٦٠ مَصْنُوعٌ مِنْ صَفَائِحَ زجاجية رقيقة، مُلِئَ بِثَنَائِي كَبْرَيْتيدِ الْكَرْبُونِ الَّذِي مُعَامِلُ انْكَسَارِهِ لِلْأَزْرَقِ وَالْأَصْفَرِ، وَالْأَحْمَرِ عَلَى التَّرْتِيبِ ١,٦٥٢، ١,٦٢٨، ١,٦١٨. جَدْ:
(أ) زاوِيَةَ الانْحِرَافِ الْأَصْفَرِ لِلضَّوءِ الْأَصْفَرِ.
(ب) التَّحْلِيلَ الزَّاوِيَّ بَيْنَ الْأَزْرَقِ وَالْأَحْمَرِ.
- ٩-٦:١ سَقَطَتْ حَزْمَةٌ ضَوْئِيَّةٌ رَفِيعَةٌ عَلَى شَرِيحَةٍ مُتَوَازِيَةِ الْوُجْهَيْنِ سُمْكُهَا ١ سَمِ بِزاوِيَةِ سُقُوطٍ ٤٥؛ فَإِذَا كَانَ مُعَامِلُ انْكَسَارِ الضَّوءِ الْأَزْرَقِ ١,٦٥٣ وَلِلْأَحْمَرِ ١,٦١٤، فَمَا الْمَسَافَةُ الْجَانِبِيَّةُ بَيْنَ اللَّوْنَيْنِ بَعْدَ خُرُوجِهِمَا مِنَ الشَّرِيحَةِ؟
- ١٠-٦:١ لِلْحُصُولِ عَلَى مَوْشُورِ الرُّؤْيَا الْمُبَاشَرَةِ، ضُمَّ مَوْشُورُ زَجَاجٍ تَاجِيٌّ إِلَى مَوْشُورِ زَجَاجِيٍّ صُّوَانِيٍّ. وَبِالِاسْتِعَانَةِ بِرَسْمِ شُعَاعِيٍّ (أ) يَتَبَيَّنُ تَقْرِيبًا النِّسْبَةُ بَيْنَ زاوِيَتَيْ رَأْسِ الْمَوْشُورَيْنِ، وَبَيْنَ (ب) طَرِيقَةِ ضَمِّهِمَا.
- ١١-٦:١ مَوْشُورٌ مِنْ زَجَاجٍ تَاجِيٍّ زاوِيَتُهُ ٦ ضُمَّ إِلَى مَوْشُورِ زَجَاجٍ صُّوَانِيٍّ بِحَيْثُ لَا تُحَلَّلُ الْمَجْمُوعَةُ الضَّوءَ الْأَزْرَقَ وَالْأَصْفَرُ؛ جِدْ زاوِيَةَ انْكَسَارِ الْمَوْشُورِ الصُّوَانِيِّ.
- ١٢-٦:١ تَحْوِي مُعْظَمُ مَقَايِسِ الطِّيفِ مُوَاشِيرَ زَوَايَاهَا ٦٠ (أَوْ ٣٠ إِذَا مَرَّ الضَّوءُ فِيهَا مَرَّتَيْنِ). بَيْنَ بِالرَّسْمِ كَيْفَ تَتَغَيَّرُ زاوِيَةُ الانْحِرَافِ الْأَصْفَرِ بِتَغْيِيرِ زاوِيَةِ الْمَوْشُورِ عَنْ ٦٠، وَبَيْنَ كَيْفَ يَتَغَيَّرُ التَّحْلِيلُ الزَّاوِيُّ لِلزَّجَاجِ الصُّوَانِيِّ فِي حَالَتَيْ الضَّوءِ الْأَزْرَقِ وَالْأَحْمَرِ.

الفصل ١ : ٧

الزوغانات Aberrations

إذا أمكن إسقاط جسم نُقْطَية إلى صورة نُقْطَية فإنَّ المنظومة التي كَوَّنت الصورة تكون مُحَدَّدة بالحيود فقط ؛ وَلَكِنْ يوجَدُ هنالك مُحَدَّدَاتُ أُخْرَى ، بالإضافة إلى الحيود ، تَمْنَعُ الصورة من أن تكون مُشَابِهَةً تَمَاماً للجسم ، وتُسمى هذه المُحَدَّدَاتُ بالزَوَغانَات . وَبَعْضُ هذه الزوغانَات مُنْتَظِمٌ ، وَتُسَبَّحُ في هذا الفصل ؛ وَالبَعْضُ الأخرُ غَيْرُ مُنْتَظِمٍ ، وَمِنْهَا على سبيل المثال الزوغانَاتُ الناشئة مِنْ عَدَمِ تَجَانُسِ الرُّجَاجِ والعيوبِ السَّطْحِيَّةِ أو الصَّقْلِ غَيْرِ السَّلِيمِ .

وَتَبَحُّثُ في هذا الفصل مايلي :

١ - الزوغانُ الكروي Spherical aberration

٢ - الذُّوَابَاتُ Coma

٣ - اللَّابُورِيَّةُ أو الإِسْتِجْمَائِيَّةُ Astigmatism

٤ - تَقْوُسُ المَجَالِ Curvature of field

٥ - التَّشْوُّهُ Distortion

٦ - الزوغانُ اللَّوْنِيُّ Chromatic Aberration

وَتُضَبِّحُ الزَوَغانَاتُ أَكْثَرَ خُطُورَةً إِذَا كَانَتِ العَدْسَةُ أو المِرْآةُ ذاتِ فَتْحَةٍ كَبِيرَةٍ ؛ وَلِلْفَتَحَاتِ الصَّغِيرَةِ أَيْ لِلْأَشْعَةِ القَرِيبَةِ مِنَ المِحْوَرِ البَصَرِيِّ ، نَسْتَعِدُّ التَّقْرِيبَ الذي يَضَعُ جُيُوبَ زوايا مِثْلِ المُنْحَنِيَّاتِ γ مُساوِيَةً لِلزوايا نَفْسِهَا مُقَاسَةً بالتقديرِ الدائريِّ .

النظريةُ العامَّةُ

تَدُكِّرُ أَنَّ جَيْبَ أَيِّ زاويةٍ يَخْتَلِفُ عَنِ الزاويةِ نَفْسِهَا بِمُتَسَلِّسَةِ قُوَّةِ Power series ،

وَتُسَمَّى هذه النظرية **نظرية مَكْلورين Maclaurin theorem** :

$$جا \gamma = \gamma - \frac{\gamma^3}{3!} + \frac{\gamma^5}{5!} - \frac{\gamma^7}{7!} + \dots \quad [1-7:1]$$

وَالزَّاوِيَةِ الصَّغِيرَةِ تَكُونُ الْمُتَسَلْسِلَةُ مُتَسَلْسِلَةً مُتَقَارِبَةً **converging series**. وفي أولِ تقريبٍ يُمَكِّنُنَا إِهْمَالُ جَمِيعِ الْحُدُودِ بَعْدَ الْحَدِّ الْأَوَّلِ، وَلِذَا نَكْتُبُ جَا $\gamma = \gamma$ ؛ فَهَذَا هُوَ الْاِفْتِرَاضُ الَّذِي نَعْتَمِدُهُ عِنْدَمَا نَسْتَخِذُ مُعَادِلَاتِ الْاِنْكَسَارِ عَنْ سَطْحٍ كَاسِرٍ مُنْفَرِدٍ أَوْ عَنْ عَدْسَةٍ مِثْلِ مُعَادِلَةِ جَاوَسٍ أَوْ مُعَادِلَةِ صَانِعِ الْعَدْسَةِ أَوْ مُعَادِلَاتِ الْعَدْسَةِ الرَّقِيقَةِ الْآخَرَى.

وَيُقَالُ لِلنَّتَائِجِ الْمَبْنِيَةِ عَلَى هَذَا التَّقْرِيبِ بِأَنَّهَا تَتَّبِعُ نَظْرِيَةَ الرُّبِّيَّةِ الْأَوَّلَى **theory first-order** أَوْ **بَصْرِيَّاتِ جَاوَسٍ Gaussian optics**. وَإِذَا مَا قُرَّبَ جَنْبُ الزَّاوِيَةِ بِالْحَدِّينِ الْأَوَّلَيْنِ مِنَ مُتَسَلْسِلَةِ مَكْلورين $(\gamma - \frac{\gamma^3}{3!})$ ، فَإِنَّ الْمُعَادِلَاتِ النَّاتِجَةَ تَتَّبِعُ نَظْرِيَةَ الرُّبِّيَّةِ الثَّلَاثَةِ؛ وَيُعْطِي هَذَا التَّقْرِيبُ عَرْضاً دَقِيقاً مَقْبُولاً لِلزَّوْغَانَاتِ الْأَسَاسِيَّةِ.

إِنَّ أَوَّلَ مَنْ وَضَعَ نَظْرِيَةً صَارِمَةً لِلزَّوْغَانَاتِ هُوَ فُون سِيدِل **Von seidel** الرِّيَاضِيُّ الْأَلْمَانِيُّ (١٨٢١-١٨٩٦)؛ إِذْ أَشْتَقَّ خَمْسَةَ مَجَامِيعَ (جَا ١ إِلَى جَا ٥) تُعْرَفُ بِمَجَامِيعِ فُون سِيدِل؛ وَتَرْتَبِطُ هَذِهِ الْمَجَامِيعُ بِالزَّوْغَانَاتِ الْخَمْسَةِ الْأَوَّلَى، وَيَجِبُ جَعْلُهَا مَسَاوِيَةً لِلصَّفَرِ إِذَا مَا أُريدَ التَّخْلُصُ مِنَ الزَّوْغَانَاتِ. وَلَا يَوْجَدُ هُنَاكَ أَيُّهُ مَنْظُومَةٌ بَصْرِيَّةٌ يُمَكِّنُ أَنْ تَسْتَوْفِيَ الشَّرُوطَ الْخَمْسَةَ فِي نَفْسِ الْوَقْتِ؛ وَلِذَا فَمِنَ الْعَادَةِ تَنَاوُلُ كُلِّ مَجْمُوعٍ مِنَ مَجَامِيعِ فُون سِيدِل عَلَى حِدَةٍ. فَمِثْلًا إِذَا كَانَ الْمَجْمُوعُ الْأَوَّلُ جَا ١ يُسَاوِي صَفْراً لِثِقْطَةِ مِخْوَرِيَّةٍ مَا، فَإِنَّ الزَّوْغَانَ الْكُرِّيَّ لَا يُظْهَرُ؛ وَإِذَا كَانَ جَا ١ = صَفْراً، وَجَا ٢ = صَفْراً، فَإِنَّ الْمَنْظُومَةَ الْبَصْرِيَّةَ لَا تُظْهَرُ أَيُّهُ دُؤَابِيَّةٌ؛ أَمَّا إِذَا جُعِلَتْ كُلُّ مِنَ الْمَجَامِيعِ جَا ١، جَا ٢، جَا ٣، جَا ٤ صَفْراً، فَإِنَّ الصُّورَةَ تَخْلُو مِنَ اللَّابُورِيَّةِ وَتَقُوسِ الْمَجَالِ، وَهَكَذَا ذَوَالِيكَ.

الزَّوْغَانُ الْكُرِّي Spherical Aberration

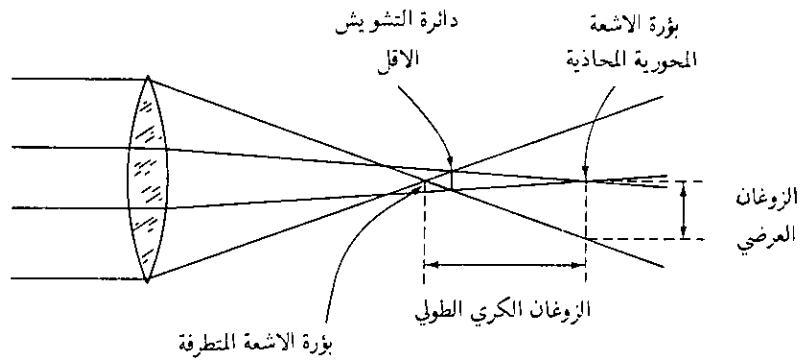
الزَّوْغَانُ الْكُرِّي هُوَ الظَّاهِرَةُ الَّتِي يَتِمُّ فِيهَا تَجَمُّعُ الْأَشْعَةِ الْمَارَّةِ بِمَنَاطِقٍ مُخْتَلِفَةٍ مِنْ

العدسة، أو المنعكسة عن مناطق مختلفة منها في بُورٍ مُختلفة + . وعُموماً فإنَّ الأشعة القريبة من المحور البصري أقلَّ انكساراً من الأشعة المُتطرفة، ولذا تَتَجَمَّعُ في بُورة أكثرَ بُعداً من العدسة - الشكل ١ ، وتُسمَّى هذه الظاهرة بالزوغان الكروي الطولي الموجب. ويُقال للعدسة التي تُظهرُ مثلَ هذا الزوغان إنها المصححة الناقصة Under corrected. أما إذا كان البُعد البُوري للأشعة المُتطرفة أكبرَ فإنَّ الزوغان الكروي يكونُ سالِباً، ويُقال للعدسة أنها المصححة المفرطة. ويزدادُ الزوغان الكروي الطولي عموماً بِمُرَّجِ الفُتحة؛ وبصورة مُحدَّدة أكثرَ، فَبَيْنَمَا تُصْبِحُ معادِلَةُ جاوِس للأشعة المحورية المُحاذاة على النحو التالي :

$$[٢-٧:١] \quad \dots\dots \frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

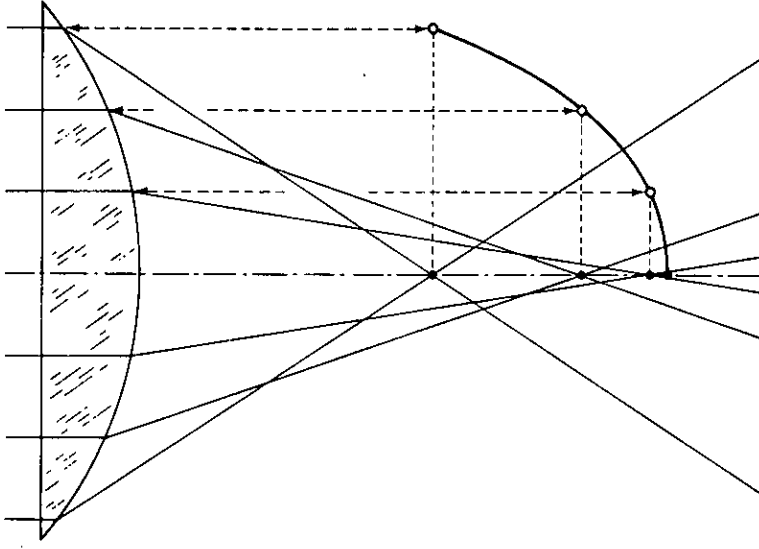
والتي تُؤوِّلُ في حالة كَوْنِ الجِسمِ في ما لا نهايةً إلى : $(\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_2}{f_1})$ ، نَجِدُ المعادِلَةَ التاليةَ للأشعة التي ارتفاعُها د عَنِ المحورِ البصريِّ :-

$$[٣-٧:١] \quad \dots\dots \frac{f_2^2}{f_1^2} + \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_2}{f_1}$$



الشكل ١ : الزوغان الكروي الطولي الموجب والعرضي

+ اكتشفَ الزوغان الكروي للمرايا الكروية أَلِفِيلِسُوفُ الطَّبِيعِيُّ الانجِلِيزِيُّ روجَرْ بِيكون (١٢١٥-١٢٩٤).



الشكل ٢ : الزوجان الكروي : منحنى البعد البؤري في مقابل بعد الأشعة عن المحور.

ونلاحظ من الشكل ٢ أنَّ للحزمة الضوئية (التي جمعتها عدسة بسيطة) قُطراً أقلَّ وصورة أوضح في نقطة بين البؤرتين أقرب إلى بُؤرة الأشعة المتطرفة. ويُسمى المقطع العرضي لتلك الحزمة في ذلك المستوى بدائرة التوشيش الأقلَّ، وهي دائرة يتغيَّر قُطرها تبعاً لمُكعَب فتحة العدسة. ويمكن اعتبار المقطع العرضي مقياساً للزوجان الكروي العرضي.

وإذا ما رَسَمنا بُعد المنطقة التي يمرُّ فيها الضوء عن المحور مُقابل البعد البؤري المعني، فإننا نحصلُ على مُنحني مُميِّز لنوع الزوجان الكروي الطولي الحاصل - الشكل ٢. وفي الحالة الموضحة يكون الزوجان موجباً، وإذا انحنى المنحنى جهة اليمين يكون الزوجان سالباً.

وتتقاطع الأشعة التي تمرُّ في مناطق متتالية في مُنحني يُعرف بالمنحنى الكاوي **caustic surface**؛ وبدوران المنحنى الكاوي حول المحور البصري نحصلُ على شكل مُجسَّم يُسمى السطح الكاوي، ويقع قرْن المنحنى على المحور عند بُؤرة الأشعة المحورية المُحاذية.

عواملُ أو معاملاتُ كودنْجُتنْ Coddington factors

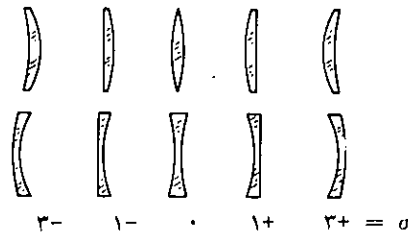
خُذْ مُتَسَلِّسَةً من العدسات ذاتِ الأقطارِ المُتساوية والأبعادِ البُورية المتساوية للأشعةِ المِحْوَرِيَّةِ المُحاذِيَّةِ، لِكِنَّهَا مُخْتَلِفَةٌ في الشَّكْلِ - الشَّكْل ٣. إِنَّ مقدارَ الزَّوْغَانِ الكُرِّيِّ يَتَغَيَّرُ تَبَعاً لِدَرَجَةِ انحناءِ العدسات. وَنَجِدْ في عاملِ الشَّكْلِ لِكودنْجُتنْ σ تَعْبِيراً عَدَدِيّاً للانحناءِ على النحوِ التَّالِي:

$$[١: ٧-٤] \quad \sigma = \frac{f_1 + f_2}{f_1 - f_2} \dots\dots$$

حيثُ f_1 ، f_2 هُمَا نِصْفَا قَطْرِ تَكْوِيرِ سَطْحِي العدسة. فمثلاً عندما يَكُونُ $\sigma = 0$ صَفْراً فَإِنَّ العدسة تَكُونُ مُتَمَاثِلَةً الشَّكْلِ: مُتساوية الوجهَيْنِ المُحَدِّثَيْنِ أَوْ مُتساوية الوجهَيْنِ المُقَعَّرَيْنِ، وَعَندَمَا تَكُونُ قِيَمُهُ $\sigma = +1$ ، فَإِنَّ السَّطْحَ الثَّانِي يَكُونُ مُسْتَوِياً بَيْنَمَا يَكُونُ السَّطْحُ الْأَوَّلُ مُحَدَّباً أَوْ مُقَعَّراً، وَعَندَمَا تَكُونُ قِيَمُهُ $\sigma = -1$ فَإِنَّ السَّطْحَ الْأَوَّلَ يَكُونُ مُسْتَوِياً. وَإِذَا كَانَتْ قِيَمُهُ $\sigma > 1$ أَوْ $\sigma < -1$ فَإِنَّ العدسة تَكُونُ هَلَالِيَّةً. وَإِذَا مَا أُذِيرَتِ العدسةُ بِحَيْثُ يَسْقُطُ الضَّوُّ عَلَى سَطْحِهَا الْآخَرِ، فَإِنَّ عاملَ الشَّكْلِ لِكودنْجُتنْ يَحْتَفِظُ بِقِيَمَتِهِ الْمُطْلَقَةِ وَيُغَيِّرُ إشارَتَهُ.

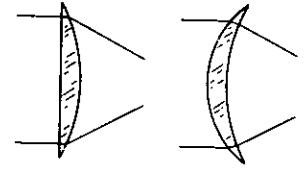
وَبَيْنَمَا تَتَحَدَّدُ قِيَمَةُ σ بِالشَّكْلِ الطَّبِيعِيِّ لِلعدسة، فَإِنَّ عاملَ المَوْجِعِ لِكودنْجُتنْ π الَّذِي يُمَكِّنُ تَسْمِيَتَهُ بِالْعَامِلِ الوُظِيفِيِّ يَعْتَمِدُ عَلَى مَسَافَتِي الجِسْمِ والصُّورَةِ:

$$[١: ٧-٥] \quad \pi = \frac{f_v - f_o}{f_v + f_o} \dots\dots$$



الشَّكْل ٣: عدسات ذات انحناء مختلف ولكنها متساوية البعد البُوري (في الصف الواحد). و يظهر في أسفل العدسة عامل الشَّكْلِ لِكودنْجُتنْ

وكعوامل الشكل فإن العامل π لا وحدة له، وَيَتَرَدَّدُ مقداره بَيْنَ $+\infty$ إلى $-\infty$ ، وَهُوَ يتناسبُ مَعَ إمالة الضوء. فإذا كانت $\pi = -1$ يكونُ الشعاعُ الساقِطُ مُتَوَازِيًا، وإذا كانت $\pi = 0$ صفر فإنَّ مسافةَ الجِسمِ = مسافةَ الصورة، وفي حالة $\pi = +1$ يكونُ الشعاعُ الخارجُ من العدسة مُتَوَازِيًا.



الشكل ٤: الانكسار بـعدسة

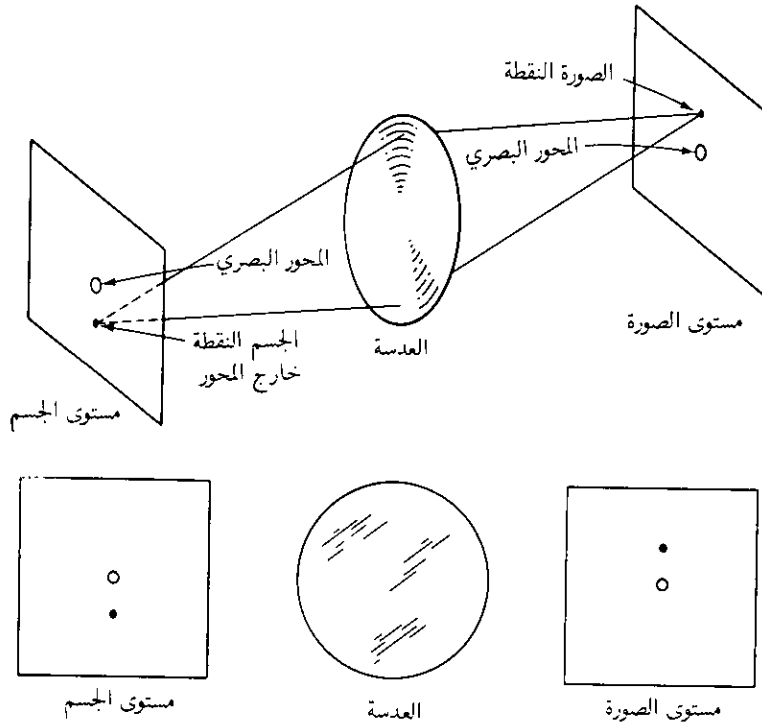
مجمعة: إلى اليسار السطح

المستوي لا يُسهم في الانكسار، بينما إلى اليمين هنالك إسهام متساوٍ من السطحين.

وَلَا يُمَكِّنُ إِزَالَةَ الزَّوْغَانِ الْكُرِّيَّ تَمَامًا لِأَيِّ شَكْلِ لِلْعَدْسَةِ الْمُنْفَرِدَةِ، وَ يُمَكِّنُ انْقِصَاضَهُ عَلَى الْأَقْلَ إِذَا كَانَ الانكسارُ الَّذِي تُوفِّرُهُ الْعَدْسَةُ يَأْتِي بِالتَّسَاوِي مِنْ سَطْحَيْهَا - الشكل ٤. كذلك يُمَكِّنُ انْقِصَاضَ الزَّوْغَانِ الْكُرِّيَّ بِاسْتِخْدَامِ زُجَاجٍ مُعَامِلُ انكساره أَكْبَرُ، أَوْ بِجَعْلِ أَحَدِ السَّطْحَيْنِ أَوْ كِلَيْهِمَا شَبَهَ كُرِّيٍّ، أَوْ بِضَمِّ عَدْسَةٍ مُوجِبَةٍ إِلَى عَدْسَةٍ سَالِبَةٍ أَحْسَنَ اخْتِيَارَهُمَا.

الذؤابة Coma

يُشتَقُّ لَفْظُ الذُّوَابَةِ مِنَ الشَّكْلِ الْمُدَنَّبِيِّ الَّذِي يَظْهَرُ فِي صُورَةِ جِسمٍ نُقْطَةٍ مُوضُوعٍ بَعِيدًا عَنِ الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ؛ فَفِي الزَّوْغَانِ الْكُرِّيَّ تُرَكِّزُ مَنَاطِقُ الْعَدْسَةِ الْمُخْتَلِفَةُ الْأَشْعَةَ الْمَوَازِيَةَ لِلْمَحْوَرِ فِي بُؤَرٍ بَيْنَهَا فَارَقٌ طَوِيلٌ. أَمَّا إِذَا كَانَتِ الْأَشْعَةُ مَائِلَةً عَلَى الْمَحْوَرِ بِزَاوِيَةٍ مَا، فَانْ الذُّوَابَةُ تَظْهَرُ؛ وَلِذَا فَإِذَا صُحِّحَتِ مَنَظْمَةُ الْعَدْسَاتِ لِلزَّوْغَانِ الْكُرِّيَّ فَلَا تَكُونُ صُورُ النِّقَاطِ الْبَعِيدَةِ عَنِ الْمَحْوَرِ دَقِيقَةً تَمَامًا مَا لَمْ تُصَحَّحِ الْمَنَظْمَةُ لِلذُّوَابَةِ أَيْضًا - الشَّكْل ٥.

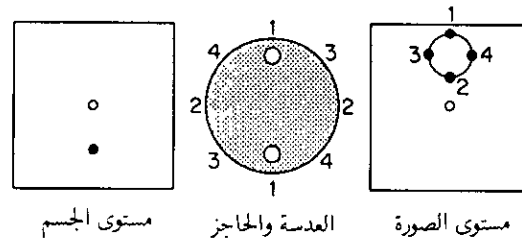


الشكل ٥: لا ذؤابة ظاهرة.

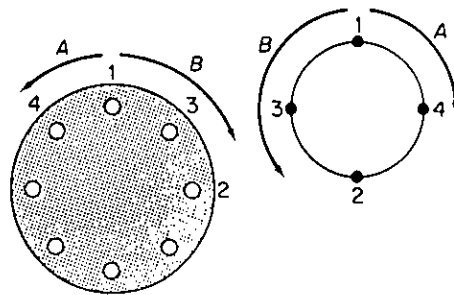
تَصَوَّرَ أَنَّ حَاجِزاً مُعْتَمِماً بِهِ ثُقْبَانِ مَرْقَمَانِ ١ - ١ وَضَعَ أَمَامَ عَدْسَةٍ؛ فَكَمَا فِي الشَّكْلِ هـ يُمَكِّنُ إِسْقَاطَ جِسْمٍ نُقْطَةٍ بَعِيدٍ عَنِ الْمَحْوَرِّ عَلَى سِتَارَةٍ. وَيَتَجَمَّعُ الضَّوُّ الَّذِي يَمُرُّ عِبرَ الثُّقْبَيْنِ ١ - ١ فِي الْبُورَةِ ١ عَلَى السِتَارَةِ - الشَّكْلِ ٦. وَإِذَا مَا أُدِيرَ الْحَاجِزُ ذَوِ الثُّقْبَيْنِ ٩٠° إِلَى الْوَضْعِ ٢ - ٢ يَتَجَمَّعُ الضَّوُّ فِي الْبُورَةِ ٢. وَلَا وَضَاعَ الْحَاجِزِ الْأَرْبَعَةِ ١ - ٢ - ٣ - ٤؛ يَتَجَمَّعُ الضَّوُّ فِي الدَّائِرَةِ ١ - ٢ - ٣ - ٤ بِذَلِكَ تَجَمُّعِهِ فِي نُقْطَةٍ، وَتُسَمَّى هَذِهِ الدَّائِرَةُ بِالْـدَّائِرَةِ الدَّوَّابِيَّةِ.

لَا حِطَّ كَيْفَ تَتَوَرَّجُ الصُّورُ النُّقْطِيَّةُ ١ - ٢ - ٣ - ٤ عَلَى الدَّائِرَةِ الدَّوَّابِيَّةِ تَبَعاً لِأَوْضَاعِ الثُّقْبَيْنِ فِي الْحَاجِزِ - الشَّكْلِ ٧.

إِنَّ الْمَسَافَةَ بَيْنَ النُّقْطَتَيْنِ ١ و ٣ عَلَى الْحَاجِزِ هِيَ ٤٥°، وَلَكِنَّهَا تُسَاوِي ٩٠° فِي مُسْتَوَى الصُّورَةِ، كَذَلِكَ الثُّقْبَانِ ١ و ٢ يَتَحَرِّفَانِ بِزَاوِيَةٍ ٩٠° فِي الْحَاجِزِ وَبِزَاوِيَةٍ ١٨٠° فِي الصُّورَةِ؛ وَلِذَا فَإِنَّ الْإِزَاحَةَ الزَّاوِيَّةَ لِلصُّورَةِ تُسَاوِي ضِعْفَ الْإِزَاحَةِ الزَّاوِيَّةِ فِي مُسْتَوَى الْعَدْسَةِ، بِالْإِضَافَةِ إِلَى أَنَّ اتِّجَاهَ دَوَّرَانِهَا هُوَ الْإِتِّجَاهُ الْمُضَادُّ.

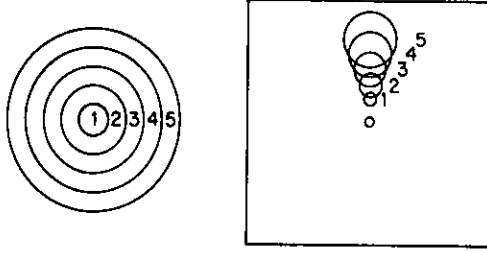


الشَّكْلِ ٦: الدَّوَّابَّةُ وَالدَّائِرَةُ الدَّوَّابِيَّةُ



الشَّكْلِ ٧: الْإِزَاحَةُ الزَّاوِيَّةُ لِلْعَدْسَةِ إِلَى الْيَسَارِ وَمُسْتَوَى الصُّورَةِ إِلَى الْيَمِينِ فِي حَالَةِ الزَّوْغَانِ الدَّوَّابِيَّ

وَتُحَدِّثُ الْمَنَاطِقُ الْكُبْرَى فِي الْعَدْسَةِ الَّتِي يَمُرُّ فِيهَا الضَّوُّ دَوَائِرَ دَوَائِبِيَّةٍ أَوْسَع - الشَّكْل ٨؛ فِي الْحَقِيقَةِ فَإِنَّ نِصْفَ قُطْرِ الدَّائِرَةِ الدَّوَائِبِيَّةِ يَتَنَاسَبُ طَرْدِيًّا مَعَ مُرَبَّعِ نِصْفِ قُطْرِ الْمَنَاطِقَةِ ذَاتِ الْعَلَاقَةِ. كَذَلِكَ فَالْمَسَافَةُ مِنْ مَرَكِزِ الدَّائِرَةِ الدَّوَائِبِيَّةِ إِلَى الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ تَتَنَاسَبُ مَعَ مُرَبَّعِ نِصْفِ قُطْرِ الْمَنَاطِقَةِ. وَيَضُمُّ كُلُّ الدَّوَائِرِ الدَّوَائِبِيَّةِ الْحَادِثَةِ بِالضَّوِّ الْمَارِّ فِي الْعَدْسَةِ نَحْصَلُ عَلَى شَكْلِ يُسَمَّى بِالنَّارِ الدَّوَائِبِيَّةِ **comatic flare**؛ وَقَدْ تُشِيرُ هَذِهِ النَّارُ إِلَى الْمَحْوَرِ أَوْ بَعِيداً عَنْهُ (الشَّكْل ٨) يَتَّبَعُ لِنُوعِ الْعَدْسَةِ الَّتِي تُحَدِّثُ الزَّوْغَانَ.



الشَّكْل ٨: الْمَنَاطِقُ الْأَوْسَعُ تُكَوِّنُ دَوَائِرَ دَوَائِبِيَّةٍ أَكْبَرُ؛ الرَّسْمُ إِلَى الْيَمِينِ يَظْهَرُ النَّارَ الدَّوَائِبِيَّةَ.

وَتَخْتَلِفُ الدَّوَائِبِيَّةُ عَنِ الزَّوْغَانِ الْكُرِّيِّ مِنْ عِدَّةِ أَوْجِهٍ أَهْمُهَا أَنَّ الزَّوْغَانَ الدَّوَائِبِيَّ يَعْتمِدُ عَلَى زَاوِيَةِ التَّمِيلَانِ؛ فَهِيَ لَا تَوَجَّدُ عَلَى الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ. وَتُسَمَّى الْمَنْظُومَةُ الْبَصَرِيَّةُ الَّتِي تَخْلُو مِنَ الزَّوْغَانِ الْكُرِّيِّ وَالذَّوَائِبِيَّةِ الْمَنْظُومَةُ الْأَبْلَانِيَّةِ أَوْ الْأَزْوَغَانِيَّةِ **aplanatic**.

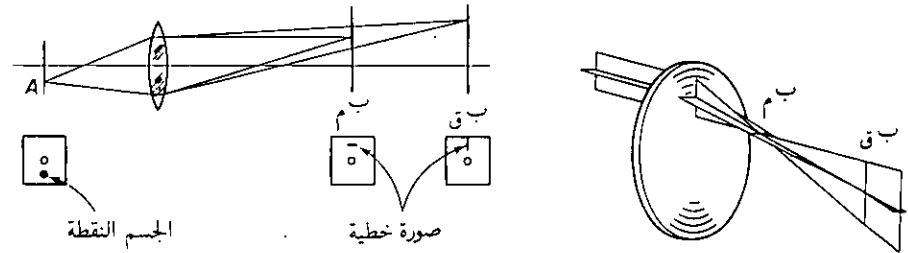
أَلْبُؤْرِيَّةٌ أَوْ اسْتِجْمَاتِيَّةٌ

نَصَوْرُ حُزْمَةٍ ضَوْئِيَّةٍ رَفِيعَةٍ ذَاتِ مَقْطَعٍ عَرْضِيٍّ دَائِرِيٍّ تَسْقُطُ عَلَى سَطْحٍ كُرِّيٍّ بَعِيداً عَنِ الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ بِمَسَافَةٍ مَا، بِحَيْثُ يُكَوِّنُ الضَّوُّ السَّاقِطَ قِطْعاً نَاقِصاً عَلَى السَّطْحِ: مِخْوَرُهُ الْأَسَاسِيُّ يُشِيرُ إِلَى قُطْبِ السَّطْحِ، وَمِخْوَرُهُ الثَّانَوِيُّ مُتَعَامِدٌ عَلَى الْمَحْوَرِ الْأَسَاسِيِّ. وَتَتَجَمُّعُ الْأَشْعَةُ الَّتِي تَقَعُ عَلَى الْمَحْوَرِ الْأَسَاسِيِّ فِي بُؤْرَةٍ عِنْدَ النِّقْطَةِ بِمِ الْيُسَمَّى الْبُؤْرَةُ التَّمَاسِيَّةُ **tangential focus** - الشَّكْل ٩.



الشَّكْل ٩: تَتَجَمُّعُ الْحُزْمُ الضَّوئِيَّةُ فِي بُؤْرٍ مُخْتَلِفَةٍ تَبَعاً لِاتِّجَاحِهَا: الْبُؤْرَةُ التَّمَاسِيَّةُ إِلَى الْيَسَارِ وَالْبُؤْرَةُ الْقَطْرِيَّةُ إِلَى الْيَمِينِ.

أما الأشعة الواقعة على المحور الثانوي فتتجمع في بؤرة عند النقطة ب التي تسمى **البؤرة القطرية radial focus**. وبعبارة أخرى يظهر عند تصوير جسم نقطة بعيد من المحور البصري بواسطة سطح بسيط أو عدسة خظان بؤريان: الخط القطري الذي يقع في مستوى السقوط، وهو المستوى الذي يحوي الجسم ومحور العدسة، والخط التماسي الذي هو متعامد مع ذلك المستوى - الشكل ١٠. ويسمى هذا الفصل الناتج بال**البؤرية** أو **الاستجماتية**. *

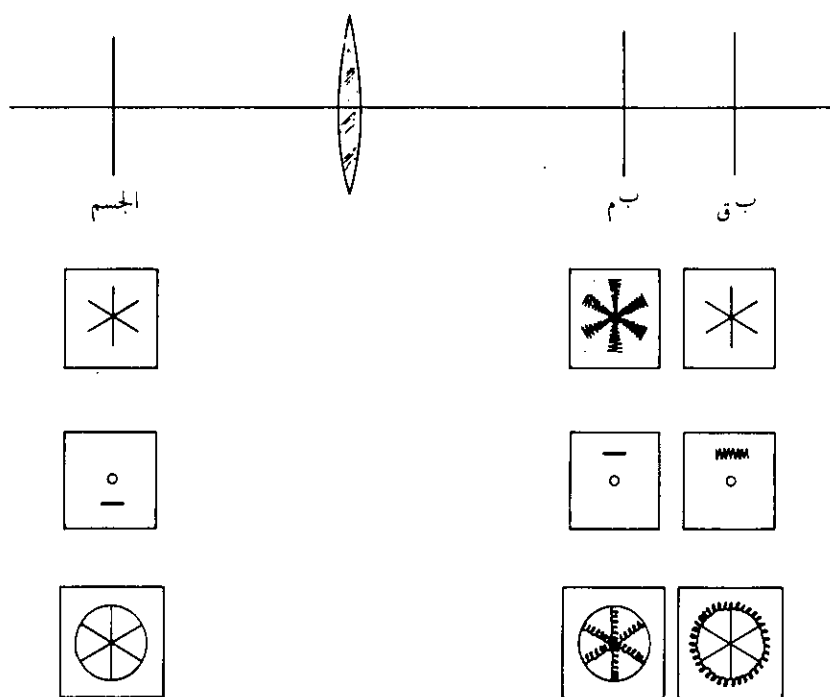


ولو افترضنا أنَّ الجِسمَ كانَ كالخَطِّ القُطْرِيِّ فَإِنَّ صَوْرَتَهُ سَتَكُونُ واضِحَةً ودَقِيقَةً عِنْدَ بَنِي فِي حِينِ سَتَكُونُ غَيْرَ واضِحَةٍ عِنْدَ بَنِي ؛ وَمِنْ ثَمَّ إِذَا أُدِيرَ الجِسمُ الخَطِّيُّ حَوْلَ المَحْوَرِ ، وَسَجَلَتِ الصُّورُ المُتَعاقِبَةُ فَإِنَّا نَحْصِلُ عَلَى النَتِيجَةِ نَفْسِهَا وَلَكِنْ بِتَمَائِلٍ دَوْرَانِيٍّ (الشكل ١٢ - الرسم العلوي) .

وهكذا لَوْ كَانَ لَدَيْنَا جِسْمٌ ذُو شَكْلٍ مُعَقَّدٍ كَدَوْلَابٍ مُشَعِّعٍ أَوْ ذِي رِيشٍ مَحَوَّرَةٍ يَنْطَبِقُ

على المِخْوَرِ البَصْرِيِّ ، فإن حافة الدُولَابِ تَتَجَمَّعُ في البُؤْرَةِ بـم في حين تَتَجَمَّعُ شعاعاتُ أو رِيشُ الدُولَابِ في البُؤْرَةِ بـق - الرسم السفلي .

وتُسَمَّى المسافة بين البُؤْرَتَيْنِ بـم وَ بـق كما في العدسة الأسطوانية بالفترة الاستجماتية (اللابؤرية) أو بفترة ستيرن *sturm interval* ، وهي مقياس لدرجة اللابؤرية . وتَقَعُ الصورة الفضلى مرّة أخرى في مكان ما بين البُؤْرَتَيْنِ (بـق ، بـم) ، أي في المستوى الذي تكونُ عنده دائرة التشويش أقلّ ما يُمْكِنُ لصورة جسم نقطة .



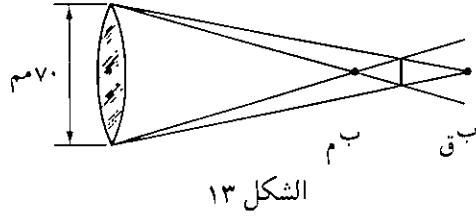
البؤرة القطرية البؤرة التماسية

الشكل ١٢ : الجسم الخطي القطري ذو التماثل الدوراني - الرسم الى الاعلى ، والجسم الخطي التماسي - الوسط ، والصورة الاستجماتية لدولاب مشع - الرسم السفلي .

مثال :

عدسة قُطْرُها ٧٠ مم وَبُعْدُها التَّماسِي ١٦ و ٧ سم وَبُعْدُها البُؤْرِي القُطْرِي ١٨,٥ سم - الشكل ١٣ .

فَلْيَكُنْ نَجْدَ أَوَّلًا مَوْقِعَ الدَّائِرَةِ ذَاتِ التَّشْوِيشِ الْأَقْلَى، نُحَوِّلُ أَوَّلًا الْبَعْدَيْنِ الْبُورَيْنِ عَم،
عَنْ إِلَى قُوَّتَيْ كَسْر:



$$ق م = \frac{1}{\frac{1}{16,7 \text{ سم}}} = \frac{1}{\frac{1}{6 \text{ م}}} = 6 \text{ م}$$

$$ق ق = \frac{1}{\frac{1}{18,5 \text{ سم}}} = \frac{1}{\frac{1}{5,4 \text{ م}}} = 5,4 \text{ م}$$

وَتَقَعُ الدَّائِرَةُ ذَاتُ التَّشْوِيشِ الْأَقْلَى فِي «الْمُنْتَصَفِ الدِّيُوبْتَرِي»، أَيِ عِنْدَ:

$$٥,٧ = \frac{٥,٤ + ٦}{٢} = \frac{١,٤}{٢} \text{، أَيِ أَنَّهَا عَلَى بُعْدٍ،}$$

$$\text{فَصَر} = \frac{١٧,٥ \text{ سم من العدسة، أَيِ أَقْرَبَ بِقَلِيلٍ إِلَى الْبُورَةِ الْيُسْرَى.}}{١ - ٥,٧}$$

وَيُحَسَّبُ قُطْرُ دَائِرَةِ التَّشْوِيشِ الْأَقْلَى بِاسْتِخْدَامِ الْمُثَلَّثَاتِ الْمُتَشَابِهَةِ:

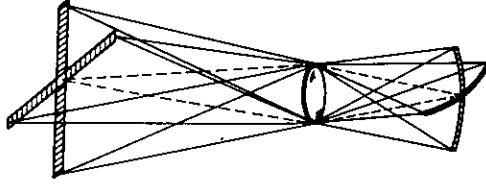
$$\frac{\text{القطر}}{(١٧,٥ - ١٨,٥)} = \frac{٧٠}{١٨,٥}$$

$$\therefore \text{القطر} = \frac{٧٠}{١٨,٥} = ٣,٧٨ \text{ مم.}$$

تقوس المجال Curvature of field

يُشِيرُ تَقْوُسُ الْمَجَالِ إِلَى قَسَلِ الْعَدَسَةِ فِي تَحْوِيلِ جِسْمٍ مُسْتَوٍ إِلَى صُورَةٍ مُسْتَوِيَةٍ تَمَامًا -

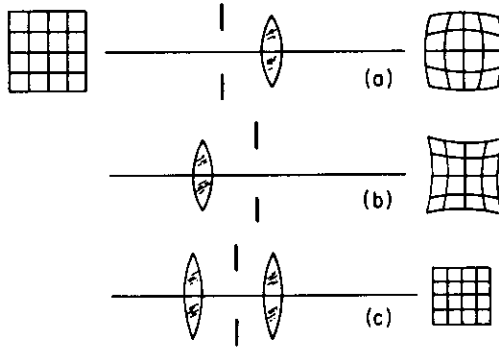
الشكل ١٤، وهو وثيق الصلة بالاستجماتية. فكلاهما يتناسب طردياً مع ميلان الأشعة وعكسياً مع مربع البعد البؤري؛ غير أن الاستجماتية تتغير مع مسافة الجسم، أما تقوس المجال فلا يتغير.



الشكل ١٤: تقوس المجال

التشوه Distortion

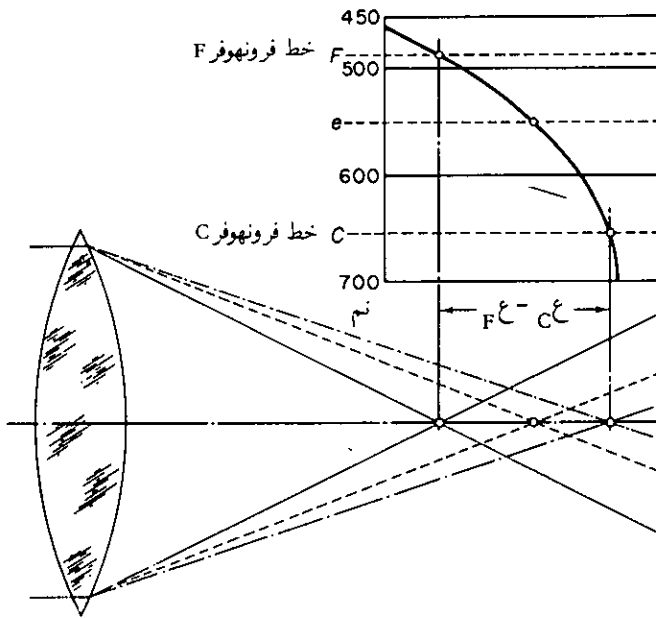
إن التشوه مثل الذواية، فهو ليس زوغاناً أساسياً ولكنه نتيجة لغيره. ففي التشوه نجد أن التكبير الخطي العرضي للصورة يتناسب مع المسافة أي مسافة الجسم من المحور البصري. ويتسبب هذا الأمر في تشوه الجسم، فيجعل الجسم المربع يبدو مثل برميل أو وسادة دبابيس. ولا يؤثر التشوه في تبيين الصورة، وإنما يغير من موقع نقاطها. ولا يظهر التشوه عندما تكون العدسة رقيقة إلى حد كافٍ؛ كذلك فاستخدام حاجز لانقاص الزوغان الكروي قد يحدث تشوهاً - الشكل ١٥.



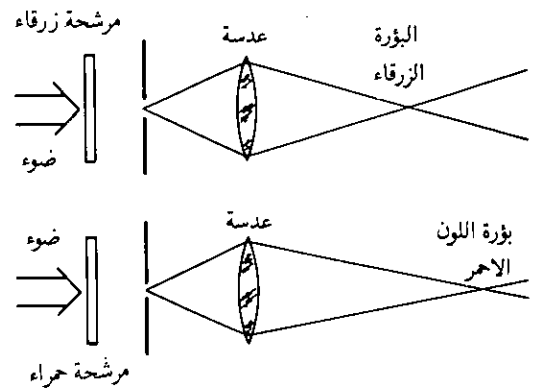
الشكل ١٥: أ) تشوه برميلي، ب) تشوه مثل وسادة الدبابيس، ج) ثنائي متماثل من عدستين بينهما حاجز في الوسط وخالٍ من التشوه نسبياً؛ وتكون النتائج بعدسة سالبة عكس ذلك تماماً.

ألزوغان اللوني Chromatic Aberration

لَقَدْ رَأَيْنَا فيما سَبَقَ أَنَّ مُعَامِلَ انكسارِ وَسَطِ شَفَافٍ يَتَغَيَّرُ بِتَغْيِيرِ الطولِ المَوْجِيّ؛ ولذا فَإِنَّ العَدْسَةَ الواحِدَةَ يَكُونُ لَهَا أبعادُ بُؤْرِيَّةٌ مُخْتَلِفَةٌ لِلألوانِ المُخْتَلِفَةِ: ففي حالةِ العَدْسَةِ البسيطةِ المَوْجِبَةِ يَتَجَمُّعُ الضوءُ الأزرقُ في بُؤْرَةٍ أَقْرَبُ إلى العَدْسَةِ مِنْ البُؤْرَةِ التي يَتَجَمُّعُ فيها اللَوْنُ الأحمرُ - الشكل ١٦. وتُسَمَّى المسافةُ بَيْنَ الصُورِ المحوريةِ بِالزَّوْغَانِ اللَوْنِيِّ الطُولِيِّ أَوِ المِخْوَرِيِّ longitudinal chromatic؛ أما الفارقُ الرَّأْسِيُّ في ارتفاعِ الصورةِ الذي يَخْدُثُ مِنَ الفارقِ المِخْوَرِيِّ فيُسمَّى بِالزَّوْغَانِ اللَوْنِيِّ العَرَضِيِّ Lateral chromatic. وتَبْدُو الصورةُ التي تُرى في بُؤْرَةِ اللونِ الأزرقِ ذاتَ تفصيلاتٍ زرقاءَ مُحاطَةٍ بهالةٍ زرقاءَ. وَيُقَالُ لِلزَّوْغَانِ اللَوْنِيِّ إِنَّهُ مُوجِبٌ إِذَا كَانَتِ البُؤْرَةُ الزرقاءُ هِيَ الأَقْرَبُ إلى العَدْسَةِ كَمَا هُوَ مُوضَحٌ في الشكلِ ١٦. وفي حالةِ العَدْسَةِ المَفْرَقَةِ نَحْصَلُ على نَتَائِجٍ مُضَادَّةٍ.



الشكل ١٧: الزوغان اللوني وَرَسْمُ للبعد البُؤْرِي مُقَابِلَ الطولِ المَوْجِي



الشكل ١٦: الزوغان اللوني: بعد بُؤْرِي مُخْتَلِفٌ لِكُلِّ مِنَ اللَوْنِ الأزرق - الرسم العلوي، والأحمر - الرسم السفلي.

وَيُمْكِنُ رَسْمُ العِلَاقَةِ بَيْنَ الطولِ المَوْجِيّ والبُعدِ البُؤْرِيِّ لَهُ كَمَا في الشكلِ ١٧. وَيُمْكِنُ التَّعْبِيرُ عَنِ الزَّوْغَانِ اللَوْنِيِّ كَمَا في تَحْلِيلِ الضوءِ بِالفَارِقِ بَيْنَ البُعدِ البُؤْرِيِّ لِلَوْنِ

الأحمر أي خَطَّ C بِحَسَبِ تَسْمِيَةِ فَرُونْهوفرَ والبعدِ البُورِّيِّ لِلْوَنِ الأزرقِ أي الخَطَّ F ؛ وَمِنْ ثَمَّ

$$\text{فإنَّ الزَّوْغَانَ اللَّوْنِيَّ يَتَغَيَّرُ مَعَ } \left(\frac{F - C}{D} \right).$$

وَلَا تُظْهَرُ المَرايا أيَّ زَوْغَانِ لَوْنِيٍّ . وَيُقَدَّمُ الجَدْوَلُ ١ خلاصَةً بِالزَّوْغَانَاتِ الْمُخْتَلِفَةِ : طَبِيعَتِهَا وَطَرُقِ تَصْحِيحِهَا .

وَعِنْدَمَا يَمُرُّ الضَّوُّ مَرَّتَيْنِ فِي العَدْسَةِ نَفْسِهَا وَفِي اتِّجَاهَيْنِ مُتَعَاكِسَيْنِ ، فإنَّ الزَّوْغَانَاتِ العَرَضِيَّةَ أيَّ الذَّوَابَةَ والتَّشَوُّهَ واللَّوْنَ الجَانِبِيَّ تُلغى جُزْئِيًّا ؛ بَيْتَمَا تَتَدَعَّمُ الزَّوْغَانَاتُ الطَّوْلِيَّةُ أيَّ الزَّوْغَانُ الكُرِّيُّ والاستِجْمَاتِيَّةُ واللَّوْنُ الطَّوْلِيُّ . أَمَّا تَفْصِيلاتُ تَصْحِيحِ العَدَسَاتِ لِلزَّوْغَانَاتِ فَسَيُقَدَّمُ فِي الفَصْلِ التَّالِي .

الجدول رقم (١)

خلاصة بالزَّوْغَانَاتِ

الزَّوْغَان	ألَّون	أَلْسَمَات	التَّصْحِيحُ (التَّعْدِيلُ)
١ . الزَّوْغَانُ الكُرِّي	أَحَادِي اللَّوْن	أَسَاسِي	ثَنَائِي مُلتَصِقٌ أَوْ شَبهُ كُرِّي
٢ . الذَّوَابَةُ	أَحَادِي اللَّوْن	ثَانَوِي	ثَنَائِي مُلتَصِقٌ
٣ . الاستِجْمَاتِيَّةُ	أَحَادِي اللَّوْن	أَسَاسِي	ثَنَائِي مُنفَصِلٌ
٤ . تقوسُ المَجَالِ	أَحَادِي اللَّوْن	أَسَاسِي	ثَنَائِي مُنفَصِلٌ
٥ . التَّشَوُّه	أَحَادِي اللَّوْن	ثَانَوِي	ثَنَائِي مُنفَصِلٌ مَعَ حَاجِزٍ فِي الوَسْطِ
٦ . الزَّوْغَانُ اللَّوْنِي	مُتَعَدِّدُ اللَّوْن	أَسَاسِي	ثَنَائِي مُلتَصِقٌ أَوْ مُنفَصِلٌ

اقتراحات لقراءات اضافية

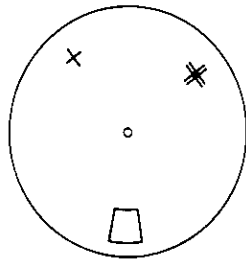
- F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, 3rd ed. (New York: McGraw-Hill Book Company, 1957).
- A. I. Mahan and H. A. Templin, "Third-Order Methods as Applied to Zonal Aberrations of Single Long Focal Length Lenses," *J. Opt. Soc. Am.* 43 (1953), 356-65.
- C. H. Palmer, *Optics Experiments and Demonstrations*, (Baltimore: Tho Johns Hopkins Press, 1962).
- H. G. Zimmer, *Geometrical Optics*, (New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag Inc., 1970).

المسائل

- ١-٧: ١ يَفْصِلُ سَطْحُ كُرِّيٍّ مَنْفَرْدٌ نِصْفَ قُطْرِهِ + ١٠ سم بَيْنَ وَسَطَيْنِ: مُعَامِلُ انْكَسَارِ
الْأَوَّلِ ١,٠ والثَّانِي ١,٥؛ جَد:-
أ) الزَّوْغَانِ الطَّوْلِي.
ب) الزَّوْغَانِ الْعَرْضِي.
علماً أَنَّ الضَّوءَ السَّاقِطَ ضَوْءٌ مُتَوَازٍ وَيَسْقُطُ عَلَى مَنَاطِقَةٍ فِيهِ عَلَى ارْتِفَاعِ ٢ سم
مِنْ مِخْوَرِهِ.
- ٢-٧: ١ سَطْحُ كُرِّيٍّ مَنْفَرْدٌ نِصْفَ قُطْرِهِ - ٦ سم يَفْصِلُ بَيْنَ الرُّجَاجِ (م = ١,٦٣) وَالْمَاءِ؛
عَيْنٌ: أ) الزَّوْغَانِ الْكُرِّيِّ الطَّوْلِي ب) الزَّوْغَانِ الْكُرِّيِّ الْعَرْضِي، وَذَلِكَ لِضَوْءٍ
مُتَوَازٍ ارْتِفَاعُهُ ٢٢ مم عَنِ الْمَحْوَرِ.
- ٣-٧: ١ عَدَسَةٌ رَقِيقَةٌ مُعَامِلُ انْكَسَارِهَا ١,٦٠ وَنِصْفُ قُطْرِ تَكْوِيرِ سَطْحِهَا + ١٥ سم،
- ٣٠ سم:-
أ) حَدِّدْ عَامِلَ الشَّكْلِ لِكُوْدُنْجَتْنِ.
ب) حَدِّدْ عَامِلَ الْمَوْقِعِ لِجِسْمٍ يَبْعُدُ ١,٢ م عَنِ الْعَدَسَةِ.
- ٤-٧: ١ عَدَسَةٌ مُعَامِلُ انْكَسَارِهَا ١,٦٦ تُكَوِّنُ صُورَةً تَبْعُدُ ٦,٢ م لِجِسْمٍ يَبْعُدُ ٤٠ سم.
فَإِذَا كَانَ نِصْفُ قُطْرِ تَكْوِيرِ السَّطْحِ الْأَمَامِيِّ = + ١٢ سم؛ حَدِّدْ عَامِلِي الشَّكْلِ
وَالْمَوْقِعِ.

٥-٧:١ عَدَسَةٌ اسْتَجْمَاعِيَّةٌ كَبِيرَةٌ بُعْدُهَا الْبُورِيُّ التَّمَاسِيُّ ٢٢,٤ سَم وَالْقُطْرِيُّ ٢٣,٢ سَم؛ جِدْ نِصْفَ قُطْرٍ فَتَحَةِ الْحَاجِزِ الْقَرِيبِ مِنَ الْعَدَسَةِ حَتَّى يَكُونَ قُطْرُ دَائِرَةِ التَّشْوِيشِ الْأَقْلَى ١ مَم.

٦-٧:١ يُوضَّحُ الشَّكْلُ ١٨ مَجَالَ النَّظَرِ: النِّقْطَةُ فِي الْمَرْكَزِ تُمَثِّلُ الْمَحْوَرَ الْبَصَرِيَّ. حَصْرُ رَسْمَيْنِ مُتَشَابِهَيْنِ: أَحَدُهُمَا لِلْبُورَةِ التَّمَاسِيَّةِ وَالْآخَرُ لِلْبُورَةِ الْقُطْرِيَّةِ، وَبَيِّنَ كَيْفَ تَتَغَيَّرُ الصُّورَةُ عِنْدَ هَاتَيْنِ الْبُورَتَيْنِ فِي حَالَةِ الْاسْتَجْمَاعِيَّةِ الشَّدِيدَةِ. أَهْمِلْ حَقِيقَةً أَنَّ الصُّورَ مَقْلُوبَةٌ بِالنِّسْبَةِ إِلَى الْجِسْمِ.



الشكل ١٨

٧-٧:١ بِاسْتِخْدَامِ مُعَامِلَاتِ الْانكِسَارِ فِي الْجَدْوِلِ ١ فِي الْفَصْلِ الْخَامِسِ، جِدَ الزَّوْغَانَ اللَّوْنِيَّ الطَّوْلِيَّ بَيْنَ اللَّوْنَيْنِ الْأَحْمَرِ وَالْأَزْرَقِ لِعَدَسَةٍ مَسْتَوِيَةٍ مُحَدَّيَّةٍ مَصْنُوعَةٍ مِنَ الزُّجَاجِ الصُّوَانِيِّ وَنِصْفَ قُطْرٍ تَكْوِيرِهَا ٢٠+ سَم.

٨-٧:١ عَدَسَةٌ مَصْنُوعَةٌ مِنَ الزُّجَاجِ التَّاجِيِّ بُعْدُهَا الْبُورِيُّ ٤٢ سَم لِلْوَلْنِ الْأَزْرَقِ؛ جِدْ بُعْدَهَا الْبُورِيَّ لِلضَّوِّ الْأَحْمَرِ بِاسْتِخْدَامِ مُعَامِلَاتِ الْانكِسَارِ فِي الْجَدْوِلِ ١ فِي الْفَصْلِ الْخَامِسِ.

٩-٧:١ عَدَسَةٌ مِنَ الْبِلَاسْتِيكِ مُعَامِلُ انكِسَارِهَا لِلضَّوِّ الْأَصْفَرِ ١,٦٥٠، وَبُعْدُهَا الْبُورِيُّ لِلضَّوِّ الْأَصْفَرِ كَذَلِكَ ٦٢ سَم، وَبُعْدُهَا الْبُورِيُّ لِلضَّوِّ الْأَحْمَرِ ٦٣,٥ سَم؛ جِدْ مُعَامِلَ الْانكِسَارِ لِلضَّوِّ الْأَحْمَرِ.

١٠-٧:١ عَدَسَةٌ مِنَ الزُّجَاجِ التَّاجِيِّ بُعْدُهَا الْبُورِيُّ ١٠+ سَم لِلضَّوِّ الْأَصْفَرِ؛ جِدِ الْبُورِيَّ لِعَدَسَةٍ مِنَ الزُّجَاجِ الصُّوَانِيِّ بِحَيْثُ تَعْمَلُ مَعَ الْعَدَسَةِ الْأُولَى ثَنَائِيًّا غَيْرَ لَوْنِيٍّ لِلضَّوِّينِ الْأَحْمَرِ وَالْأَزْرَقِ. اسْتَخْدِمِ مُعَامِلَاتِ الْانكِسَارِ فِي الْجَدْوِلِ ١ مِنَ الْفَصْلِ الْخَامِسِ.

الفصل ١ : ٨

تصميم العدسة

Lens Design

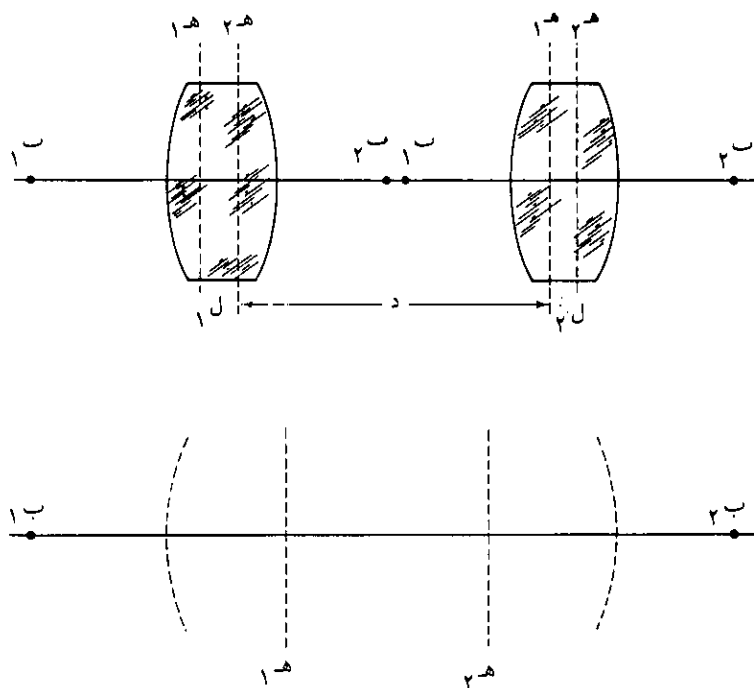
بَعْدَ تَنَاوُلِنا السُّطُوحَ الْمَفْرَدَةَ وَالْعَدَسَاتِ الرَّقِيقَةَ وَالسِّمِكَةَ ، وَالزُّوْغَانَاتِ ، نُنْتَقِلُ الْآنَ إِلَى مَنْظُومَاتٍ عَدَسِيَّةٍ أَكْثَرَ تَعْقِيداً .

مَجْمُوعَاتُ الْعَدَسَاتِ

لَقَدْ رَأَيْنَا فِيْمَا سَبَقَ أَنَّ قُوَّةَ الْكَسْرِ الْكُلِّيَّةِ لِعَدَسَتَيْنِ رَقِيقَتَيْنِ تُسَاوِي ق _١ + ق _٢ . وَلَمَّا كَانَتْ قُوَّةُ الْكَسْرِ هِيَ مَقْلُوبُ الْبَعْدِ الْبُورِي ، فَإِنَّ الْبَعْدَ الْبُورِيَّ لِلْمَجْمُوعَةِ ع = $\frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$.

وَإِذَا كَانَتِ الْعَدَسَتَانِ مَقْصُولَتَيْنِ بِمَسَافَةٍ مَا ، فَانِ الْعِلَاقَةُ السَّابِقَةُ لَا تَصِحُّ . لِنَأْخُذْ عَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ عَدَسَتَيْنِ مُجْمَعَتَيْنِ ل ١ وَل ٢ مَقْصُولَتَيْنِ بِمَسَافَةٍ مِقْدَارُهَا د كَمَا فِي الشَّكْلِ ١ . وَعِنْدَ اعْتِبَارِ كُلٍِّ مِنَ الْعَدَسَتَيْنِ بِمُقَرَّدِهَا ، فَإِنَّ لِلْعَدْسَةِ الْوَاحِدَةِ بُعْدَيْنِ بُورِيَّيْنِ وَبُورَتَيْنِ تُقَاسَانِ مِنَ الْمُسْتَوِيِّينِ الْأَسَاسِيِّينِ بِحَسَبِ الطَّرِيقَةِ الْاعْتِيَادِيَّةِ - الرَّسْمُ الْعُلُوي فِي الشَّكْلِ ١ ؛ إِلَّا أَنَّ الْمَنْظُومَةَ يُمَكِّنُ اعْتِبَارُهَا عَدَسَةً سَمِكةً وَاحِدَةً بِبُعْدَيْنِ بُورِيَّيْنِ ع ١ ، ع ٢ وَمُسْتَوِيَّيْنِ أُسَاسِيَّيْنِ ه ١ ، ه ٢ .

وَلِنَفْتَرِضْ أَنَّ مَسَافَتِي الْجِسْمِ وَالصُّورَةِ مِنَ الْعَدْسَةِ ١ ، كَمَا يُقَاسَانِ مِنْ مُسْتَوِيَّيْهَا الْأَسَاسِيَّيْنِ ، ه ١ ف ١ ، وَأَنَّ مَسَافَتَيْهِمَا مِنَ الْعَدْسَةِ الثَّانِيَةِ هُمَا ف ٢ ، ه ٢ ، فِي حِينِ أَنَّ مَسَافَتَيْهِمَا مِنَ الْمَنْظُومَةِ الْمُؤَلَّفَةِ هُمَا ف ٢ ، ه ٢ .



الشكل ١ : مجموعة من عدستين مفصولتين بمسافة .

وَيُعَيَّنُ التَّكْبِيرُ الْخَطِّيُّ الْعَرَضِيُّ لِلْمَنْظُومَةِ بِحَاصِلِ ضَرْبِ تَكْبِيرَاتِ عُنَاصِرِ الْمَنْظُومَةِ،
أَيُّ أَلَّا :-

$$\frac{F_{ص}}{F_{ح}} = \left(\frac{F_{ص1}}{F_{ح1}} \right) \left(\frac{F_{ص2}}{F_{ح2}} \right) = T$$

وَلَكِنِّي نَجِدُ الْبُعْدَ الْبُورِيَّ لِلْمَنْظُومَةِ ، نَضْعُ :-

$$F_{ح} = F_{ح1} = \infty ،$$

$$F_{ص1} = E_1 ،$$

$$F_{ح2} = (E_1 - d) ،$$

$$F_{ص2} = \frac{F_{ح2} E_2}{F_{ح2} + E_2} ،$$

$$F_{ص} = E \dots\dots$$

[١ : ٨-٢]

ومن ثمَّ نحصلُ على :-

$$ع = ف_ح = \frac{ف_ص_1}{ف_ح_1} = \frac{ف_ص_2}{ف_ح_2} = \frac{1}{ف_ح} \left(\frac{ع_1}{ف_ح_1 + ع_2} \right)$$

[١: ٨-٣]

$$..... = \frac{ع_1 ع_2}{ع_1 + ع_2 - د}$$

وإذا كانَ لَدَيْنَا سَطْحَانِ بَدَلِ العَدَسَتَيْنِ ، أو إذا كانَ الوَسْطُ بَيْنَ العَدَسَتَيْنِ غَيْرَ الخَلَاءِ وَجَبَ إدْخَالُ معاملِ الانكسارِ لِلوَسْطِ بَيْنَهُمَا ؛ وَهَكَذَا نَحْصِلُ على :-

[١: ٨-٤]

.....

$$\boxed{\frac{ع_1 ع_2}{\frac{د}{م} - ع_1 + ع_2} = ع}$$

وَتَكُونُ القُوَّةُ المِكَافِئَةُ لِلْمَجْمُوعَةِ بِتَفْسِيرِ المُحَاكِمَةِ السَّابِقَةِ هِيَ :-

[١: ٨-٥]

.....

$$\boxed{ق = ق_1 + ق_2 - ق_3 \frac{د}{م}}$$

وإذا ما أَعْتَبِرْتَ العَدَسَتَانِ رَقِيقَتَيْنِ فَإِنَّ مُسْتَوِيَّيَهُمَا الْأَسَاسِيَيْنِ يَنْطَبِقَانِ ؛ كَذَلِكَ يُقَاسُ بُعْدَاهُمَا الْبُورْيَانِ وَالْمَسَافَةُ د مِنْ مَرَكِزَيْهِمَا الْبَصَرِيَّيْنِ ، وَعِلَاوَةً عَلَى ذَلِكَ فَإِذَا كَانَتِ العَدَسَتَانِ مُتَلَاصِقَتَيْنِ فَإِنَّ د = صَفْرٌ ؛ وَمِنْ ثَمَّ تَكُونُ $ع = \frac{ع_1 ع_2}{ع_1 + ع_2}$ كَمَا ذُكِرَ سَابِقاً.

مثال :

افترض أن عدسة نظريّة وعدسة العين (مع عناصر أخرى) تُشكِّلُ مجموعةً مُمَائِلَةً نوعاً ما لِمَا قَدْ تَمَّ بَحْثُهُ ؛ فَإِذَا أُنْزِلَتِ النِّظَارَةُ عَلَى الْأَنْفِ وَابْتَعَدَتِ عَنِ الْعَيْنِ ، فَإِنَّ مَوْقِعَ الصُّورَةِ يَتَغَيَّرُ كَمَا يَعْرِفُ أَيُّ شَخْصٍ يَسْتَخْدِمُ نِظَارَةً . وَيُمْكِنُ الْحَصُولُ عَلَى الْعِلَاقَةِ التَّالِيَةِ :-

$$ق = \frac{ق}{1 \pm د ق}$$

حيث $ق$ هي القوة الظاهرة الجديدة والمختلفة لِتَغْيِيرِ مَوْجِعِ العدسة، $ق$ هي قوتُّها الأصليَّة، $د$ هي المسافة التي تَحَرَّكَتْ فيها العدسة بالأمتار، + تُشيرُ إلى الحركة باتجاه العين الثابتة، - تُشيرُ إلى الحركة بعيداً عن العين أي العدسة الثابتة.

الرَّسْمُ الشعاعيَّ العدديُّ

خُذْ شعاعاً زوالياً مائلاً حتَّى يَسْقُطَ على سَطْحٍ كُرِّيٍّ منفردٍ وَيَعْمَلْ زاويةً γ مَعَ المحورِ البَصَرِيِّ، وَبَعْدَ الانكسارِ يَقْطَعُ هذا الشُّعَاعُ المحورَ مرةً ثانيةً وَيُحَدِّدُ النِّقْطَةَ س. إِنَّ الحِظَّ تَزْهُوٍ نِصْفِ قُطْرِ السَّطْحِ الكاسِرِ، وَهُوَ أَيْضاً العمودُ الذي تُقَاسُ منه زاويتا السقوط والانكسارِ عِنْدَ النِّقْطَةِ ت - الشَّكْل ٢. وَتَغْيِيرُ الزَّاوِيَةِ γ مُوجِبَةٌ عِنْدَمَا نَنْتَقِلُ بِأَقْصَرِ طَرِيقٍ مِنَ المَحْوَرِ إِلَى الشُّعَاعِ فِي اتِّجَاهِ عَقَارِبِ السَّاعَةِ؛ وَمِنْ ثَمَّ فَإِنَّ γ فِي الشَّكْلِ ٢ سَالِبَةٌ وَ γ مُوجِبَةٌ قِيَاساً إِلَى إِشَارَتِي الإِمَالَتَيْنِ المَعْنِيَتَيْنِ. وَمِنْ نَاحِيَةٍ أُخْرَى تُغْتَبَرُ زَوَايا السَّقُوطِ وَالانكسارِ مُوجِبَةً عِنْدَمَا نَسِيرُ فِي عَكْسِ اتِّجَاهِ عَقَارِبِ السَّاعَةِ عِنْدَ الْإِنْتِقَالِ مِنَ الْعَمُودِ إِلَى الشُّعَاعِ، وَهَكَذَا فَالزَّاوِيَتَانِ γ وَ β فِي الشَّكْلِ ٢ مُوجِبَتَانِ. وَبِتَطْبِيقِ قَانُونِ الْجُيُوبِ عَلَى الْمَثَلِثِ ج ت ز نَحْصُلُ عَلَى :-

$$[٧-٨:١] \quad \dots\dots \frac{نق + ف -}{جا - \gamma} = \frac{نق}{جا - (180^\circ - \alpha)}$$

وحيثُ أَنَّ $جا - (180^\circ - \alpha) = جا - \alpha$ ، تُعْطِي المَعَادِلَةُ [٧-٨:١] عِنْدَ حَلِّهَا لِلْحُصُولِ عَلَى $جا - \alpha$ مَايَلِي :-

$$[٨-٨:١] \quad \dots\dots \frac{ف - + نق}{نق} = جا - \alpha$$

وَبِاسْتِخْدَامِ قَانُونِ سَيْنِلْ : $جا - \alpha / جا - \beta = \frac{٢٢}{١٢}$ ؛

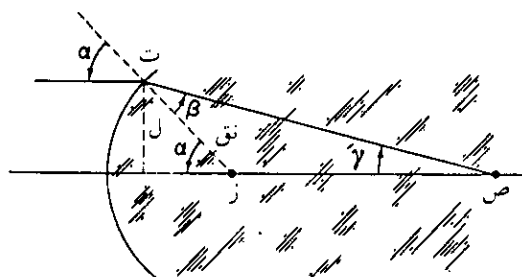
وباعتبار الحالة الخاصة التي يكون فيها الشعاع الساقط مُوازياً للمحور البصري، نجد من الشكل ٣ أن:-

$$[١١-٨:١] \quad \text{جا } \alpha = \frac{ل}{نق} \dots\dots$$

وفي المثلثات ص ز يكون مجموع الزاويتين الداخلتين β و γ يساوي الزاوية الخارجية عند ز، أي:-

$$[١٢-٨:١] \quad \gamma - \alpha = \beta \dots\dots$$

وتُشكّل المعادلات [٨-٨:١] إلى [١٢-٨:١] مجموعة هامة تتمكّن بها من رسم أي شعاع زوالي مائل عبر سطوح كُرّية مشتركة في المحور؛ وطبيعياً يلزمنا معادلات أكثر تعقيداً للأشعة المُلتوية المائلة.



الشكل ٣: الرسم الشعاعي للشعاع الساقط المتوازي

معادلة لاجرانج Lagrange's theorem

خذ سطحاً كاسراً منفرداً كما في الشكل ٤. ألقطتان ص، ج نقطتان مترافقتان على المحور البصري، ومسافتاهما من السطح ترتبطان معاً بمعادلة جاوس التي اشتقت سابقاً:-

$$[١٣-٨:١] \quad \dots\dots \frac{١٢-٢٢}{نق} = \frac{٢٢}{فص} + \frac{١٢}{فد}$$

خذ الآن الشعاع الواصل بين أعلى الجسم ج وقُطب السطح*. فبعد انكسار هذا

بناء على محاكاة قدمها ر. كينجزليك: «البصريات الهندسية الاساسية» في البصريات التطبيقية والهندسة البصرية - الجزء الاول: الضوء: توليده وتعديله (نيويورك: المطبعة الاكاديمية، ١٩٦٥)، ٢٠١-٢٤٤.

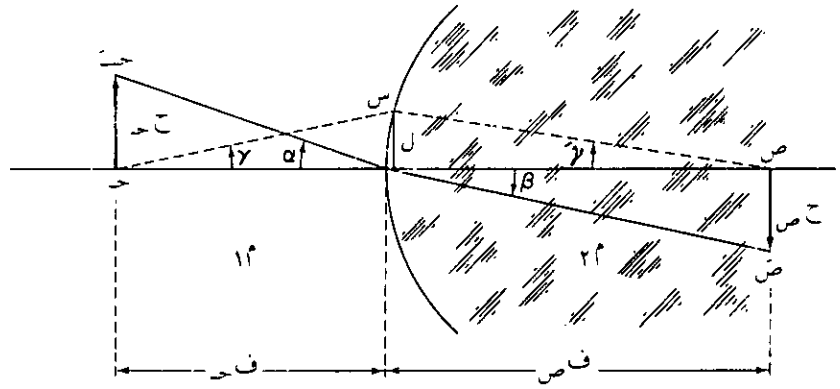
* R. Kingslake, "Basic Geometric Optics," *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. I, *Light: Its Generation and Modification* (New York: Academic Press, Inc., 1965), 201-44.

الشعاع، يَجِبُ أَنْ يَمُرَّ بالنقطة المترافقة أي في الصورة ص. ألزاويتان α و β ترتبطان معاً بقانون سنيل: $m_1 \sin \alpha = m_2 \sin \beta$.

ومن الرسم في الشكل ٤ وللزوايا الصغيرة، يُمكن كتابة قانون سنيل على النحو التالي:-

[١٤-٨:١]

$$m_1 \frac{h}{f_1} = m_2 \frac{h}{f_2} \dots$$



الشكل ٤: اشتقاق نظرية لاجرانج.

ثم افترض نقطة مثل س على السطح لا تبعد كثيراً عن القطب وعلى مسافة ل من المحور. ومرة أخرى، فللزوايا الصغيرة يكون: $\frac{L}{f} = \gamma$

أضرب المعادلة [١٤-٨:١] بـ ل نحصل على:-

$$m_1 \frac{h}{f_1} = m_2 \frac{h}{f_2}, \text{ أي:-}$$

[١٥-٨:١]

.....

$$m_1 \frac{h}{f_1} = m_2 \frac{h}{f_2}$$

والمعادلة [١٥-٨:١] هي معادلة لاجرانج التي تُعرف أيضاً بمعادلة

سميث - هلمهولتز * Smith-Helmholtz . وَكَمَا قِيلَ سَابِقاً م_١ وَم_٢ هُمَا مُعَامِلَا الانكسارِ
على جانبي السطح، ح_١ و ح_٢ هُمَا طَوَلَا الْجِسْمِ وَالصُّورَةِ، وَلا هُمَا زَاوِيَتَا الْمَيْلَانِ .
وَلِلزَوَايَا الْكَبِيرَةِ نَجِدُ أَنَّ :-

$$م_١ ح_١ - ح_٢ م_٢ = م_٢ ح_٢ - ح_١ م_١ [١٦-٨:١]$$

وَتُسَمَّى هَذِهِ الْمَعَادِلَةُ بِنَظَرِيَةِ الْجَيْبِ Sine theorem ، وَيُسَمَّى الْمَقْدَارُ م ح γ ثَابِتَ
لاجرانج ، وَهُوَ ثَابِتٌ لِجَمِيعِ الْمَوَاقِعِ بِالنِّسْبَةِ إِلَى سَطْحٍ مُعَيَّنٍ أَوْ عَدْسَةٍ مَا يَغُصُّ النَّظَرِ عَنْ
دَرَجَةِ تَعْقِيدِ الْمَنْظُومَةِ أَوْ سُمْكِيهَا .

• لاجرانج C.J.L. Lagrange (١٧٣٦-١٨١٣) : رِيَاضِيٌّ فَرَنْسِي . وَجَدَ رُوبَرْت سَمِيْث Smith

Robert هذه الْعِلَاقَةُ عَامَ ١٧٣٨ ، وَقَامَ بِتَطْوِيرِهَا هـ . فُونْ هَلْمِهَوْلْتِز H. Von Helmholtz

(١٨٢١-١٨٩٤) عَالِمُ الْفَسْيُولُوجِيَا الْاَلْمَانِي .

تَصْحيحُ الزَّوْغَانِ

تصحيح الزوغان الكروي

يُمْكِنُ التَّقْلِيلُ مِنَ الزَّوْغَانِ الْكُرِّيِّ بِالْإِخْنَاءِ أَوْ الثَّنْيِ الصَّحِيحِ، أَوْ بِاسْتِخْدَامِ زَجَاجٍ ذِي مَعَامِلِ انكِسَارٍ أَكْبَرَ، أَوْ بِجَمْعِ عَدَسَتَيْنِ مُوجِبَةٍ وَسَالِبَةٍ مُخْتَارَتَيْنِ اخْتِيَاراً صَحِيحاً، أَوْ بِجَعْلِ أَحَدِ سَطْحَيْ الْعَدْسَةِ أَوْ كِلَيْهِمَا شِبْهَ كُرِّيٍّ. وَلِلسُّطُوحِ شِبْهِ الْكُرِيِّ تَمَائِلٌ دَوْرَانِيٌّ حَوْلَ الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ؛ إِلَّا أَنَّ الْمُئَحْنَى الزَّوَالِيَّ الَّذِي يَنْتُجُ السَّطْحُ مِنْ دَوْرَانِهِ لَا يَكُونُ جُزْءاً مِنْ دَائِرَةٍ. وَصَقْلُ السَّطْحِ شِبْهِ الْكُرِّيِّ صَعْبٌ وَشَاقٌ نَوْعاً مَا، وَيُمْكِنُ لِلْقَارِيءِ الَّذِي يَهْتَمُّ بِهَذَا الْمَوْضُوعِ الرَّجُوعُ إِلَى مَا كُتِبَ عَنْهُ.*

وَفِي الزَّوْغَانِ الْكُرِّيِّ الْمَوْجِبِ، تَتَجَمَّعُ الْأَشْعَةُ الْمَتَرَفَةُ فِي بُورَةٍ أَقْرَبَ إِلَى الْعَدْسَةِ مِنَ الْبُورَةِ الَّتِي تَتَجَمَّعُ فِيهَا الْأَشْعَةُ الْمَحْوَرِيَّةُ الْمَحَازِيَّةُ، وَتُسَمَّى هَذِهِ الظَّاهِرَةُ بِالتَّصْحِيحِ التَّحْتِيِّ أَوِ النَّاقِصِ. وَيَنْطَبِقُ عَلَى الْأَشْعَةِ الَّتِي تَنْكَسِرُ عَنْ سَطْحِ كُرِّيٍّ مُنْفَرِدٍ: نِصْفُ قُطْرِهِ نَقْ وَعَلَى بُعْدِ «ل» مِنَ الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ الْمَعَادِلَةُ الْعَامَّةُ التَّالِيَةُ:-

$$\frac{\text{جا} \left(\frac{\gamma - \beta}{2} \right) \text{جتا} \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right)}{\text{جتا} \left(\frac{\gamma - \beta}{2} \right)} = \frac{1}{\text{فصر}} = \frac{1}{\text{فـ}} + \frac{1}{\text{نق}} + \frac{1}{\text{نق} - \text{فـ}}$$

..... [١٧-٨:١]

حَيْثُ α هِيَ زَاوِيَةُ السَّقُوطِ، β هِيَ زَاوِيَةُ الْانكِسَارِ، γ وَ δ هُمَا زَاوِيَتَا الْمَيْلِ، وَ m ، m_1 ، m_2 هُمَا مُعَامِلَا الْانكِسَارِ عَلَى جَانِبَيْ السَّطْحِ.

* ت. سَكُورِي وَك. شِشِيدُو: «دراسة في صنع السطوح شبه الكرية»، البصريات التطبيقية

٢ (١٩٦٣)، ١١٨١-١١٩٠.

* T. Sakurai and K. Shishido, "Study on the Fabrication of Aspherical Surfaces," *Applied Optics* 2 (1963) 1181-90.

ولا يُمكنُ التخلصُ من الزوجانِ الكُرِّيَّ تماماً لأيّ شكلٍ لِلْعَدْسَةِ المنفردة، ولكن على الأقلَّ يُمكنُ تقليله إذا اختيرَ عاملُ الشكلِ لِكودُنَجْتونِ اختياراً دقيقاً:-

$$[١٨-٨:١] \quad \sigma = \frac{\text{نق}_1 + \text{نق}_2}{\text{نق}_1 - \text{نق}_2} \dots\dots$$

وَمِنْ نَاحِيَةِ عَمَلِيَّةِ نُعَيِّنُ أَوَّلاً عاملَ الموقعِ:

$$[١٩-٨:١] \quad \pi = \frac{\text{ف}_ص - \text{ف}_ح}{\text{ف}_ص + \text{ف}_ح} \dots\dots$$

ثُمَّ نَعُوْضُ معادَلَةَ جَاوِس في المعادَلَةِ [١٩-٨:١] لِنَحْصَلَ على:-

$$[٢٠-٨:١] \quad \pi = 1 - \frac{\text{ع}_2}{\text{ف}_ص} = 1 - \frac{\text{ع}_2}{\text{ف}_ص} \dots\dots$$

وَيَحْدُثُ الزَّوْجَانِ الكُرِّيَّ الأَصْغَرُ عِنْدَمَا يَكُونُ:-

$$[٢١-٨:١] \quad \sigma = \pi \frac{2 - (1 - m)}{2 + m} \dots\dots$$

وَبِتَعْوِيْضِ المُعَادَلَتَيْنِ [١٨-٨:١] و [١٩-٨:١] في المعادَلَةِ [٢١-٨:١] نَحْصَلُ على مَجْمُوعَةٍ مُفِيدَةٍ مِنْ أَرْبَعِ مُعَادَلَاتٍ سُمِّيَتْ بِاسْمِ كَوْدُنَجْتونِ، وَهِيَ:-

$$[٢٣، ٢٢-٨:١] \quad \text{ف}_ح = \frac{2}{\pi + 1} ، \text{ف}_ص = \frac{2}{\pi - 1} \dots\dots$$

$$[٢٥، ٢٤-٨:١] \quad \text{نق}_1 = \frac{\text{ع}_2(1-m)}{1+\sigma} ، \text{نق}_2 = \frac{\text{ع}_2(1-m)}{1-\sigma} \dots\dots$$

وَتُعْطِي المُعَادَلَتَانِ الأَخِيرَتَانِ نِصْفَيِ قُطْرِ التَّكْوِيرِ بِدَلَالَةِ ع، م، وَ σ . وَ يَقْسَمَةُ إِحْدَى المُعَادَلَتَيْنِ عَلَى الأُخْرَى نَحْصَلُ على:-

$$[٢٦-٨:١] \quad \frac{\text{نق}_1}{\text{نق}_2} = \frac{1-\sigma}{1+\sigma} \dots\dots$$

مثال :

جِدْ نِصْفِي قُطْرِي التَّكْوِيرِ لِعَدَسَةٍ : ع = ١٠ سم ، م = ١,٥ ، لَهَا زَوْغَانُ كُرِّيٍّ أَصْغَرُ
لِلأَشْعَةِ المتوازية الساقطة .

الحل :

أولاً ، نُعَيِّنُ عَامِلَ المَوقِعِ :-

$$١- = \frac{\infty - ١٠}{\infty + ١٠} = \frac{ف ص - ف ح}{ف ص + ف ح} = \pi$$

وَبَوَضِعَ قِيَمَةِ π فِي المَعَادَلَةِ [٢١-٨:١] نَحْصُلُ عَلَى :-

$$٠,٧١٢ = \frac{٢,٥}{٣,٥} = (١-) \left(\frac{(١-٢,٢٥)٢-}{٢ + ١,٥} \right) = \pi \frac{(١-٢م)٢-}{٢ + م} = \sigma$$

وَمِنْ المَعَادَلَةِ [٢٦-٨:١] ، نَجِدُ أَنَّ :-

$$\frac{٠,٢٨٦-}{١,٧١٤} = \frac{١-٠,٧١٤}{١+٠,٧١٤} = \frac{نق١}{نق٢}$$

وَيَعْنِي ذَلِكَ أَنَّ نِصْفِي القُطْرَيْنِ لهُمَا بِنِسْبَةِ ١ : ٦ . وَتَعْنِي الإِشَارَتَانِ الْمُتَضَادَّتَانِ أَنَّ أَحَدَ السَّطْحَيْنِ مُقَعَّرٌ وَالْآخَرُ مُحَدَّبٌ .

وَأخيراً نَجِدُ نِصْفِي القُطْرَيْنِ مِنَ المَعَادَلَتَيْنِ [٢٥ ، ٢٤-٨:١] :-

$$نق١ = \frac{١٠}{١,٧١٤} = \frac{(١-١,٥)(١٠)٢}{١+٠,٧١٤} = \frac{ع٢(١-م)}{١ + \sigma} = ٥,٨٣ سم$$

$$نق٢ = \frac{١٠}{٠,٢٨١-} = \frac{(١-١,٥)(١٠)٢}{١-٠,٧١٤} = \frac{ع٢(١-م)}{١ - \sigma} = ٣٥ سم$$

وَهَكَذَا فَإِنَّ العَدَسَةَ هِلَالِيَّةٌ : السَّطْحُ المُحَدَّبُ لَهُ نِصْفُ قُطْرٍ = ٥,٨٣ سم فِي حِينِ أَنَّ السَّطْحَ المُقَعَّرَ لَهُ نِصْفُ قُطْرٍ = ٣٥ سم .

وَمَعَ أَنَّ الزَّوْغَانَ الْكُرِّيَّ لَا يُمَكِّنُ التَّخْلُصَ مِنْهُ تَمَاماً لِعَدْسَةٍ كُرِّيَّةٍ مُنْفَرَدَةٍ، إِلَّا أَنَّ مِنَ الْمُمَكِّنِ إلِغَاءَهُ تَمَاماً لِمَجْمُوعَةٍ مِنْ عَدْسَتَيْنِ أَوْ أَكْثَرَ مُتَضَادَّتِي الإِشَارَةِ. وَبَصُورَةٍ عَاقِمَةٍ، يُمَكِّنُ وَصْفُ الزَّوْغَانِ الْكُرِّيِّ الطَّوْلِيِّ بِالْعَبَارَةِ $أل^2 + ب ل$ ، حَيْثُ أ، ب هُمَا ثَابِتَانِ، وَ ل هُوَ بُعْدُ الشَّعَاعِ عَنِ الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ. وَيُمَثِّلُ الْحَدُّ الْأَوَّلُ التَّأثيرَ مِنَ الرِّتْبَةِ الثَّالِثَةِ وَالْحَدُّ الثَّانِي التَّأثيرَ مِنَ الرِّتْبَةِ الْخَامِسَةِ. وَلِذَلِكَ، لَا يَكْفِي تَصْحِيحُ الْعَدَسَاتِ ذَاتِ الْفَتْحَاتِ الْكَبِيرَةِ بِنَظَرِيَةِ الرِّتْبَةِ الثَّالِثَةِ، وَقَدْ يُلْزَمُ إِضَافَةُ حُدُودٍ مِنَ الرِّتْبَةِ الْخَامِسَةِ.

تصحیح الذؤابة Correction for Coma

يُمْكِنُ التَّخْلُصُ مِنَ الذُّوَابَةِ إِذَا كَانَتْ نِسْبَةُ زَاوِيَتِي الْمَيْلِ γ عِنْدَ الْجِسْمِ وَالصُّورَةِ ثَابِتَةً لِكُلِّ قِيمِ γ وَعَبَّرَ كُلُّ فَتْحَةٍ الْمَنْظُومَةِ :-

$$\frac{\text{جا } \gamma}{\text{حا } \gamma} = \text{ثابت} \dots\dots [27-8:1]$$

وَتُسَمَّى هَذِهِ الْمَعَادَلَةُ بِشَرْطِ الْجَيْبِ sine condition الذي صاغَهُ أَوَّلَ مَرَّةٍ أَبِي Abbe عام ١٨٧٣. وَعِنْدَمَا تَكُونُ γ صَغِيرَةً كَمَا فِي حَالَةِ الْإِشْعَةِ الْمَحْوَرِيَّةِ الْمُحَازِيَةِ فَإِنَّ شَرْطَ الْجَيْبِ يُصْبِحُ مُمَازِلًا لِمَعَادَلَةِ لَاجْرَانْجِ: $\text{ح} \text{ح}^2 = \gamma$ ، $\text{ح}^2 \text{ح} = \gamma$.

وَلَكِنْ لَا يُشْتَرَطُ قِيَاسُ ارْتِفَاعِي الْجِسْمِ وَالصُّورَةِ ح^2 ، $\text{ح} \text{ح}^2$ فِي اتِّجَاهٍ عَمُودِيٍّ عَلَى الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ. وَفِي الْحَقِيقَةِ فَإِنَّ تَبَيُّنَ التَّفْصِيلَاتِ يَتَوَقَّفُ عَلَى وَجْهَةِ اتِّجَافِهَا. وَلِذَلِكَ يَنْبَغِي أَنْ نُمَيِّزَ بَيْنَ الشَّرْطَيْنِ الْجَيْبِيَّيْنِ تَبْعاً لِكَوْنِ تَفَاصِيلِ الْجِسْمِ وَالصُّورَةِ عَمُودِيَّةً عَلَى الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ أَوْ مُوَازِيَةً لَهُ.

وَفِي حَالَةِ الْوَجْهَةِ الْعَمُودِيَّةِ نَحْصُلُ عَلَى :-

$$\frac{\text{جا } \gamma}{\text{جا } \gamma} = \text{ت} = \frac{\text{جا } \gamma^2}{\text{حا } \gamma^2} = \dots\dots [28-8:1]$$

حَيْثُ $\text{ح} \text{ح}^2$ ، $\text{ح} \text{ح}^2$ هُمَا طَوْلَا التَّفَاصِيلِ الْمُقَاسَةِ عَمُودِيّاً عَلَى الْمَحْوَرِ. أَمَّا لِلتَّفَاصِيلِ الَّتِي تُقَاسُ مُوَازِيَةً لِلْمَحْوَرِ فَتُسْتَخْدَمُ شَرْطُ الْجَيْبِ الثَّانِي :-

$$[٢٩-٨:١] \quad \dots\dots \frac{\text{جا } ٢ \text{ ح ص } ١١}{\text{جا } ١ \text{ ح } ١١} = \text{ك} = \frac{\frac{\gamma}{2} \text{ جا } ٢}{\frac{\gamma}{2} \text{ جا } ١}$$

وَتَحْتَفِي الذُّوَابَةُ إِذَا كَانَتْ ت = ك = ١ ، و $\gamma = \gamma$ هُوَ شَرْطُ يُقَيِّدُنَا بِجَعْلِ نِسْبَةِ الصُّورَةِ إِلَى الْجِسْمِ النِّسْبَةَ ١:١ .

تَصْحِيحَاتُ أُخْرَى

لَقَدْ رَأَيْنَا فِي الْاسْتِجْمَاتِيَةِ أَنَّ هُنَاكَ خَطَّيْنِ بُؤْرِيَيْنِ مُتَطَرِّقَيْنِ تَبَعًا لِكَيْفِيَةِ تَوَجُّهِ تَفَاصِيلِ الْجِسْمِ خَارِجَ الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ . وَهَكَذَا ، وَلِأَنَّ الْبُعْدَيْنِ الْبُؤْرِيَيْنِ لِلْحَالَتَيْنِ الْمُتَطَرِّقَتَيْنِ مُخْتَلِفَانِ ، تَخْتَلِفُ مَسَافَاتُ الصُّورِ أَيْضًا ، وَتَتَجَمُّعُ التَّفْصِيلَاتُ فِي إِخْدَى سَطْحِي الصُّورَةِ أَوْ بَيْتَهُمَا . وَمَنْ ثَمَّ يَكْمُنُ مَبْدَأُ تَصْحِيحِ الْاسْتِجْمَاتِيَةِ فِي جَعْلِ سَطْحِي الصُّورَةِ يَنْظَبِقَانِ . إِلَّا أَنَّ هَذَا الْأَمْرَ غَيْرُ مُمَكِّنٍ فِي الْعَدْسَةِ الْمُنْفَرِدَةِ . وَلَكِنْ إِذَا اسْتُخْدِمَ عُضْرَانُ (أَيُّ عَدْسَتَانِ) مُتَبَاعِدَانِ قَلِيلًا وَبَيْتُهُمَا فِي الْمَوْقِعِ الْمُنَاسِبِ حَاجِزٌ بِثُقْبٍ - الشَّكْل ٥ ، أَمَكَّنَ عَلَى الْأَقْلَ الْاقْتِرَابُ مِنَ الْانْطِبَاقِ . وَيَكُونُ السَّطْحُ الْمُشْتَرَكُ عُمُومًا مِثْلَ مُجَسِّمِ الْقِطْعِ الْمُكَافِئِ - شَكْلًا Paraboloid وَ يُعْرَفُ بِسَطْحِ بَنْزَفَال Petzval* . وَ يُمَكِّنُ إِنْقَاصُ تَقْوِسِ الْمَجَالِ الْمُتَبَقِّي بِجَعْلِ الْعُنْصَرَيْنِ أَيْ الْعَدْسَتَيْنِ يَسْتَوْفِيَانِ شَرْطَ بَنْزَفَال :

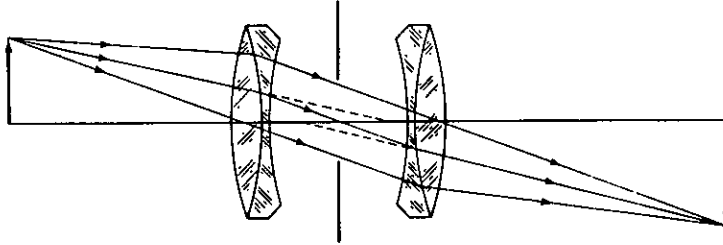
$$[٣٠-٨:١] \quad \dots\dots \frac{1}{\text{ك} \text{ ع } \text{ك}} = \text{صفر} \dots\dots$$

حَيْثُ م ، ع ، ك يُشِيرَانِ عَلَى التَّرْتِيبِ إِلَى مُعَامِلِ انْكَسَارِ الْعُنْصَرِ وَالْبُعْدِ الْبُؤْرِيِّ لَهُ .

وَلَكِنِّي يُسْتَوْفَى هَذَا الشَّرْطُ تُصْنَعُ بَعْضُ الْعَدْسَاتِ الْمَوْجِبَةِ فِي الْمَنْظُومَةِ الْمَرْكَبَةِ مِنْ زُجَاجٍ مُعَامِلُ انْكَسَارِهِ أَعْلَى مُقَارَنَةً بِالْعَدْسَاتِ السَّالِبَةِ . وَلِسَوْءِ الْحَظِّ فَإِنَّ هَذَا هُوَ تَمَامًا عَكْسُ مَا يَلْزَمُ لِتَصْحِيحِ الزَّوْغَانِ اللَّوْنِيِّ ؛ إِذْ لَا يُمْكِنُ أَنْ يَتِمَّ اسْتِيفَاءُ شَرْطِي اللَّازِ وَغَانِيَةٍ وَاسْتِوَاءِ

* جوزف بَنْزَفَال (١٨٠٧-١٨٩١) : أَلْرِيَاضِي الْهَنْغَارِي وَأَسْتَاذُ الرِّيَاضِيَّاتِ فِي فِينَا .

المجال في آن واحد إلا باستخدام أنواع جديدة من الزجاج الذي له معامل انكسار مرتفع وقوة تحليل منخفضة كالزجاج التاجي الكثيف الذي يحوي أكسيد الباريوم.



الشكل ٥: ثنائي من العدسات مُسوي المجال

تُصححُ الزَّوغان اللّوني

تُسمى المنظومة التي يُصححُ زَوَغانها اللّوني بالأُكرومات achromat أو المنظومة اللالونية. وبشكل أكثر تحديداً تُصححُ هذه المنظومة لِطولَين موجيّين، وكذلك للزَّوغان الكُري. أما المنظومة التي تسمى الأبوكرومات أي المنظومة مُفرطة اللالونية apochromat فتُصححُ لِثلاثة ألوان وللزَّوغان الكُري لِلّوئين.

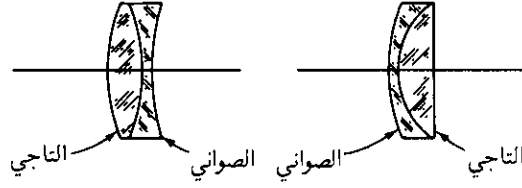
ومن الطّبيعي أن يُعتمد اختيار الأطوال الموجية على الغرض الذي تُصمم من أجله المنظومة. فمثلاً يُعتمد الفلم الفوتوغرافي الاعتيادي أكثر حساسية للون الأزرق من عين الإنسان، ومن ثم تُصححُ عدسات الكاميرا الشائعة عادةً لِلألوان التي هي أقرب لِظرف الطّيف الأزرق خلافاً لِلآلات البصرية التي تُصححُ للون الأخضر. وتوجد طرق عدّة لِتصححِ الزَّوغان اللّوني، وفي إحدى الطرق يُلصق عدستان: أحدهما من الزجاج التاجي والأخرى من الزجاج الصّواني، وتوضعان مُتلاصقتين. وتُختار العدستان بحيث يُلغى التحليل الناتج من العدسة الأولى التحليل الناتج من العدسة الثانية. ونُقدّم في الشكل ٦ مثالين لذلك. فإذا كانت قوتا تحليل العدستين هما Δ_1 ، Δ_2 ، وقوتا كسريهما هما q_1 ، q_2 ، نجد أن: -

*M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (New York: Pergamon Press Inc.,

1959), 175.

[٣١-٨:١]

$$ق١ = \frac{٢\Delta}{١\Delta - ٢\Delta} ، وق٢ = -\frac{١\Delta}{١\Delta - ٢\Delta} \dots\dots$$



الشكل ٦: نوعان من الثنائي اللالوني

مثال :

صمّم ثنائيّاً لالونيّاً : بُعدُهُ البُوريّ + ١٠ سم ، ويتألّف من الزجاج التاجيّ والصّوانيّ ، ومُعاملات انكساره لِخُطوط فرونهوفر: الأزرق ، الأصفر ، والأحمر كما في الجدول التالي :

C ^م	D ^م	F ^م	
١,٥٢	١,٥٢٣	١,٥٣	تاجي
١,٦١	١,٦٢	١,٦٣	صواني

الحل :

من معادلة التحليل نجد للزجاج التاجيّ أن :-

$$٠,٠١٩ = \frac{٠,٠١}{٠,٥٢٣} = \frac{١,٥٢ - ١,٥٣}{١ - ١,٥٢٣} = \frac{C^m - F^m}{1 - D^m}$$

وللزجاج الصّواني :-

$$٠,٠٣٢ = \frac{٠,٠٢}{٠,٦٢} = \frac{١,٦١ - ١,٦٣}{١ - ١,٦٢}$$

ويُوضَع هاتين القيمتين في المعادلة [٣١-٨:١] ، نحصلُ على :-

$$ق_1 = (10) \left(\frac{0,32}{0,019 - 0,032} \right) = \frac{0,32}{0,013} = 24,6 \text{ م}^{-1}$$

$$ق_2 = (10) \left(\frac{0,19}{0,019 - 0,032} \right) = \frac{0,19}{0,013} = 14,6 \text{ م}^{-1}$$

إنَّ القوَّةَ المكافئةَ للعدستين والتي تعملُ ضابطةً لحساباتنا إلى الآن هي +١٠ م^{-١}. وبِمَعْرِفَتِنَا البُعْدَيْنِ البُؤْرِيَيْنِ اللازِمَيْنِ للعدستين، فَتَحُرُّ أحرارًا في اختيارِ نِصْفَيِ قُطْرَيْهِمَا. وبِبداعي الاقتصاد، تُصنَّعُ العدسةُ المُجمَّعةُ مُتماثلةً أيُّ مُتساويةِ الوجهين المُحدَّبتين، كذلك يُتَبَغَى أن تكونَ العدستانِ أيضًا مُتلاصقتين. ولذلك يَكُونُ نق_١ = نق_٢ = - نق_٣. ومن مُعادلةِ صانِعِ العدسةِ نَجِدُ لِلْعَدْسَةِ الأولى أنْ:-

$$ق = \Delta م \left(\frac{1}{نق_1} + \frac{1}{نق_2} \right)$$

$$24,6 = 0,523 \left(\frac{2}{نق_1} \right) = \frac{1,046}{نق_1}$$

$$نق_1 = نق_2 = \frac{1,046}{24,6} = 4,25 \text{ سم}$$

إنَّ السَّطْحَ الثالثَ مُقَعَّرٌ، ولذلك يَكُونُ نق_٣ = -٤,٢٥ سم. وَلِلسَّطْحِ الرابعِ نَجِدُ أنْ:-

$$ق = \Delta م \left(\frac{1}{نق_1} + \frac{1}{نق_2} \right)$$

$$-14,6 = \left(\frac{1}{نق_4} + \frac{1}{-0,425 م} \right) (0,62)$$

$$نق_4 = \frac{1}{-0,020} = -20 م$$

ومن الطرق الأخرى لِتَصْحِيحِ الزَّوْغَانِ اللَّوْنِيِّ طَرِيقَةُ نُسْخَذُمُ فِيهَا عَدَسَتَانِ مَصْنُوعَتَانِ مِنْ نَوْعٍ وَاحِدٍ مِنَ الزُّجَاجِ، بَحِثُ تَبْعْدَانِ عَنْ بَعْضِهِمَا بَعْضاً مَسَافَةً تُسَاوِي نِصْفَ مَجْمُوعِ بُعْدَيْهِمَا الْبُؤْرِيَّيْنِ :

$$d = \frac{1}{\frac{1}{e} + \frac{1}{e'}} \dots\dots [١: ٨-٣٢]$$

وَتُسْتَخْدَمُ هَاتَانِ الْعَدَسَتَانِ فِي عَيْنِيَّةِ هَيْجِنزِ Huygens وعَيْنِيَّةِ رَامْسْدِنِ Ramsden اللَّتَيْنِ سَتُنَاقِشَانِ بَعْدَ قَلِيلٍ .

ملاحظة : يَتَطَلَّبُ كُلُّ مِنَ الزَّوْغَانِ اللَّوْنِيِّ الطَّوْلِيِّ وَالْعَرْضِيِّ تَصْحِيحاً خَاصاً بِهِ ، فَعِنْدَ وَضْعِ حَاجِزٍ يَثْقُبُ يَقِلُّ الزَّوْغَانُ اللَّوْنِيُّ الطَّوْلِيُّ ، أَمَّا الْعَرْضِيُّ فَلَا يَنْقُصُ .

استخدام جبر المصفوفة في تصميم العدسة

إِنَّ غَرَضَ اسْتِخْدَامِ جَبْرِ الْمَصْفُوفَةِ هُوَ تَتَبُّعُ تَقَدُّمِ شُعَاعٍ مَا عِنْدَ مُرُورِهِ مِنْ سَطْحٍ كَاسِرٍ إِلَى آخَرَ، وَتَعْيِينُ ارْتِفَاعِهِ وَاتِّجَاهِهِ عِنْدَمَا يَخْرُجُ مِنَ السَّطْحِ الْآخِرِ . وَ يُكَسِّرُ الشَّعَاعُ الضَّوئِيُّ عِنْدَ السَّطْحِ الْأَوَّلِ ، ثُمَّ يَنْتَقِلُ مَا بَيْنَ السَّطْحَيْنِ الْأَوَّلِ وَالثَّانِي . وَ بَعَارَةٌ أُخْرَى فَإِنَّ بُعْدَهُ عَنِ الْمَحْوَرِّ الْبَصَرِيِّ قَدْ يَتَغَيَّرُ . كَذَلِكَ قَدْ يَتَكَبَّرُ الشَّعَاعُ مَرَّةً أُخْرَى عَلَى السَّطْحِ الثَّانِي ثُمَّ يُنْقَلُ وَيُكَسَّرُ وَهَكَذَا ذَوَالِيكَ . وَلِلتَّعْبِيرِ عَنْ هَاتَيْنِ الْعَمَلِيَّتَيْنِ : الانكسار والنقل translation نَحْتَاجُ إِلَى نَوْعَيْنِ مِنَ الْعَامِلَاتِ Operators : مَصْفُوفَاتِ الْانكِسَارِ وَمَصْفُوفَاتِ النُّقْلِ .

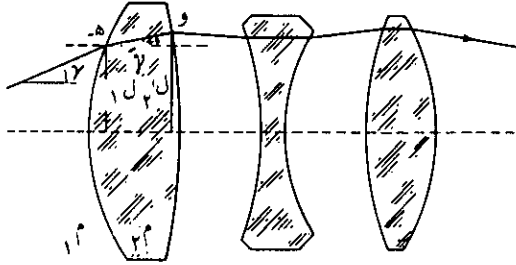
لِنَتَصَوَّرَ أَنَّنَا ، فِي مَنْظُومَةٍ مُؤَلَّفَةٍ مِنْ عَدَسَاتٍ - الشَّكْل ٧ ، نَرْغَبُ فِي تَتَبُّعِ شُعَاعٍ مَارٍ بِالنُّقْطَتَيْنِ هـ ، وَ فِي الْعَدْسَةِ الْأُولَى . فَقَبْلَ دُخُولِ الْعَدْسَةِ يَكُونُ لِلشَّعَاعِ زَاوِيَةٌ مِثْلِيَّةٌ ٧ وَهِيَ الزَّاوِيَةُ الَّتِي يَعْمَلُهَا الشَّعَاعُ مَعَ الْمَحْوَرِّ الْبَصَرِيِّ ، وَبَعْدَ انكِسَارِهِ فِي الزُّجَاجِ يَكُونُ لَهُ زَاوِيَةٌ مِثْلِيَّةٌ أُخْرَى ٧ . وَ يَقْطَعُ الشَّعَاعُ السَّطْحَيْنِ عَلَى أَرْتِفَاعَيْنِ هُمَا ل ١ ، ل ٢ عَلَى التَّرْتِيبِ .

لِنَفْتَرِضْ أَنَّ السَّطْحَ الْأَوَّلَ لَهُ مَرَكِزُ تَكْوِيرٍ ز كَمَا فِي الشَّكْلَيْنِ ١-٣ ، ١-٨-٢ . فَعِنْدَ ز ، نَجِدُ أَنَّ نِصْفَ قُطْرِ التَّكْوِيرِ الْمَارَّ بِالنُّقْطَةِ هـ يَصْنَعُ زَاوِيَةً ٥ مَعَ الْمَحْوَرِّ الْبَصَرِيِّ قِيمَتُهَا عَلَى النُّحُوِّ التَّالِي :

جا $\emptyset = \frac{ل١}{نق}$ ، أو للتقريب الأول :

[٣٢-٨:١]

$$\dots \frac{ل١}{نق} = \emptyset$$



الشكل ٧: مصفوفتا الانكسار والنقل

ومن قانون سنيل :

[٣٣-٨:١]

$$\dots \text{جا } \alpha = \text{جا } \beta$$

ومن الرسم في الشكل ١-٣-٣ أو الشكل ١-٨-٢، نجد أن :-

$$\emptyset + \gamma = \beta ; \emptyset + \gamma = \alpha$$

وبذلك تصبح المعادلة [٣٣-٨:١] كما يلي :

$$\left(\frac{ل١}{نق} + \gamma \right)_{٢م} = \left(\frac{ل١}{نق} + \gamma \right)_{١م}$$

وبحل المعادلة لإيجاد $\gamma_{٢م}$ نجد أن :-

$$[٣٤-٨:١] \dots \frac{ل١}{نق} + \gamma_{١م} = \frac{ل١}{نق} + \gamma_{٢م} \dots$$

ولكن $\frac{ل١}{نق}$ هي قوة الكسرق للسطح ، ولذلك يكون :-

[٣٥-٨:١]

$$\dots \gamma_{٢م} = \gamma_{١م} \dots$$

حَيْثُ م γ هو اتجاهُ خروجِ الشعاع من هـ. وَكَمَا هو واضحُ فَإِنَّ النقطة هـ مشتركةٌ بين الشعاع الساقِطِ على السطحِ الأولِ والشعاعِ المُكْسِرِ عنه. وبعبارةٍ أخرى لا يُحْدِثُ الانكسارُ تَغْيِيراً في ل_١. وَمِنْ ثَمَّ يُمَكِّنُ كتابَةُ المعادَلَتَيْنِ: المعادَلَةُ [٣٥-٨:١] والمعادَلَةُ ل_١ = ل_١ [٣٦-٨:١] في صيغةِ المصفوفاتِ على النحوِ التالي:-

$$[37-8:1] \quad \dots \begin{bmatrix} \gamma_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

وَتُسَمَّى المصفوفةُ (٢×٢): $\begin{bmatrix} 1 & -q \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ بِمَصْفُوفَةِ الانكسارِ.

وَبَعْدَ ذَلِكَ نُفَكِّرُ في النقلِ (أَيِ التَغْيِيرِ في المسافةِ من المحورِ البَصَرِيِّ) الحاصِلِ لِلضَّوءِ بَيْنَ النُّقْطَتَيْنِ هـ، و. فإذا كانت د هي المسافةُ الأفقيةُ بَيْنَ النقطتين هـ، وفانْ:-

$$\Delta L = L_1 - L_2 = d \gamma;$$

وللأشعةِ المحوريةِ المَحَادِيَّةِ نَحْصُلُ عَلَى:-

$$[38-8:1] \quad L_1 = L_2 + d \gamma \dots$$

وَكَالْمُعَادَلَةِ [٣٦-٨:١] تماماً فَإِنَّ زاويةَ التَمِيلِ الداخليِّ γ هي واحدةٌ عِنْدَ هـ أَوْ و. ولذلك يَكُونُ:-

$$[39-8:1] \quad \gamma = \gamma \dots$$

وَعِنْدَ هـ يَخْرُجُ الشعاعُ في الاتجاهِ م γ على ارتفاعِ ل_١ عَنِ المَحْوَرِ؛ وَعِنْدَ وَ يَكُونُ اتجاهُ السقوطِ في نَفْسِ الاتجاهِ، إِلَّا أَنَّ الارتفاعَ يَكُونُ ل_٢. إِنَّ هَذَيْنِ البارامِترين Parameters (أَيِ المَتَغَيِّرَيْنِ المُمَيِّزَيْنِ) عندَ النقطةِ (و) يُمَكِّنُ إيجادهما بِأَخِذِ المعادَلَتَيْنِ [٣٨-٨:١] و [٣٩-٨:١] وكتابتهما مرةً أُخرى في صيغةِ مَضْرُوبَاتِ المصفوفاتِ:

$$[40-8:1] \quad \dots \begin{bmatrix} \gamma & \gamma \\ \gamma & \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & \gamma \\ \gamma & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & \frac{d}{\gamma} \end{bmatrix}$$

ان المصفوفة ن (2x2) في المعادلة السابقة هي مصفوفة النقل، أي :-

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & \frac{d}{\gamma} \end{bmatrix}$$

وَإِذَا مَا تَتَبَعْنَا شُعَاعاً عَبْرَ عَدْسَةٍ لَاحِظْنَا أَنَّ الْانْكَسَارَ يَحْدُثُ مَرَّتَيْنِ : مَرَّةً عِنْدَ كُلِّ سَطْحٍ ، وَأَنَّ النِّقْلَ يَحْدُثُ مَرَّةً وَاحِدَةً بَيْنَ السَّطْحَيْنِ . وَلِذَلِكَ فَلِكُلِّ نِصْفِ التَّغْيِيرَاتِ الَّتِي تُحْدِثُهَا الْعَدْسَةُ يُلْزَمُنَا أَنْ نُؤَلِّفَ بَيْنَ مَصْفُوفَتَيْ انْكَسَارٍ وَمَصْفُوفَةِ نَقْلِ . وَنَجِدُ الْإِتِّجَاهَ وَالارتفاعَ الْجَدِيدَيْنِ لِلشُّعَاعِ كَمَا يَلِي :-

$$[41-8:1] \quad \dots \begin{bmatrix} \gamma & \gamma \\ \gamma & \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & \gamma \\ \gamma & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\gamma \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & \frac{d}{\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\gamma \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

حَيْثُ γ هِيَ زَاوِيَةُ الْمِيلِ عِنْدَ مُغَادَرَةِ السَّطْحِ الثَّانِي .

وَيُسَمَّى حَاصِلُ ضَرْبِ الْمَصْفُوفَاتِ الثَّلَاثِ بِمَصْفُوفَةِ الْمُنْظُومَةِ ط :

$$[42-8:1] \quad \dots \quad \text{ط} = \text{ك} \text{ ن ك} \dots$$

وَتَتَأَلَّفُ مَصْفُوفَةُ الْمُنْظُومَةِ لِلْعَدْسَةِ الْوَاحِدَةِ كَمَا ذُكِرَ سَابِقاً مِنْ مَصْفُوفَتَيْ الْانْكَسَارِ ك ، وَتَسَطَّحِي الْعَدْسَةِ وَمَصْفُوفَةِ نَقْلِ وَاحِدَةٍ ن . وَإِذَا كَانَ هُنَاكَ أَكْثَرُ مِنْ عَدْسَةٍ وَاحِدَةٍ ، وَجِبَ اسْتِخْدَامُ الْعَدِيدِ الَّذِي يُلْزَمُ مِنْ مَصْفُوفَاتِ الْانْكَسَارِ وَالنَّقْلِ الَّتِي يَجِبُ أَنْ تُضْرَبَ فِي بَعْضِهَا بَعْضاً بِتَرْتِيبٍ صَحِيحٍ .

فإذا كانت لدينا المصفوفات أ، ب، ج، فإنها تكتب من اليسار إلى اليمين بحسب ترتيب ضربها، كما يكتب حاصل ضربها أ، إلى اليمين:-

$$أ، ب، ج = أ، ب، ج، [١:٨-٤٣]$$

وقد نضطر أيضاً أن نضمن - حيثما يصح ذلك - المصفوفة التي تصف فعل الثقب أو أي حاجز آخر يحدد تدفق الضوء. وعندها يمكن رسم أي شعاع عبر أية مجموعة مؤلفة من العدسات مهما كانت معقدة التأليف.

ونضرب المصفوفات ٢×٢ بعضها في بعض بترتيب خاص نوضحه بالرجوع إلى الشكل ٨. لاحظ أن حاصل ضرب أي عدد من المصفوفات ٢×٢ هو المصفوفة ٢×٢.

مثال ١:

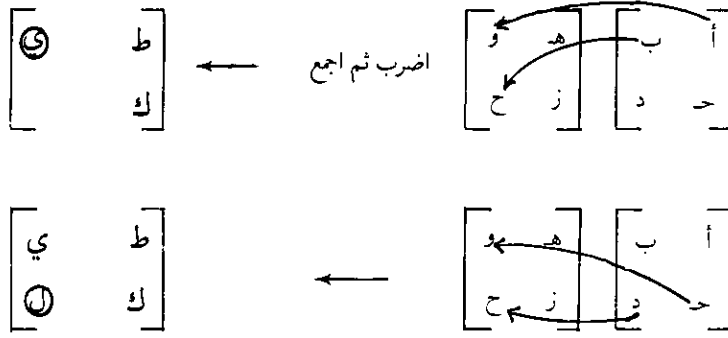
$$\begin{bmatrix} ٨ & ١٧ \\ ١٨ & ٣٩ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ٣ \times ٢ + ٢ \times ١ & ٦ \times ٢ + ٥ \times ١ \\ ٣ \times ٤ + ٢ \times ٣ & ٦ \times ٤ + ٥ \times ٣ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ٢ & ٥ \\ ٣ & ٦ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ٢ & ١ \\ ٤ & ٣ \end{bmatrix}$$

مثال ٢:

$$[١:٨-٤٤] \begin{bmatrix} أ+هـ ب ز أو+ب ح \\ ح هـ د ز حو+د ح \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} و & هـ \\ ح & ز \end{bmatrix} \begin{bmatrix} أ & ب \\ ح & د \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \text{ط} \end{bmatrix} \leftarrow \text{اضرب ثم اجمع} \begin{bmatrix} و & هـ \\ ح & ز \end{bmatrix} \begin{bmatrix} أ & ب \\ ح & د \end{bmatrix}$$

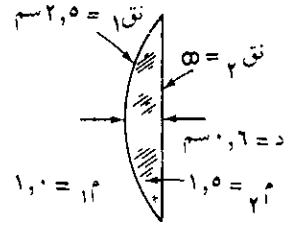
$$\begin{bmatrix} \text{ك} \end{bmatrix} \leftarrow \text{اضرب ثم اجمع} \begin{bmatrix} و & هـ \\ ح & ز \end{bmatrix} \begin{bmatrix} أ & ب \\ ح & د \end{bmatrix}$$



الشكل ٨: ضرب مصفوفتين ٢×٢

مثال ٣:

وبالانتقال إلى مسألة بصرية، افترض أن عدسة مستوية - محدبة لها معامل انكسار $n = 1.5$ وسُمك عند المركز مقدار ٦ مم. وُضِعَ سطحها المحدب الذي نصف قطره ٢ سم بحيث يواجه الضوء الساقط - الشكل ٩. اشتق مصفوفة المنظومة.



الحل:

الشكل ٩: عدسة مستوية - محدبة

قوة كسر السطح الأمامي:-

$$C_1 = \frac{n-1}{R} = \frac{1.5-1}{0.02} = 25 \text{ د.}$$

قوة السطح الخلفي:-

$$C_2 = \frac{n-1}{\infty} = 0 \text{ د.}$$

١. مصفوفة المنظومة تكون:-

$$[\begin{matrix} 1 & -C_1 \\ 0 & 1 \end{matrix}] [\begin{matrix} 1 & -d \\ 0 & 1 \end{matrix}] [\begin{matrix} 1 & -C_2 \\ 0 & 1 \end{matrix}] = [\begin{matrix} 1 & -C_1 \\ 0 & 1 \end{matrix}]$$

..... [١ : ٨ - ٤٥]

أنَّ بَعْضَ العنَاصِرِ في المصفوفةِ مِثْلَ ١ و ١ في كُلِّ من المصفوفاتِ الثلاثِ لا وَحَدَاتٍ لَهَا، وتَتَوَقَّفُ وَحَدَاتُ العنَاصِرِ الأُخْرَى على البارامِثَرَاتِ الفيزيائيةِ المُقاسَةِ، وَيجِبُ أنْ تَكُونَ مُتَّسِقَةً كَمَا هُوَ وَاضِحٌ. وفي المِثَالِ الحَالِيّ يَكُونُ للقوةِ قِ الواحدِ سم-١ و يَكُونُ لِلصَّغْرِ الواحدِ سم. وَبِوَضْعِ القِيَمِ العَدَدِيَّةِ المُنَاسِبَةِ نَجِدُ أنَّ:-

$$\begin{bmatrix} ٠,٢- & ١ \\ ١ & ٠ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ٠ & ١ \\ ١ & \frac{١,٦}{١,٥} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ٠ & ١ \\ ١ & ٠ \end{bmatrix} = \text{ظ}$$

وَيَضْرِبُ المصفوفَتَيْنِ الثانيةِ والثالثةِ أولاً نَحْصُلُ عَلَى :-

$$\begin{bmatrix} ٠,٢- & ١ \\ ٠,٩٢ & ٠,٤ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ٠٠,٢- & ٠٠١ \\ ١+\frac{٠,١٢-}{١,٥} & ٠+\frac{١,٦}{١,٥} \end{bmatrix}$$

[وَلَكِنِّي نَتَأَكَّدُ مِنْ صِحَّةِ النَتِيجَةِ نَحْسِبُ مُحَدَّدَةَ المصفوفةِ وَذلكَ بِضَرْبِ القِيَمِ المُطْلَقَةِ لعنَاصِرِ المصفوفةِ ضَرْباً تَبَادُلِيّاً ثُمَّ بِجَمْعِ النَاتِيجَيْنِ : ٠,٠٨+٠,٩٢ = ١,٠٠. فإذا كَانَتِ النَتِيجَةُ = ١ يَكُونُ حَسَابُنَا صَحِيحاً حَتَّى الآنَ].

ثُمَّ يَضْرِبُ المصفوفةِ النَاتِيجَةَ بِالمصفوفةِ الباقيةِ نَحْصُلُ عَلَى :-

$$\begin{bmatrix} ٠,٢- & ١ \\ ٠,٩٢ & ٠,٤ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ٠,٢- & ١ \\ ٠,٩٢ & ٠,٤ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ٠ & ١ \\ ١ & ٠ \end{bmatrix}$$

وَمَرَّةً أُخْرَى تُساوِي قِيَمَةُ المُحَدَّدَةِ determinant واحداً. وَنُلاحِظُ أنَّ مصفوفةَ الانكسارِ الثانيةِ لَمْ تُغَيَّرِ النَتِيجَةُ. وبِالْفِعْلِ فَالسَّطْحُ الثاني سَطْحٌ مُسَوٍّ، وَمِنْ ثَمَّ فَمَصْفُوفَةُ انكسارِهِ هِيَ المَصْفُوفَةُ المَحَايِدَةُ أَيْ مَصْفُوفَةُ الواحدِ Unit matrix.

مِثَال ٤ :

عَدَسَةٌ مُحَدَّبَةٌ الوَجْهَيْنِ: يَضْفَا قُطْرِي تَكْوِيرِ سَطْحَيْهَا هُمَا نَقْ ١ = ٨ سم، وَنَقْ ٢ = ٥ سم،

وَسُنْكَهَا عِنْدَ وَسْطِهَا د = ١ سم، وَمُعَامِلُ انْكَسَارِهَا م = ١,٦.

عَيِّنْ مَصْفُوفَةَ الْمُنْظُومَةِ.

الحل:

كما مَرَّ سَابِقاً نَجِدُ أَنَّ:-

$$١ - ق = \frac{٠,٦}{٠,٠٨ م} = \frac{٢ \Delta}{نق}$$

$$١ - م = \frac{٠,٦}{٠,٠٥} = ١٢$$

$$\begin{bmatrix} ٧,٥- & ١ \\ ١ & ٠ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ٠ & ١ \\ ١ & \frac{٠,٠١}{١,٦} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ١٢- & ١ \\ ١ & ٠ \end{bmatrix} = ظ = ١ ك, ٢ ن ك,$$

$$[٤٦-٨:١] \dots \begin{bmatrix} ١٨,٩٣٦- & ٠,٩٢٥ \\ ٠,٩٥٣ & ٠,٠٠٦٢٥ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ٧,٥- & ١ \\ ٠,٩٥٣ & ٠,٠٠٦٢٥ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ١٢- & ١ \\ ١ & ٠ \end{bmatrix} =$$

وَمَرَّةً أُخْرَى نَجِدُ أَنَّ الْمَحْدَدَةَ تُسَاوِي:

$$٠,٩٢٥ = (١٨,٩٣٦) (٠,٠٠٦٢٥) + (٠,٩٥٣) (٠,٩٢٥)$$

وَلَكِنْ كَيْفَ يُمَكِّنُ اسْتِخْدَامُ هَذِهِ الْمَصْفُوفَاتِ مِنْ نَاحِيَةِ عَمَلِيَّةٍ؟ أَنَّ الْعُنَاصِرَ الْأَرْبَعَةَ لِلْمَصْفُوفَةِ الْمُنْظُومَةِ تُعَرَّفُ بِثَوَابِتِ جَاؤِسْ: أ، ب، ج، د لِلْمُنْظُومَةِ مُرْتَبَةً عَلَى النِّحْوِ التَّالِي:-

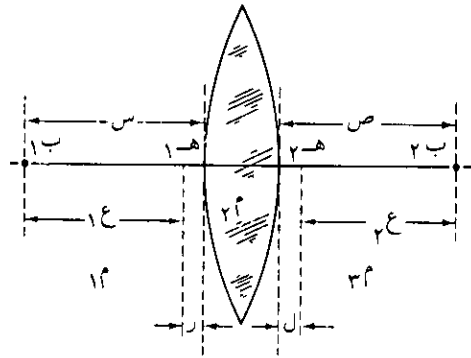
$$[٤٧-٨:١] \dots \begin{bmatrix} أ- & ب- \\ ح- & د- \end{bmatrix} = ظ$$

وما يَهْمُنَا مِنْهَا هو العناصرُ الثلاثةُ الأولى. ومن دونِ تقديمِ البرهانِ * نقولُ إنَّ هذه الثوابتَ ترتبطُ بأبعادٍ فيزيائيةٍ كما تُعرَّفُ أدناه وكما يُوَضِّحُها الشكل ١٠. فالمسافتان بين المستويين البؤريَّين ب_١، ب_٢ وسطحي العدسة هما على سبيلِ المثالِ :-

$$[٤٩، ٤٨-٨:١] \quad \dots \frac{٣م}{p} = ص؛ ب ع = \frac{١م}{p} = س$$

أما المسافتان بين المستويين الأساسيين ه_١، ه_٢ وقُطْبَي العدسة فهما :

$$[٥١، ٥٠-٨:١] \quad \dots \frac{(١-ح)}{p} ٣م = ل؛ \frac{(ب-١)}{p} ١م = ر$$



الشكل ١٠: التعرف الى المسافات المستخدمة في حساب المصفوفات

و يُعْطِي فارقُ المسافتين س-ر، ص-ل البُعْدَيْنِ البُؤْرِيَّيْنِ.

مثال ٥ :

جد البعد البؤري للعدسة مُحَدَّبة الوجهَيْنِ في المثال ٤.

الحل :

من مَصْفُوفَةِ المنظومةِ في المعادلة [٤٦-٨:١] نُعَيِّنُ المستويين الأساسيين مِنْ حَيْثُ مَوْقِعُهُمَا كَمَا يَلِي :-

* لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى كتاب

A. Nussbaum. *Geometric Optics* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1968), 25 ff.

$$r = \frac{(1-b)}{1} = \frac{1-0,925}{18,936} = 0,00396$$

$$l = \frac{(1-h)}{1} = \frac{1-0,953}{18,936} = 0,00248$$

$$\text{كذلك: س} = \frac{b}{1} = \frac{0,925}{18,936} = 0,0488$$

$$\text{ص} = \frac{h}{1} = \frac{0,953}{18,936} = 0,0503$$

ومن ثمَّ فالْبُعْدَانِ البُورِيَّانِ هُمَا :-

$$ع_1 = \text{س} - \text{ر} = 0,0488 - 0,00396 = 0,04484$$

$$ع_2 = \text{ص} - \text{ل} = 0,0503 - 0,00248 = 0,04782$$

وهي نفسُ الوَحْدَاتِ التي اسْتَخْدَمْنَاهَا فِي الْبِدَايَةِ.

وَإِذَا مَا اعْتَبِرْتَ الْعَدْسَةَ عَدْسَةً رَقِيقَةً فَإِنَّ :-

$$أ = ق_1 + ق_2 ؛ ب = ح = 1 ؛ د = ل = 0 [١: ٨-٥٢]$$

$$\text{وأيضاً س} = ع_1 ، \text{ص} = ع_2 [١: ٨-٥٣]$$

وَيَعْنِي هَذَا أَنَّ الْمُسْتَوِيَيْنِ الْأَسَاسِيَيْنِ يَمَاسَانِ قُطْبَتِي الْعَدْسَةِ وَأَنَّ الْبُعْدَيْنِ الْبُورِيَّيْنِ يُقَاسَانِ مِنْهُمَا. وَيُمْكِنُ أَجْرَاءُ مَزِيدٍ مِنَ التَّبْسِيطِ إِذَا كَانَتْ مَسَافَةُ الْجِسْمِ أَوْ مَسَافَةُ الصُّورَةِ كَبِيرَةً مُقَارَنَةً بِسُمِّكَ الْعَدْسَةِ. فَفِي هَذِهِ الْحَالَةِ يَنْطَبِقُ الْمُسْتَوِيَانِ الْأَسَاسِيَانِ عَلَى الْمَرْكَزِ الْهَنْدَسِيِّ لِلْعَدْسَةِ، وَيُقَاسُ الْبُعْدَانِ الْبُورِيَّانِ مِنْهُ كَذَلِكَ.

وفي الوقت الحاضر أصبح تصميم العدسة أكثر فأكثر قضية أتمتة أو تقنية آلية automation. وتلعب طرق المصفوفات دوراً هاماً في ذلك؛ إذ يُمكن كتابة البرامج التي تجعل من الممكن تصميم العدسة آلياً: من الرسم الشعاعي البسيط إلى تصميمات معقدة تُصحح الزوجانات من الرُتبين الثالثة والخامسة وحتى الرُتب الأعلى. وتستطيع الحاسبات الإلكترونية بالبرمجة الصحيحة أن تختار بنفسها وفق مواصفات مُعطاة البُعد البؤري الأفضل، الفتحة، عدد العناصر، أنواع الزجاج، معاملات الانكسار، أقطار التكوير، والسُّبك، وأن تحسب حتى كلفة المنظومة ووزنها. *

أمثلة على تصميم العدسة

نقدم هنا بعض الأمثلة على تصميمات عدسية تجارية. ففي ثلاثي كوك Cooke triplet توضع عدسة سالبة بين عدستين موجبتين مُقلَّلة بذلك كثيراً الاستجماتية وتقوس المجال - الشكل ١١. وتعتبر عدسة زيس تسر Zeiss Tessar التي تشبه في مفهومها عدسة كوك من أفضل العدسات الشبيهة الفوتوغرافية حديثة الشهرة، وهي مثل عدسة كوك ذات هيئة (أو ترتيب) غير متماثلة. أما العدسة التلغوتية telephoto lens أي عدسة التصوير عن بُعد والتي لا تظهر في الشكل ١١ فهي عادة من نوع العدسات الذي يُعرف بنوع جاليليو type Gallilean، حيث يقع المستويان الأساسيان خارج المنظومة البصرية وأمامها، الأمر الذي يجعل لها بُعداً بؤرياً أطول من الطول الطبيعي للمنظومة العدسية بما في ذلك الكاميرا. وعدسات الزاوية الواسعة wide - angle lenses هي تلك العدسات التي تُغطي صوراً مصححة ذات قطر أكبر من البُعد البؤري للعدسة، ويُناظر حجم الصورة هذا مجالاً نصف زاويته ٢٧°. أما عدسة عين السمكة fish-eye lens فهي تغطي كامل المجال نصف الكروي لكنها تغطي صوراً مُشوَّهة جداً. والمثال التقليدي على هذه العدسة هي عين السمكة نفسها تحت الماء. كذلك يُمكن تغطية المجال الذي زاويته ١٨٠° أي المجال نصف الكروي بالكاميرا ذات الثقب الواحد المملوء بالماء. ومن الأمثلة عليها نصف الكرة الزجاجية التي تحوي ثقباً في مركز وجهها المستوي الذي يُقابل الجسم. ويُظهر التصميم في الشكل ١١

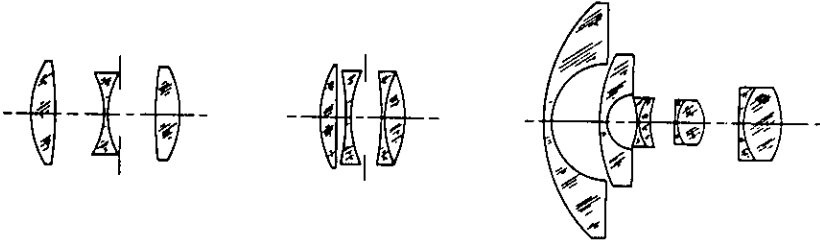
* انظر لمزيد من التفاصيل:-

* D. P. Feder, "Automatic Optical Design," *Applied Optics* 2 (1963), 1209-26.

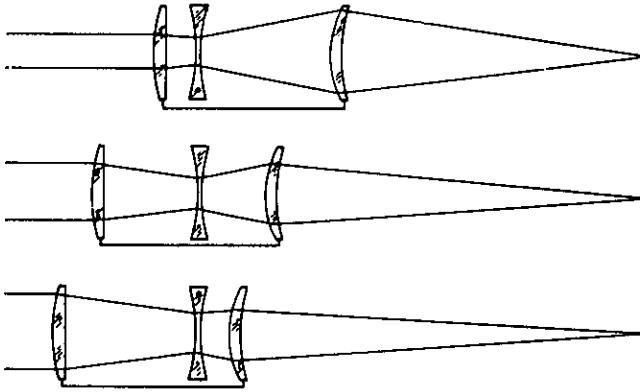
عدسة عَيْن السمكة المعقدة والمصححة للزوغان اللوني.*

وعدسة التزويم Zoom lens عبارة عن منظومة بصرية ذات بُعد بُؤري متغير، ومن ثم فإنها تسمح بتغيير في التكبير من دون الذهاب بتركيز الصورة. ويمكن تصنيف منظومات التزويم + تبعا لعدد العناصر المكونة لها بدءا بالعدسة الأمامية وحتى آخر مكونة تزويمية متحركة. وفي منظومة التزويم ثلاثية العدسات على سبيل المثال تُربط عدستان موجبتان معا ليتحركا بتراؤف وتوضع بينهما عدسة سالبة مستقرة - الشكل ١٢. وعندما تكون العدسة السالبة في منتصف المسافة بين العدستين، يكون للمنظومة تكبير معين. وعند تحريك العدستين إلى الخلف أو إلى الأمام يمكن زيادة تكبير الصورة أو تصغيرها.

أما الأكسيكون (axicon) فهو عبارة عن مخروط مُستوٍ من الزجاج أو البلاستيك أو مخروط أجوف يعكس الضوء ‡، ويُستخدم بصورة أساسية في ترتيب الأشياء في خطوط مُستقيمة.



الشكل ١١: من اليسار إلى اليمين: ثلاثي كوك، عدسة زيس تسر، وعدسة عَيْن السمكة.



الشكل ١٢: منظومة التزويم ثلاثية العدسات

*From: K. Miyamoto, "Fish Eye Lens," *J. Opt. Soc. Am.* **54** (1964), 1060-61.

†L. Bergstein and L. Motz, "Two-Component Optically Compensated Varifocal System," *J. Opt. Soc. Am.* **52** (1962), 353-62; "Three-Component . . .," *J. Opt. Soc. Am.* **52** (1962), 363-75; "Four-Component . . .," *J. Opt. Soc. Am.* **52** (1962), 376-88.

‡J. H. McLeod, "Axicons and Their Uses," *J. Opt. Soc. Am.* **50** (1960), 166-69.

اقتراحات لقراءات اضافية

- R. Kingslake, "Basic Geometric Optics" and "Lens Design," *Applied Optics and Optical Engineering* (New York: Academic Press, Inc., 1965), I, III, 201-44; 1-42.
- W. J. Smith, *Modern Optical Engineering* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1966).
- M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics* (New York: Interscience Publishers, Inc., 1958).
- A. Nussbaum, *Geometric Optics* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1968).
- L. Levi, *Applied Optics, A Guide to Optical Design*, Vol. 1 (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1968).
- W. Brouwer, *Matrix Methods in Optical Instrument Design* (New York: The Benjamin Company, Inc. 1964).
- A.E. Conrady, *Applied Optics and Optical Design* (New York: Dover Publications, Inc., 1957).

المسائل

- ١-٨:١ وُضِعَ جِسْمٌ عَلَى بُعْدٍ +١٢ سم من عَدْسَةٍ بُعْدُهَا الْبُؤْرِيُّ -٢٠ سم، كَمَا وُضِعَتْ عَدْسَةٌ بُعْدُهَا الْبُؤْرِيُّ +٤ سم عَلَى بُعْدٍ ٢ سم خَلَقَتِ الْعَدْسَةُ الْأُولَى:
- (أ) جِدْ مَسَافَةَ الصُّورَةِ كَمَا تُقَاسُ مِنَ الْعَدْسَةِ الثَّانِيَةِ بِاسْتِخْدَامِ مُعَادَلَةِ الْعَدْسَةِ الرَّقِيقَةِ - صِيغَةِ جَاوِس (ب) جِدِ الْبُعْدَ الْبُؤْرِيَّ الْمَكافِئَ لِلْمَنْظُومَةِ (ج) بِافْتِرَاضِ أَنَّ الْمَسْتَوَى الْأَسَاسِيَّ الثَّانِي يَقَعُ فِي مُنْتَصَفِ الْمَسَافَةِ بَيْنَ الْعَدْسَتَيْنِ، جِدْ حَجْمَ الْخَطِ الْخَاصِلِ.
- ٢-٨:١ وُضِعَ جِسْمٌ ارْتِفَاعُهُ ١ سم أَمَامَ عَدْسَةٍ بُعْدُهَا الْبُؤْرِيُّ +٣ سم، كَمَا وُضِعَتْ عَدْسَةٌ بُعْدُهَا الْبُؤْرِيُّ -١٠ سم عَلَى مَسَافَةٍ ١,٥ سم خَلَقَتِ الْعَدْسَةُ الْأُولَى. جِدْ:
- (أ) مَسَافَةَ الصُّورَةِ مِنَ الْعَدْسَةِ الثَّانِيَةِ (ب) ارْتِفَاعَ الصُّورَةِ النَّهَائِيَةِ.

٣-٨:١ وُضِعَ جِسْمٌ عَلَى بُعْدٍ ٣٠ سم إِلَى يَسَارِ عَدْسَةٍ قُوَّتُهَا +٥,٠٠ م-١، كَمَا وُضِعَتْ عَدْسَةٌ قُوَّتُهَا +١٠,٠٠ م-١ عَلَى مَسَافَةٍ ١٠ سم إِلَى يَمِينِ الْعَدْسَةِ الْأُولَى. جِدْ مَسَافَةَ الصُّورَةِ مُقَاسَةً مِنَ الْعَدْسَةِ الثَّانِيَةِ، وَالتَّكْبِيرَ الْكُلِّيَّ.

٤-٨:١ عَدَسَتَانِ مُتساوَتَانِ فِي الْقُوَّةِ وَمُخْتَلِفَتَانِ فِي الْإِشَارَةِ مُثَبَّتَتَانِ عَلَى مَحْوَرٍ مُشْتَرَكٍ وَمُتَبَاعِدَتَانِ بِمَسَافَةٍ قَصِيرَةٍ. فَإِذَا مَرَّ الضَّوُّ الْمُتَوَازِي بِالْعَدْسَةِ الْمَوْجِبَةِ أَوَّلًا ثُمَّ بِالْعَدْسَةِ السَّالِبَةِ، فَمَا الْقُوَّةُ الْكُلِّيَّةُ لِلْمَجْمُوعَةِ؟

ما مقدارُ القوةِ الكليةِ لو مرَّ الضَّوُّ بِالْعَدْسَةِ السَّالِبَةِ أَوَّلًا؟

٥-٨:١ إِذَا كَانَ الضَّوُّ السَّاقِطُ عَلَى مَجْمُوعَةِ الْعَدَسَاتِ فِي الْمَسْأَلَةِ ١-٨:٤ مُتَجَمِّعًا بَدَلًا كَوْنِهِ مُتَوَازِيًا، فَمَا مَقْدَارُ الْقُوَّةِ الْكُلِّيَّةِ لِلْمَجْمُوعَةِ؟ اشرحْ إجابَتَكَ بِالِاسْتِعَانَةِ بِرِسْمٍ شُعَاعِيٍّ. مَا الْقُوَّةُ الْكُلِّيَّةُ إِذَا مَرَّ الضَّوُّ بِالْعَدْسَةِ السَّالِبَةِ أَوَّلًا؟

٦-٨:١ عَدْسَةٌ هَلَالِيَّةٌ سَمِيكَةٌ ذَاتُ مُعَامِلِ انكسارٍ مُرْتَفِعٍ وَنُصْفَيَّ قُطْرٍ تَكْوُرٍ مُتساوَيْنَيْنِ. وَضِعَتْ بَيْنَ وَسَطَيْنِ: أَحَدُهُمَا ذُو مُعَامِلِ انكسارٍ مُتَوَسِّطٍ مِثْلِ الْمَاءِ وَالْآخَرُ ذُو مُعَامِلِ انكسارٍ مُنْخَفِضٍ مِثْلِ الْهَوَاءِ. مُسْتَعِينًا بِرِسْمَيْنِ شُعَاعِيَّيْنِ، اسْتَقْ مَعَادَلَةً عَامَّةً تُبَيِّنُ تَأْثِيرَ الْعَدْسَةِ فِي ضَوْءٍ مُتَوَازٍ مَارٍّ فِي الْمَاءِ وَسَاقِطٍ أَوَّلًا عَلَى: (أ) سَطْحِ الْعَدْسَةِ الْمُحَدَّبِ (ب) سَطْحِ الْعَدْسَةِ الْمُقَعَّرِ.

٧-٨:١ أَشَارَتْ وَصْفَةٌ طَبِيبَةٌ لِلْعَيْنِ بِوَضْعِ نَظَّارَةٍ تَصْحِيحِيَّةٍ قُوَّتُهَا -٤,٥٠ م-١ عَلَى بُعْدٍ ١٤ سم أَمَامَ الْقَرْنِيَّةِ. فَإِذَا اخْتَارَ الْمَرِيضُ لُبْسَ عَدَسَاتٍ لَا صِفَةَ عَوَضًا مِنَ النَّظَّارَةِ، فَمَا الْوَصْفَةُ اللَّازِمَةُ؟

٨-٨:١ تُصَحِّحُ عَيْنُ مَرِيضٍ بِوَسَاطَةِ نَظَّارَةٍ قُوَّتُهَا -٣,٢٥ م-١. فَإِذَا انكسرتِ النَّظَّارَةُ وَلَمْ يَتَوَافَرَ إِلَّا نَظَّارَةٌ قُوَّتُهَا -٣,٥٠ م-١، فَعَلَى أَيَّةِ مَسَافَةٍ مِنَ الْقَرْنِيَّةِ يَتَّبَعِي لُبْسُ النَّظَّارَةِ لِلْحَصُولِ عَلَى نَفْسِ التَّصْحِيحِ؟

٩-٨:١ يُرَادُ تَصْمِيمُ مَنْظُومَةٍ عَدْسِيَّةٍ بَعْدَهَا الْبُورِيُّ الْمَكَافِيءُ ١٠ سم بِاسْتِخْدَامِ عَدَسَتَيْنِ مُوجِبَتَيْنِ: النَّسْبَةُ بَيْنَ قُوَّتَيْ الْكَسْرِ لِهُمَا ١:٢,٥ وَالْمَسَافَةُ بَيْنَهُمَا ٤ سم. جِدِ الْبَعْدَ الْبُورِيَّ لِكُلِّ مِنَ الْعَدَسَتَيْنِ.

١٠-٨:١ مَا الْبُعْدُ الْبُورِيُّ لِكُلِّ مِنَ الْعَدَسَتَيْنِ فِي الْمَسْأَلَةِ ١-٨:٩ لَوْ كَانَتِ الْعَدَسَتَانِ مُتساوِيَتَيْنِ فِي الْقُوَّةِ؟

١١-٨:١ ثلاث عدسات أبعادها البؤرية $10+$ سم، $10-$ سم، $10+$ سم على الترتيب. وُضِعَت الواحدة خَلْفَ الأُخْرَى عَلَى مَسَافَةٍ ٢ سم. فإذا سَقَطَتْ أشعة متوازية على العدسة الأولى، فَجَدَ مَسَافَةَ البُورَةِ خَلْفَ العدسة الثالثة التي يَتَجَمَّعُ عندها الضوء.

١٢-٨:١ افترض أنَّ العدستين الموجبتين في المسألة ١-٨:١١ قد حُرِّكتا إلى الأمام مسافة ١ سم، بَيْتَمَا بَقِيَتِ العدسة السالبة وَمُسْتَوَى الصورة ثابتين في مَوْضِعَيْهِمَا السابقتين أي في وضعٍ مُشَابِهٍ تماماً لعدسة التزويم في الشكل ١٢ من هذا الفصل. جِدِ الفرقَ (في اتجاه المحور) بَيْنَ موقع الصورة وَمَوْضِعِهَا في المسألة السابقة.

١٣-٨:١ يُرَادُ صَنْعُ عدسة رقيقة من الزجاج الصواني ($m = 1.5$) بحيثُ يَكُونُ بُعْدُهَا البؤري $5+$ سم. جِدِ للضوء الساقط المتوازي عاملَ الموقع لكوندنجتون. ولكي يَكُونُ للعدسة أَصْغَرُ زَوْغانٍ كُرِّيٍّ، جِدِ عاملَ الشكل المطلوب وَنُصْفِي قُطْرَ التَكْوِيرِ اللازمين.

١٤-٨:١ خُذْ نَفْسَ العدسة في المسألة ١-٨:١٣. عَيِّنْ عاملَي الشكل والموقع وَنُصْفِي قُطْرَ التَكْوِيرِ للحصول على أَصْغَرِ زَوْغانٍ كُرِّيٍّ في حالِ استخدام العدسة لِتَصْوَيرِ جِسْمٍ مَسَافَتُهُ ٢٠ سم.

١٥-٨:١ مُقْتَفِيّاً المَثَالَ المَشْرُوحَ في الفصل الحالي، صَمِّمْ ثنائياً لا لَوْنِيّاً بُعْدُهُ البؤري $10+$ سم مُسْتَحْدِماً معاملات الانكسار في الجدول ١ من هذا الفصل.

١٦-٨:١ صَمِّمْ ثنائياً لاصِطاً بِحَسَبِ المواصفات في المسألة ١-٨:١٥ باستخدام عدسة هَلَالِيَّةٍ صُوانِيَّةٍ سالبة تَلِيهَا عدسة تَاجِيَّةٍ مُستَوِيَّةٍ -مَحْدَبَةٍ، عِلْماً أَنَّ السطح الأخيرَ هُوَ السطح المستوي.

١٧-٨:١ باستخدام عدستين رقيقتين موجبتين: أحدهما ذات بُعْدٍ بؤري يساوي ١٢ سم، صَمِّمْ ثنائياً لا لَوْنِيّاً ذا بُعْدٍ بؤري مُكَافِئٍ مقدارُهُ ٨ سم. جِدِ البُعدَ البؤري للعدسة الثانية وكذلك المسافة بَيْنَ العدستين.

١٨-٨:١ ثنائياً لالوئي يتألف من عدستين رقيقتين موجبتين مُتَبَاعِدَتَيْنِ مسافة ٨ سم. البُعدُ البؤري للعدسة الأولى يساوي ١٢ سم. جِدِ البُعدَ البؤري: (أ) للعدسة الثانية (ب) للمنظومة كُلِّهَا.

١٩-٨:١ باستخدام ضرب المصفوفات، عبّر عن $\bar{S}$ ، $\bar{V}$ بدلالة S ، V .

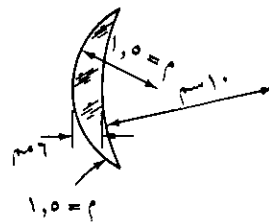
$$\begin{bmatrix} \bar{S} \\ \bar{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

٢٠-٨:١ إن ضرب المصفوفات لا يخضع لقانون التبادلي، أي أن حاصل ضرب المصفوفات يتوقف على الترتيب الذي يتم فيه الضرب. أجر الضرب التالي، ثم اعكس الترتيب وأجر الضرب مرة أخرى وقارن النتيجة. أي مثال في البصريات يُشبه هذه الحالة؟

$$\begin{bmatrix} 3 & -1 \\ 4 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

٢١-٨:١ عيّن مصفوفة المنظومة للعدسة في الشكل ١٣. لا تهمل إدخال الإشارات الصحيحة.

٢٢-٨:١ جد مصفوفة المنظومة للعدسة في الشكل ١٣ عند جعل الوجه المقعر يُقابل الضوء الساقط على العدسة من جهة اليسار.



الشكل ١٣

الفصل ١ : ٩

الآلات البصرية Optical Instruments

يوجدُ بكلِّ تأكيدٍ عددٌ كبيرٌ من الآلاتِ البصريةِ إلى درَجَةٍ تَجْعَلُ حَتَّى مُحَاوَلَةَ إَعْدَادِ قائمةٍ بِهَا أَمْراً عَدِيمَ الفائدةِ. وَعِوَضاً مِنْ ذَلِكَ فَسَنَقْيِّدُ أَنْفُسَنَا بِمُنَاقَشَةِ فَنَاتٍ قَلِيلَةٍ مُمَثِّلَةٍ لَهَا.

التلسكوبات والميكروسكوبات

إنَّ غرضَ الميكروسكوباتِ والتلسكوباتِ واحدٌ: وَهُوَ رُؤْيُ الأجسامِ التي لا يُمكنُ لِلْعَيْنِ رُؤْيُهَا مِنْ دُونِهَا جَيِّداً. وَكِلَاهُمَا مَوْلَّفٌ مِنْ عُنْصُرَيْنِ رَئِيسَيْنِ: العَدْسَةُ الشَّيْئِيَّةُ التي تُكوِّنُ صُورَةً حَقِيقِيَّةً وَسَيْطَةً، والعَدْسَةُ العَيْنِيَّةُ التي تُكَبِّرُ الصُّورَةَ الوَسَيْطَةَ.

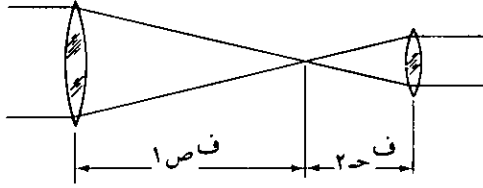
أظهرتِ التلسكوباتُ الأولى الكثيرَ من الزَّوْغَانِ اللَّوْنِيِّ. وَقُدِّرَ أَنَّ الطَّرِيقَةَ الْوَحِيدَةَ لِلتَّخْلِصِ مِنْ ذَلِكَ كَانَ فِي زِيَادَةِ بُعْدِهَا الْبُؤْرِيِّ؛ وَلِذَا بَلَغَ الْبَعْدُ الْبُؤْرِيُّ لِبَعْضِ التِّلِسْكَوباتِ ٦٨ مَ مَعَ أَنَّ فَتْحَتَهَا نَادِراً مَا زَادَتْ عَلَى ٢٠ سم. وَنُمِيزُ هُنَا عِدَّةَ أَنْوَاعٍ مِنَ التِّلِسْكَوباتِ: الْكَاسِرَاتِ الْفَلَكيَّةِ، التِّلِسْكَوباتِ الْأَرْضِيَّةِ، وَالتِّلِسْكَوباتِ الْعَاكِسَةِ.

التلسكوب الفلكي Astronomical telescope

يَحْتَوِي تِلِسْكَوبُ كِبْلَرِ Kepler's refracting telescope * عَلَى عَدَسَتَيْنِ مُجْمَعَتَيْنِ أَوْ مَنْظُومَتَيْنِ عَدَسِيَّتَيْنِ: الشَّيْئِيَّةِ وَهِيَ ذَاتُ بُعْدٍ بُؤْرِيِّ طَوِيلٍ نَسِيباً وَالْعَيْنِيَّةِ وَهِيَ ذَاتُ بُعْدٍ بُؤْرِيِّ قَصِيرٍ، تَوْضَعَانِ مُتَبَاعِدَتَيْنِ بِحَيْثُ تَنْطَبِقُ بُؤْرَاهُمَا الدَّاخِلَتَانِ - الشَّكْلُ ١. وَفِي حَالَةٍ

*Ioannis Kepler, *Dioptrice, seu Demonstratio eorum quae visui & visibilibus propter Conspicilla non ita pridem inventa accidunt* (Demonstration of vision and visibility of small objects and other incidental matter), Augustae Vindelicorum, 1611.

العين غير المتكيفة، يتجمع الضوء الساقط من جسم في مالا نهاية في بؤرة على الشبكية مكوناً صورة حقيقية. وكما هو واضح، فإن كثافة الفيض الضوئي (أي كمية الضوء المارة عبر وحدة المقطع العرضي في وحدة زمنية واحدة) عند دخول العين هي الآن أكبر منها عند دخول فتحة أو بؤرة العدسة الشيئية. ولهذا فإن النجوم التي لا تُرى بالعين يُمكن مُشاهدتها بالتلسكوب.



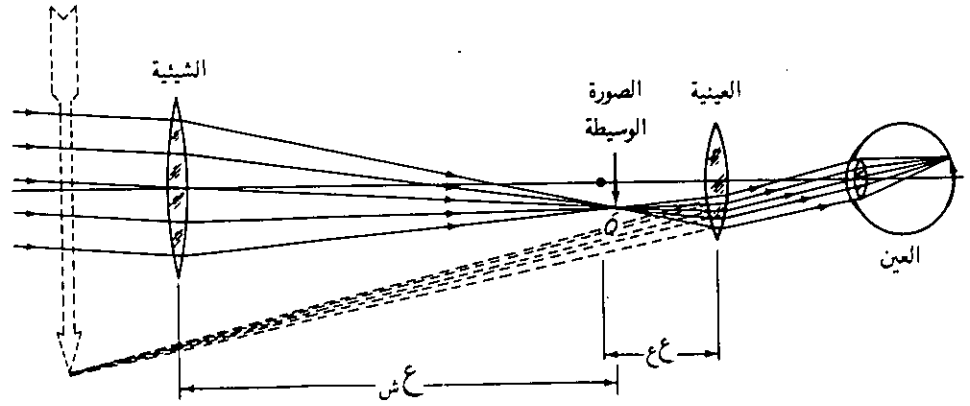
الشكل ١: التلسكوب الفلكي المهيأ للأجسام البعيدة جداً (غير المتناهية) ومسافة الصورة.

وقد فتحة العدسة الشيئية هي بؤرة الدخول للتلسكوب. ويُعين بؤرة الخروج بتركيز التلسكوب على جسم في مالا نهاية ثم بتوجيهه نحو مصدر ضوئي منتشر مثل السماء. ويوضع ورقة خلف العينية وتحريكها إلى الأمام وإلى الخلف يُحدد موقع صورة بؤرة الدخول الذي هو بؤرة الخروج أو دائرة رافسدين. وتساوي نسبة قطر بؤرة الدخول إلى قطر بؤرة الخروج التكبير الزاوي للتلسكوب.

وعندما يكون الجسم في مالا نهاية، وبالتكبير اللازم، يُمكن إيجاد الصورة بالرسم الشعاعي كما في الشكل ٢. وتكون الصورة مكبرة، وهمية، ومقلوبة، كما يكون التكبير الزاوي $T = \frac{ع_ش}{ع_ع}$ ، حيث $ع_ش$ البعد البؤري للشيئية، و $ع_ع$ البعد البؤري للعينية. ويصح هذا ما دام كل من الجسم والصورة في مالا نهاية. وأما إذا كان الجسم أو الصورة أو كلاهما على مسافة محدودة، فينبغي أن يُحسب التكبير على انفراد لكل من الشيئية والعينية، كما ينبغي ضرب تكبيريهما للحصول على التكبير الكلي Magnification.

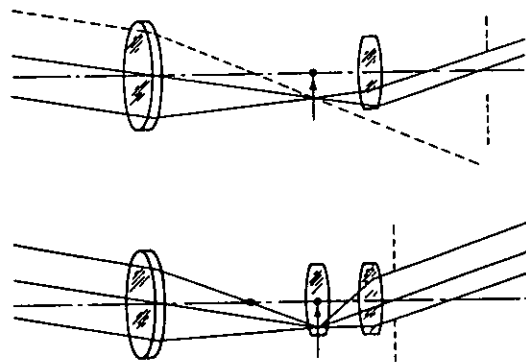
العينيات Eyepieces

إن مجال الرؤية للتلسكوب البسيط في الشكل ٢ محصور من دون ضرورة. وهو كذلك غير مُرضٍ، لأن كمية الضوء التي تُستقبل عند مستوى الصورة تقل جهة حافة المجال.



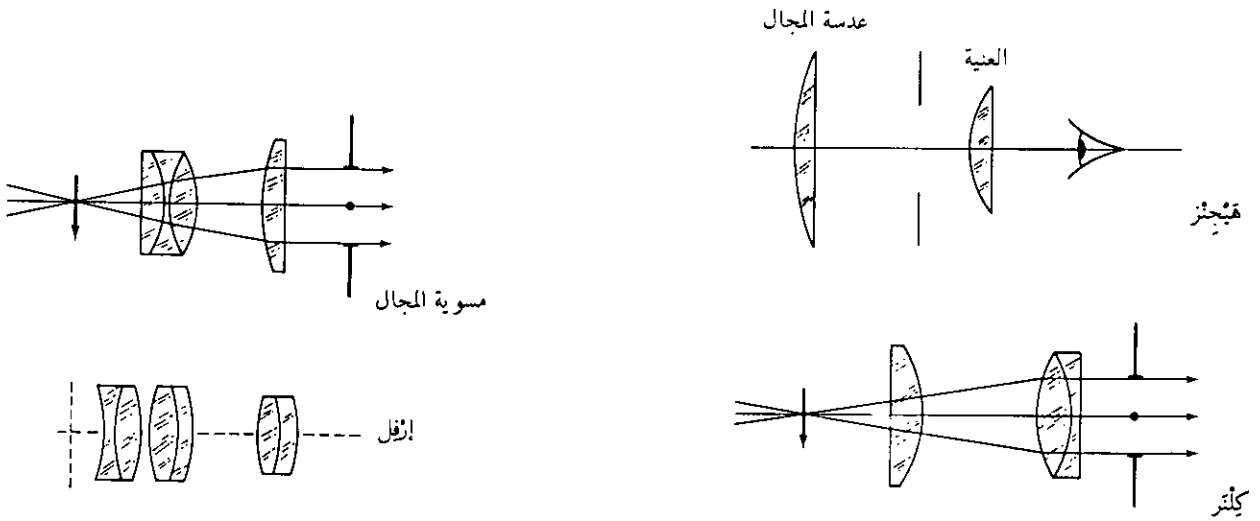
الشكل ٢: الرسم الشعاعي للصورة المتكونة بالتلسكوب الفلكي

وَكَمَا يُلَاحَظُ مِنَ الشَّكْلِ ٣ - الرَّسْمِ الْعُلُويِّ، فَإِنَّ بَعْضَ الضَّوْعِ لَا يَصِلُ الْعَيْنَ بَتَاتًا. وَمِنْ الْمُمْكِنِ تَصْحِيحُ هَذَا الْوَضْعِ بِوَضْعِ عَدْسَةٍ إِضَافِيَةٍ تُسَمَّى عَدْسَةُ الْمَجَالِ قَرِيبًا مِنْ مُسْتَوَى الصَّوَرَةِ الْوَسِيطَةِ بَيْنَ الشَّيْئَةِ وَالْعَيْنَةِ. وَلَيْسَ لِهَذِهِ الْعَدْسَةِ أَيُّ تَأْثِيرٍ فِي التَّكْبِيرِ، وَلَكِنَّهَا تُوجِّهُ كُلَّ الْأَشْعَةِ الْمَارَّةِ فِيهَا إِلَى الْعَيْنَةِ. وَكَذَلِكَ، وَلِأَنَّ عَدْسَةَ الْمَجَالِ أَقْرَبُ إِلَى بُؤَيْهِ الدَّخُولِ مِنَ الْعَيْنَةِ، فَهِيَ تُقَابِلُ بُؤَيْ الدَّخُولِ بِزَاوِيَةٍ أَكْبَرَ، مُوسَّعَةً بِذَلِكَ مَجَالَ النَّظَرِ قِيَاسًا إِلَى الْعَيْنَةِ بِمُفْرَدِهَا. وَتَقْوَدُ هَذِهِ الْإِعْتِبَارَاتُ إِلَى تَطْوِيرِ الْعَيْنِيَّاتِ - الشَّكْلِ ٤. فَعَيْنِيَّةُ هَيْجِلَرْزْ مَثَلًا تُتَأَلَّفُ مِنْ عَدْسَتَيْنِ مُسْتَوِيَّتَيْنِ - مُحَدَّبتَيْنِ بِحَيْثُ يُوَاجِهُ وَجْهَاهُمَا الْمُسْتَوِيَّانِ الْعَيْنَ، وَبَحَيْثُ تَكُونُ عَدْسَةُ الْعَيْنِ أَقْصَرَ فِي بُعْدِهَا الْبُؤْرِيِّ مِنْهُمَا، وَبَحَيْثُ تَتَبَاعَدَانِ مَسَافَةً تُسَاوِي نِصْفَ مَجْمُوعِ بُعْدَيْهِمَا الْبُؤْرِيَّيْنِ.



الشكل ٣: التلسكوب الفلكي بعدسة مجال اضافية ومن دونها.

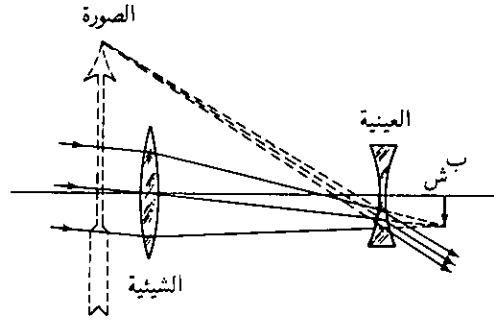
أما عينية رافسدين التي لا تُعرضُ هنا فتحتوي على عدستين مُستويتين - محدبتين متساويتين أو شبه متساويتين ، بحيث يتقابل وجهاهما المحدبان . أما المسافة بينهما فتساوي تقريباً البُعد البُوري لأحدهما ، الأمر الذي يوفر للمستوى البُوري الأول أن يقع خارج عدسة المجال مما يُلائمُ شبكية عينية التلسكوب . ونُسبُ عينية كيلنر Kellner من ناحية أساسية عينية رافسدين إلا أنها تستخدمُ ثنائياً لا لونياً كعدسة عين . أما عينية مُسووية المجال orthoscopic eyepiece فلها تصحيحٌ لونيٌ مقبولٌ ومجالٌ واسع . وتتألف عينية أرفل (Erflé) من ثلاثة ثنائيات لونية . وتشتملُ عينية جاوس التي لا تُعرضُ هنا على شاطر حُرمة اضافي beam splitter وعلى مضباح ضوئي لإضاءة شبكية من الشعرات المتعامدة . أما عدسة بارلو Barlo فهي عدسة سالبة تُضافُ إلى عينية هيجنز أو رافسدين ، وهي تُمكنُ زيادة طفيفة في البُعد البُوري من زيادة التكبير الزاوي للتلسكوب إلى مرتين وحتى ثلاث مرات . وفي عينية الميكرومتر الخيطي filar micrometer eyepiece ، تُحركُ شعرة الشبكية عبر مجال النظر ، ونقرأ مسافة الحركة على أسطوانة .



الشكل ٤ : أنواع مختلفة من العينية

تِلْسُكُوب جاليلو

يحتوي تلسكوب جاليلو أو التلسكوب الأرضي^٥ على عدسة مُجمعة أي الشيئية وعدسة مُفرقة للعينية - الكشل ٥. ويدون عينية يتجمع الضوء من جسم بعيد في بؤرة عند ب.ش. ولكن العينية توضع قبل أن يحدث هذا التجمع أي أنها توضع بحيث تنطبق بؤرتها اليمنى على ب.ش. ولذلك فالضوء المجمع بالعدسة الشيئية يُعترض بالعينية التي تجعله متوازيًا، مكوناً بذلك صورة على شبكية العين. وتكون الصورة المكبرة التي تُرى وهمية ومعتدلة.



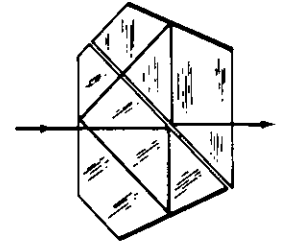
الشكل ٥: تلسكوب جاليلو

والمناظير الثنائية الموشورية^٦ prism binoculars عادةً كاسرات فلكية يتم بها - وباختيار سليم للمواشير - إعادة قلب الصورة. وفي الأنواع القديمة من المناظير الثنائية

٥. سمي نسبة الى جاليلو جاليلي (١٥٦٤-١٦٤٢): الفيزيائي، عالم الفلك والفيلسوف الطبيعي الايطالي، والاستاذ في جامعتي بيزا وبادو. عرف جاليلو عن التلسكوبات التي صنعت سابقا في بلاد الاراضي المنخفضة ولكنه كتب أنه «اكتشف نفس الاداة ليس صدفة وانما عن طريق التفكير النظري». وسميت ادواته «كونوشياك». أما لفظة تلسكوب (من اليونانية تلي وتعني بعيد، واسكوبس وتعني المشاهد) فقد نحتها بعد ذلك جوهان ديمشيان من سيفالونيا، الشاعر واللاهوتي اليوناني. وكان التكبير الزاوي للتلسكوب الخامس الذي صنعه جاليلو والمسمى المُكتشف ٣٠×، واكتشف به اقمار المشتري. وقد تعرض جاليلو في آخر حياته لمضايقات من السلطات الكنسية واجبر على نقض استنتاجه السابق بأن الأرض تدور حول الشمس. ولمعرفة سيرة جاليلو اقرأ: ي. س. بار: رجال وعلامات مميزة في البصريات - القسم الثالث - جاليلو جاليلي «البصريات التطبيقية»، ٣ (١٩٦٤)، ١٣٢١-١٣٢٨

E. S. Barr, "Men and Milestones in Optics-III. Galileo Galilei," *Applied Optics* 3 (1964), 1321-28.

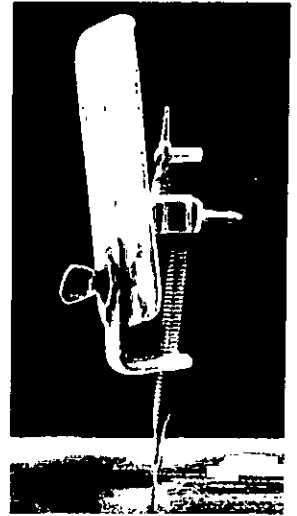
الموشورية، يُؤدى هذا الغرض مجموعتان متعامدتان من مواشير بورو (Porro) العاكسة كلياً. أما في الأنواع الجديدة منها فتستخدم أنواع أخرى من المواشير مثل مواشير ثومبسون thompson التي تسمى أيضاً مالمروس، شميت، بشأن أو موشور Z Malmros, Schmidt, Pechan or Z-prism - الشكل ٦. وتغطي المناظير الثنائية التي مواصفاتها ٣٠×٦ تكبيراً زاوياً مقداره ٦×، ولها فتحة دخول قطرها ٣٠ مم.



الشكل ٦: موشور ثومبسون

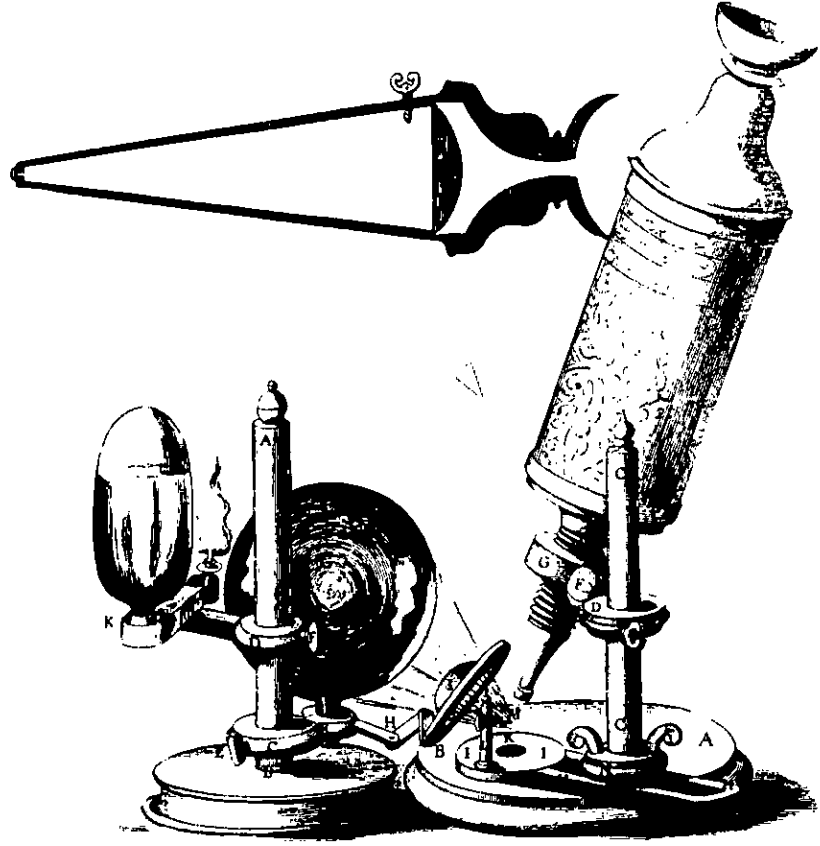
الميكروسكوبات

اشتق لفظ ميكروسكوب من اليونانية: ميكرو micros بمعنى صغير، وشكوبي scope وتعني انظر. ويشار أحياناً إلى المنظار الكبير في أبسط أشكاله أي العدسة محدبة الوجهين بأنه الميكروسكوب البسيط. ومن الأمثلة عليه ميكروسكوب ليفنهورك * Leeuwenhoek الذي وُصف أول مرة عام ١٦٧٤ أمام الجمعية الملكية اللندنية - الشكل ٧. ويختلف الميكروسكوب المركب عن الميكروسكوب البسيط في أن له منظومتين عدستين منفصلتين - الشكل ٨. وتكون العدسة الشيئية التي لها بُعد بؤري أقصر صورة وسيطة حقيقية مقلوبة ومكبرة، يراود تكبيرها بعد ذلك بالعينية. ولذلك فإن التكبير الكلي الذي يوفره الميكروسكوب المركب هو حاصل ضرب تكبري العدسة الشيئية والعينية.



الشكل ٧: ميكروسكوب فان ليفنهورك (ميكروسكوب نحاسي ١٢٥×)

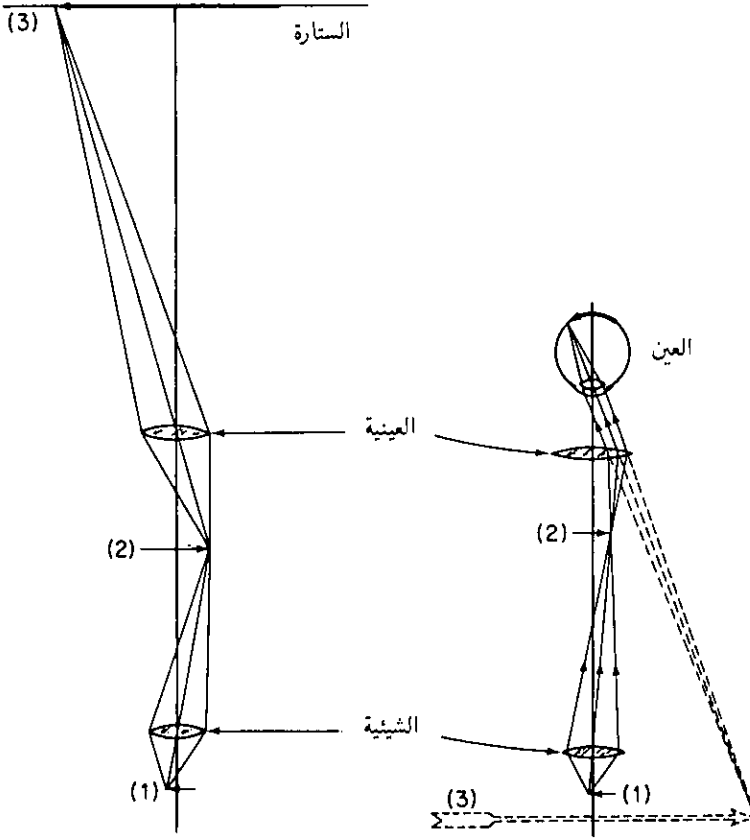
• أنتوني فان ليفنهورك (١٦٣٢-١٧٢٣): الناسخ وعالم الاحياء الهولندي. لقد وصف ليفنهورك في ٤٠١ مقالة منشورة بما في ذلك ٣٧٥ رسالة إلى الجمعية الملكية وكتاب «أسرار الطبيعة المكتشفة بالميكروسكوب» البكتيريا، خلايا الخميرة، دودة الدم، كريات الدم الحمراء (التي فسرت خطأً من قبل مالبيجي على أنها خلايا الدهن)، الحيات المنوية (مع أنه تخيل رؤية رؤوس بشرية صغيرة في داخلها)، والخطوط المتعامدة للاليف العضلية، وشرح كذلك ان بعض الحشرات لا تنمو من الطين ولكن من بيضات مطمورة فيه.



الشكل ٨: الميكروسكوب المركب لروبرت هوك.

[استنسخت هذه اللوحة باذن المتحف العلمي في لندن-S.W.7، وهي مأخوذة من كتاب هوك: ميكروجرافيكاً. لاحظ العدسة الشيئية الصغيرة التي تقع الى الجهة اليسرى البعيدة من الرسم المقطعي العرضي في الأعلى].

وَيَسِيرُ الضَّوُّ فِي مَسَارٍ مُخْتَلِفٍ تَبَعاً لاسْتِخْدَامِ الميكروسكوبِ لِلْمَشَاهِدَةِ البَصْرِيَّةِ أَوْ لِلْعَرْضِ وَالتَّصْوِيرِ المِجْهَرِيِّ. لِنَتَّصِرَ أَوَّلًا حَالِ الْعَرْضِ - الشكل ٩ الى اليسار. فعِنْدَمَا تَكُونُ الْعَيْنَةُ Specimen خارجَ البُعْدِ البُورِيِّ تُكُونُ الشَّيْءُ صُورَةً وَاسِطَةً حَقِيقِيَّةً. وَتَقَعُ هَذِهِ الصُّورَةُ خَارِجَ أَوْ أَمَامَ الْبُورَةِ الْأُولَى لِلْعَيْنَةِ. وَتُرَحَّلُ الْعَيْنَةُ هَذِهِ الصُّورَةَ مِثْلَ صُورَةٍ حَقِيقِيَّةٍ مَرَّةً أُخْرَى إِلَى سِتَارَةِ عَرْضِ أَوْ طَبَقَةٍ حَسَّاسَةٍ فُوتُوغْرَافِيَّةٍ أَوْ فِيلْمٍ. وَعِنْدَ النَّظَرِ إِلَى الْجِسْمِ تُقَرَّبُ الشَّيْءُ مِنَ الْجِسْمِ، الْأَمْرُ الَّذِي يَتَسَبَّبُ فِي جَعْلِ الصُّورَةِ الْوَسِيطَةِ تَقَعُ دَاخِلَ الْبُعْدِ الْبُورِيِّ

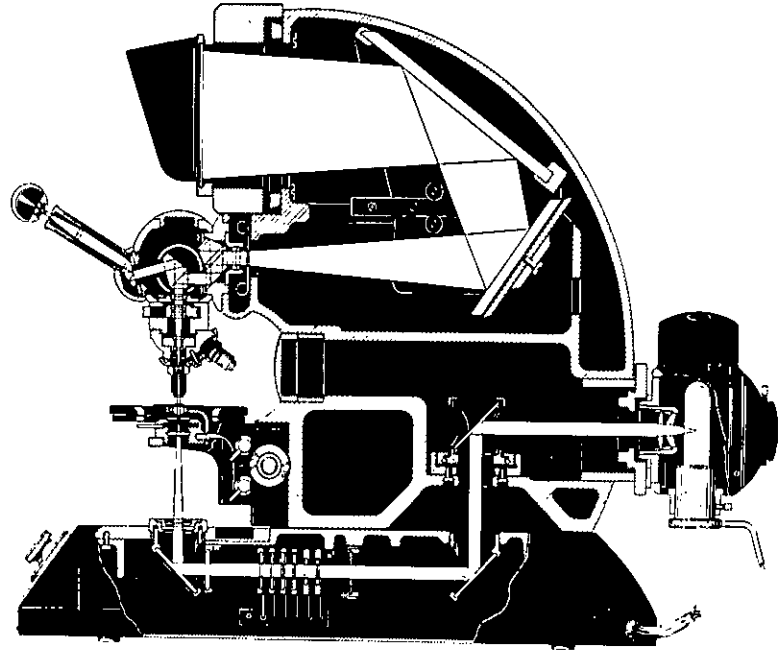


الشكل ٩ : رسم شعاعي للميكروسكوب المركب الذي يستخدم للعرض - إلى اليسار، وللملاحظة البصرية - إلى اليمين

للعينية التي تعملُ مثْلُ مُكَبِّرٍ - الشكل ٩ الرسم إلى اليمين. ولأنَّ التكبيرَ لا يَقْلِبُ الصورةَ، تَظَلُّ الصورةُ النهائيةُ نِسْبَةً إلى الجِسْمِ مقلوبةً. وَيُوضَّحُ الشكلُ ١٠ آلةَ حديثةَ مجهزةَ للملاحظةِ البصريةِ، العرضِ، والتصويرِ المجهرِيِّ المُكَبِّرِ.

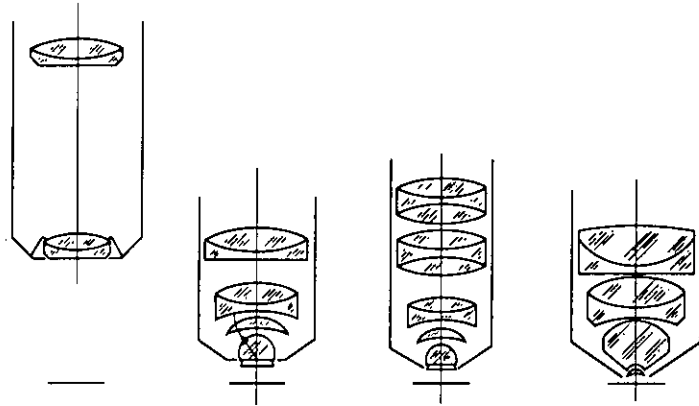
شَيْئَاتُ المِيكْرُوسْكُوبِ

تَتَفَاوَتُ العدساتُ الشئيةُ للميكروسكوبِ مِنَ العدساتِ اللَّالُونِيَّةِ الاقْتِصَادِيَّةِ المَصْحَحةِ لِلْوُثْنِ إِلَى العدساتِ مُفْرِطَةِ اللَّوْنِيَّةِ الغَالِيَةِ المَصْحَحةِ لِثَلَاثَةِ أَلْوَانٍ. أَمَّا المنظوماتُ المصنوعةُ مِنَ الفلورايتِ فَتَقَعُ بَيْنَ اللَّالُونِيَّةِ والمُفْرِطَةِ اللَّوْنِيَّةِ. وَتَكُونُ المُكْتَفَاتُ مِنْ نَوْعِ المَجَالِ الساطِعِ



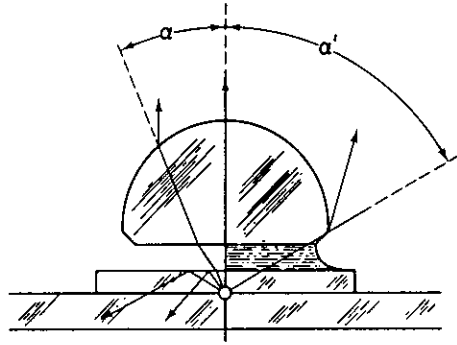
الشكل ١٠: الميكروسكوب المركب الحديث [بإذن من مؤسسة كارل زييس]

أو المُعْتَم. ففي مُكْتَفِ المجالِ الساطِعِ، يُرَكَّزُ الضوءُ على عَيْنَةِ الفَحْصِ ثُمَّ يَمُرُّ فِيهَا لِيَدْخُلَ فَتْحَةَ العدسةِ الشَّيْئِيَّةِ. أَمَّا فِي إِضَاءَةِ المجالِ المَعْتَمِ فَتُجْعَلُ حُرْمَةُ الضوءِ مِثْلَ مَخْرُوطِ أَجْوَفٍ، وَتَقْدَمُ مَرُورِهَا بِالْعَيْنَةِ تَتَجَنَّبُ العدسةُ الشَّيْئِيَّةُ، وَلَا يَدْخُلُ الشَّيْئِيَّةُ إِلَّا الضَّوُّ الْمُتَشَتُّ الَّذِي يُظْهِرُ الْجِسْمَ. وَسَيَتُّمُ شَرْحُ تَبَايِنِ الطَّوْرِ فِي الْفَصْلِ الثَّالِثِ - الْجُزْءِ الرَّابِعِ.



الشكل ١١: شَيئِيَّاتِ الميكروسكوب. من اليسار إلى اليمين: لا لونية ١٠×١٦ مم، المنغمر بالزيت: ٢ مم، ٨٠×، مفرطة اللونية: ٢ مم، وعدسة المجال المسوي.

وَالْفَتْحَةُ الْعَدَدِيَّةَ (N.A) هِيَ حَاصِلُ ضَرْبِ مُعَامِلِ انكِسَارِ الْوَسْطِ بَيْنَ الْعَيْنَةِ وَالشَّيْئَةِ فِي جَنْبِ نِصْفِ زَاوِيَةِ الْمَخْرُوطِ الضَّوئِيِّ الدَّاخِلِ إِلَى الشَّيْئَةِ - الشَّكْل ١٢ ، أَيْ $m = N.A$ جَا α . وَيُسَاوِي التَّكْبِيرُ الْمُفِيدُ لِلْمَيْكْرُوسَكُوبِ تَقْرِيباً $1000 \times$ الْفَتْحَةُ الْعَدَدِيَّةَ . وَمَعَ أَنَّهُ مِنَ الْمُمْكِنِ تَجَاوُزُ حَدِّ التَّكْبِيرِ الْمُفِيدِ بِاسْتِخْدَامِ عَيْنِيَّةٍ ذَاتِ قُوَّةٍ أَكْبَرَ أَوْ بِإِسْقَاطِ الصُّورَةِ عَلَى سِتَارَةٍ بَعِيدَةٍ ، إِلَّا أَنَّ ذَلِكَ لَا يَتَسَبَّبُ إِلَّا فِي تَكْوِينِ صُورَةٍ أَكْبَرَ ، وَلَيْسَ فِي الْكَشْفِ عَنْ تَفْصِيْلَاتٍ أُخْرَى ؛ وَلِذَا فَإِنَّ أَيْ تَكْبِيرٍ فَوْقَ التَّكْبِيرِ الْمُفِيدِ هُوَ تَكْبِيرٌ فَارِغٌ .



الشَّكْل ١٢ : نِصْفِ زَاوِيَةِ مَخْرُوطِ الضَّوءِ الدَّاخِلِ إِلَى شَيْئَةٍ مَيْكْرُوسَكُوبٍ : شَيْئَةٍ جَافَةٍ إِلَى الْيَسَارِ ، وَشَيْئَةٍ مَغْمُورَةٍ بِالزَّيْتِ إِلَى الْيَمِينِ .

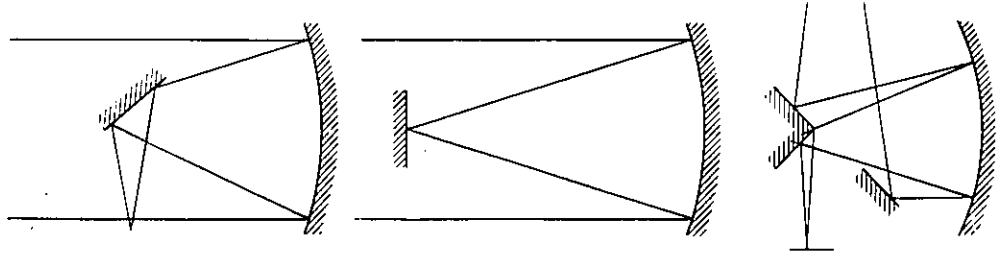
المنظومات العاكسة Reflecting Systems

تَقُومُ التَّلَسُّكُوبَاتُ الْعَاكِسَةُ وَالْمَيْكْرُوسَكُوبَاتُ عَلَى نَفْسِ الْمَبَادِيءِ . وَلِذَا تَنَاقَلَتْهُمَا مَعاً بِذَلِكَ تَنَاقُلَهُمَا عَلَى انْفِرَادٍ . وَالْمَنْظُومَاتُ الدِّيُوبْتَرِيَّةُ (مِنَ الْيُونَانِيَّةِ dia بِمَعْنَى عَبْرٍ) هِيَ مَجْمُوعَاتُ خَالِصَةٍ مِنَ الْعَدَسَاتِ . أَمَّا الْمَنْظُومَاتُ الْكَتُوبْتَرِيَّةُ catoptric (مِنَ الْيُونَانِيَّةِ kata بِمَعْنَى عَلَى) فَهِيَ مَجْمُوعَاتُ مِنَ الْمَرَايَا ، بِخِلَافِ الْمَنْظُومَاتِ الْكَتَدِيُوبْتَرِيَّةِ Catadioptric الَّتِي هِيَ مَجْمُوعَاتُ مِنَ الْمَرَايَا وَالْعَدَسَاتِ .

المنظومات الكتبتريّة

تُسْتَخْدَمُ الْمَنْظُومَاتُ الْعَاكِسَةُ بِكَثْرَةٍ فِي عِلْمِ الْفَلَكَ . فِيمِنْ نَاحِيَةٍ مَبْدِئِيَّةٍ يُمَازِلُ التَّلَسُّكُوبُ الْعَاكِسُ التَّلَسُّكُوبَ الْكَاسِرَ مَعَ فَارِقٍ وَحِيدٍ هُوَ أَنَّ الشَّيْئَةَ يُعْتَاضُ عَنْهَا بِمِرَاةٍ . فَفِي

تِلِسكُوبِ هِرشِل **Herschel** على سبيل المثال يَمِيلُ العموديُّ على المرآةِ عَنِ المحورِ البصريِّ، كما توضعُ العينيةُ بِجَانِبِ أَنبُوبِ الآلةِ. وَفِي تِلِسكُوبِ نِيوْتُن **Newton** يُعْكَسُ الضَّوُّ خَارِجَ الأنبوبِ بِوساطَةِ مرآةٍ مُستويةٍ إِضافيةٍ أَوْ مُشوِّبَةٍ - الشكل ١٣، الى اليسار). وَيَحْتَوِي عَاكِسُ عَيْنِ الْفِط **Cat's eye reflector** - الشكل ١٣ الى الوسط - على مرآةٍ قِطْعٍ مُكافئٍ أساسيٍّ وَمرآةٍ مُستويةٍ ثانويةٍ. أَمَّا المنظومةُ الكَتَبَتَرِيَّةُ المُستخدَمةُ في عِلْمِ الطيفِ المُجهَرِيِّ فقد يَكُونُ لَهَا مِرْآتَانِ مُستويتان مُسانِدَتان - الشكل ١٣، الرسم الى اليمين .



الشكل ١٣ : المنظومات الكَتَبَتَرِيَّةُ بِمِرايا مُستوية مُساندة .

المنظومات ذاتُ المِرْأتَيْنِ

تَوْجَدُ مِرْآتَانِ غَيْرُ مُستويتين على سبيلِ المثالِ في تِلِسكُوبِ جريجوري **Gregory** * الذي يتألَّفُ من مرآةٍ قِطْعٍ مُكافئٍ أساسيٍّ كَبِيرَةٍ لَهَا فَتْحَةٌ في اتِّجَاهِ المحورِ وَمرآةٍ مُقعرةٍ ثانويةٍ صَغِيرَةٍ تُثَبَّتُ أَمَامَهَا - الشكل ١٤ الى اليسار. وَتَوْضَعُ المِرْآتَانِ مُتَقَابِلَتَيْنِ وَمُتَبَاعِدَتَيْنِ بِمَسَافَةٍ تَزِيدُ قَلِيلًا على مجموع بُعْدَيْهِمَا البُؤْرَيْنِ. وَهَكَذَا فَالضَّوْرَةُ الوَاسِطَةُ المُتكوِّنةُ بِالمرآةِ الأساسيَّةِ تَقَعُ خَارِجَ البُعْدِ البُؤْرِيِّ لِلمرآةِ الثانويةِ. وَيُشَبِّهُ تِلِسكُوبُ كَسِيجَرِين **Cassegrain** ** تِلِسكُوبِ جريجوري، إِلَّا أَنَّ لَهُ مرآةً مُجَسِّمَ القِطْعِ الزائِدِ **hyperboloid** كَمَرَّةٍ ثانويةٍ. وَلِذَلِكَ فَائِدَةٌ، وَهِيَ أَنَّ تِلِسكُوبَ كَسِيجَرِين أَقْصَرُ من تِلِسكُوبِ جريجوري، كما أَنَّ الزَّوْغَانَ الكُرِّيَّ لِاحْدَى المِرْأتَيْنِ يَتَعَادَلُ بِالزَّوْغَانِ الكُرِّيَّ لِلمرآةِ الأُخْرَى. أَمَّا تِلِسكُوبُ

* جيمس جريجوري James Gregory : الرياضي الاسكتلندي، صمم منظومته عام ١٦٦٣ .

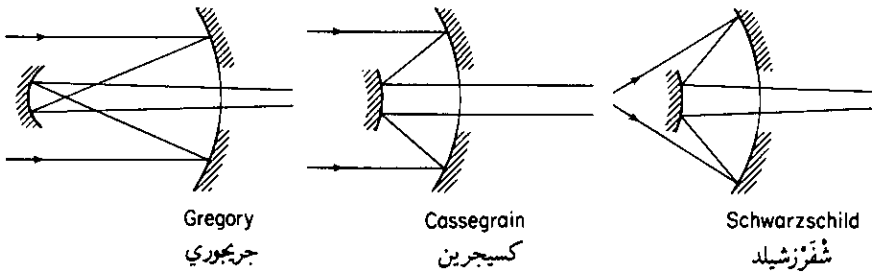
** غيولام كسيجرين Guillaume Cassegrain : الفنان والنحات في بلاط لويس الرابع عشر.

شفرزشيلد + Schwarzschild فيستخدم أساساً في علم المجهرات أو الميكروسكوبية. فإذا كانت ل هي المسافة بين المرأتين فإن :-

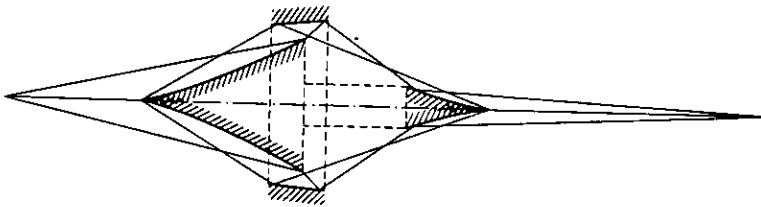
$$[1-9:1] \quad \dots \frac{L}{\text{نق}_1 \text{نق}_2} - \frac{2}{\text{نق}_2} + \frac{2}{\text{نق}_1} = \frac{1}{ع}$$

حيث نق₁، نق₂ هما نصف قطر تكور المرأتين. وباستخدام اصطلاح الإشارات المتبني تكون نق موجبة للمرآة المقعرة وسالبة للمرآة المحدبة.

ويمكن استخدام المنظومات الكثبترية حتى في تركيز الأشعة السينية †، وتحتوي بعض هذه المجموعات على متسلسلة من المرايا المخروطية المقعرة والمحدبة المصححة لرتب أعلى والمثبتة جميعاً على محور مشترك.



الشكل ١٤: من اليسار إلى اليمين: تلسكوب جريجوري، تلسكوب كسيجرين، وتلسكوب شفرزشيلد المجري.



الشكل ١٥: منظومة بثلاث مرايا ذات تماثل دوراني لتركيز الأشعة السينية [استنسخ من رايزنبرغ ١٩٦٣].

†K. Schwarzschild, "Theorie der Spiegelteleskope," *Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen* (Math.-physik. Classe) N.F. IV. 2 (1905). R. C. Mellors, "The Reflecting Microscope," *Science* 112 (1950), 381-89. D. S. Grey, "A New Series of Microscope Objectives: II. Preliminary Investigation of Catadioptric Schwarzschild Systems," *J. Opt. Soc. Am.* 39 (1949), 723-28.

†P. Kirkpatrick and H. H. Pattee, Jr., "X-Ray microscopy," in *Encyclopedia of Physics*, Vol. 30, ed. S. Flügge (Berlin: Springer-Verlag, Inc., 1957), 305-36. H. Riesenberger, "Über zentralabschattungsfree, rotationssymmetrische Spiegelsysteme mit besonderer Berücksichtigung ihrer Eignung als abbildende Optik für extrem weiche Röntgenstrahlen," *Jenaer Jahrbuch*, Vol. II (Jena, 1963), 250-328.

المنظومات الكتديوبترية أو منظومات العدسات - المرايا

ومن الأمثلة الممتازة على المنظومات الكتديوبترية عاكس كيلتر-شميت Kellner-Schmidt - الشكل ١٦. إنَّ السطح العاكس هنا كروي. ويوضع في مستوى مركز التكور حاجر بثقب لإزالة الاستجماتية والدُّوَابَات، كما توضع صفيحة مُصَحِّحة شبيهة كُرِّيَّة في المستوى نفسه لإزالة الزُّوْغَانِ الكُرِّيَّ عِنْدَ المَحْوَر. وَلَقَدْ تَصَوَّرَ كيلتر هذا العاكس في أول الأمر مثل مُسَدِّدِ الضوء Collimator*، واستخدمه شميت + بَعْدَ ذلك في تصميم كاميرا السَّرعَةِ العالية، حيثُ يوضع فيلمٌ صَغِيرٌ مُسْتَوٍ عِنْدَ البُورَةِ، أو يُمكنُ استخدامُ فيلمٍ أَكْبَرَ إذا كانَ مُقَوَّساً لِيوافِقَ السَّطحَ البُورِي الذي يَشْتَرِكُ معَ السَّطحَ الكُرِّيَّ العاكس في المَرْكَزِ.

وَأُحْدِثْتُ فِكْرَةَ الصَّفَائِحِ المُصَحِّحَةِ شِبْهَ الكُرْوِيَةِ لِكِلْتَرٍ وَشَمِيتُ ثَوْرَةً في تصميم المنظومات العاكِسة ذاتِ الفَتَحَاتِ الكُبْرَى والمَجَالِ المُتَمَدِّ والقَادِرَةِ على العَمَلِ ضَمَنَ مُحَدَّدَاتِ الخُيُودِ. أمَّا سَيِّئُهَا الرَّئِيسَةُ فَهِيَ صُعُوبَةُ صُنْعِ السُّطُوحِ شِبْهَ الكُرْوِيَةِ وَفَحْصِهَا، تِلْكَ الصُّعُوبَةُ الَّتِي تَعَلَّبَ عَلَيْهَا بُوُورَز Bouwers† باستخدامِ عَدَسَةٍ هَلَالِيَّةٍ مُتَّحِدَةِ المَرْكَزِ مَعَ مِرَاةٍ أُسَاسِيَةٍ. فَفِي أَنْظِمَةٍ مِنْ هَذَا النُّوعِ يُمكنُ تَصْمِيمُ العَدَسَةِ الهَلَالِيَّةِ لِتُعْطِيَ تَصْحِيحاً مُمْتَازاً لِلزُّوْغَانِ الكُرِّيِّ.

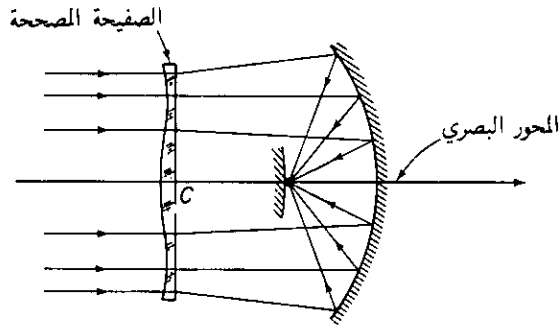
وَمِنْ الأشْكَالِ الأُخْرَى لِلْمُصَحِّحَاتِ الهَلَالِيَّةِ الَّتِي تُوفِّرُ تَصْحِيحاً أَفْضَلَ لِللُّونِ المَحْوَرِي مُصَحِّحَةُ مَكْسُوتوف Maksotov*. فَلِكُلِّ نِصْفِ قُطْرٍ تَكْوِرُ مُعَيَّنٍ لِلسَّطحِ الأَوَّلِ وَلِكُلِّ سُمْكٍ مُعْطًى، يُمكنُ اخْتِيَارُ نَقْوَسِ السَّطحِ الثَّانِي الَّذِي يُزِيلُ كَلِيَّةَ اللُّونِ المَحْوَرِيِّ. وَمِنْ ثَمَّ فَإِنَّ

* براءة الاختراع الأمريكية رقم ٩٦٩٧٨٥ المسجلة ١٩١٠.

+ بيرنهارد شميت (١٨٧٩-١٩٣٥): صانع الآلات والفلكي الأستوني المولد. كان له دكان بصريات صغيرة في مَثْوِيَّة قَرَبِ جِنَا، ثُمَّ انضَمَّ إِلَى مَرَصِدِ بِيَرْجُذْرُوف قَرَبِ هَامْبِرْجِ فِي المَانِيَا، وَصَمَّمِ المنظومة الَّتِي سُمِّيَتْ جَزْئياً بِاسْمِهِ عام ١٩٢٩.

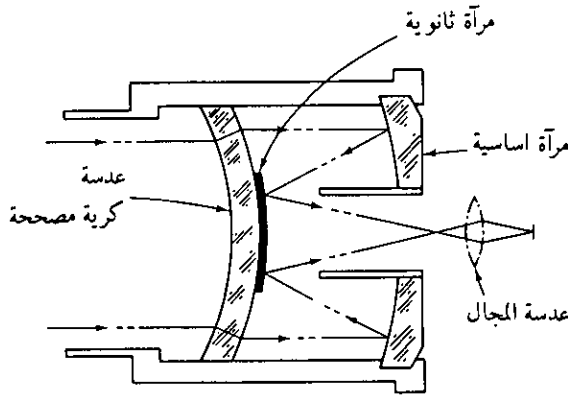
† اي بوورز: البراءة الهولندية رقم ٦٣٥٦٨٣ المسجلة عام ١٩٤١.

* D. D. Maksutov, "New Catadioptric Systems," *Compt. rend. Acad. Sci. USSR* (1942) 37-127; "New Catadioptric Meniscus Systems," *J. Opt. Soc. Am.* 34 (1944), 270-84. A. Bouwers. *Achievements in Optics* (New York: American Elsevier Publishing Co., Inc., 1950).



الشكل ١٦: منظومة كيلتر - شميت (Kellner-Schmidt)

السطحين لا يكونان مُتَجِدِّي المَرَكِز. كذلك يمكنُ تصحيحُ الزوغانِ الكُرِّيِّ والدَّوَابِيَّةِ وإنقاصُ الاستجماتيةِ عَبْرَ مَجَالٍ واسعٍ، كما يُمكنُ تصحيحُ تقوسِ المجالِ واللَّوْنِ العَرَضِيِّ بالقَدَسَةِ مُسَوِّيةِ المجالِ اللَّالُونِيَّةِ التي توضعُ قَرِيباً من مُسْتَوَى الصورة - الشكل ١٧.



الشكل ١٧: منظومة كسيجرين - مكستوف الكنديوتري

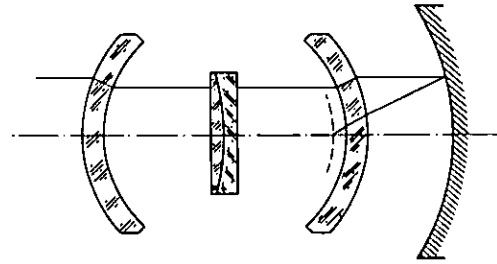
وَيُمْكِنُ أَنْ تَكُونَ المِرَاةُ الكُرِّيَّةُ الثَّانَوِيَّةُ مِنْ نَوْعِ جَرِيحُورِي أَوْ كَسِيَجَرِين ؛ وَهِيَ إِذَا أَنْ تَأْخُذَ شَكْلَ السَّطْحِ الْاَوَّلِ الْمُنْفَصِلِ مِنْ مِرَاةٍ، أَوْ يَوْضَعُ السَّطْحُ الْعَاكِسُ عَلَى مَرَكِزِ المَصْحَحَةِ الْهَلَالِيَّةِ. وَقَدْ تَكُونُ هَذِهِ المِرَاةُ الثَّانَوِيَّةُ مِنْ نَوْعِ السَّطْحِ الْأَمَامِيَّةِ أَوْ مِنْ نَوْعِ قَرَايَا مَنَجْنُ +Mangin. وَبِهَذِهِ الْكَيْفِيَّةِ، يُمكنُ عِنْدَ التَّصْمِيمِ تَجَنُّبُ الْاَطْرَافِ الْمَفْتُوحَةِ عَادَةً فِي التَّلَسُّكُوبَاتِ الْعَاكِسَةِ وَالتِّيَارَاتِ الْهَوَائِيَّةِ الدَّاخِلِيَّةِ. وَبَانْتِطَاقِ الْمُنَاطِقَةِ الْعَاكِسَةِ مَبَاشَرَةً عَلَى

+ مِرَاةُ مَانَجْن مِرَاةُ سَمِيكَةٍ كُرِّيَّةٍ يَحْدُثُ الْانْعِكَاسُ عَلَى سَطْحِهَا الْخَلْفِيِّ أَوِ الثَّانِي. وَيُمْكِنُ اخْتِيَارُ قَطْرِي التَّلَسُّكُوبِ حَيْثُ يُلْفَى الزَّوْغَانِ الْكُرِّيَّ الْحَاصِلُ مِنَ السَّطْحِ الثَّانِي بِالْانْكَسَارِ عَنِ السَّطْحِ الْاَوَّلِ.

الصفحة المصححة يُزال الحيوذ من القوائم العنكبوتية الحاملة أيضاً، وتُجعل بذلك الآلة قصيرة، قوية، وخفيفة الوزن.

وفي منظومة بيكر* Baker المتفوقة على منظومة شميت والتي تُسمى super schmidt، يُستخدم غُصُران هلاليان وصفحة شميت اللاتونية ذات السطوح الكرية للحصول على تصحيح مُتفوق خارج المِخْوَر - الشكل ١٨.

وعُموماً فالمنظومات الكتديوبترية مفيدة على الخصوص من ناحيتين متميزتين: الأولى أنها سريعة للغاية أي ذات فتحة كبيرة وأنها ذات أبعاد بُورية قصيرة؛ وهذه المنظومات تُفضل المصححات الهلالية. والثانية في التطبيقات الفلكية حيث يُتوقع أن يُحدَّ عمل الآلة بالحيود؛ وفي هذه الحالة يكون لاستخدام السطوح شبه الكرية ما يُبرِّره.



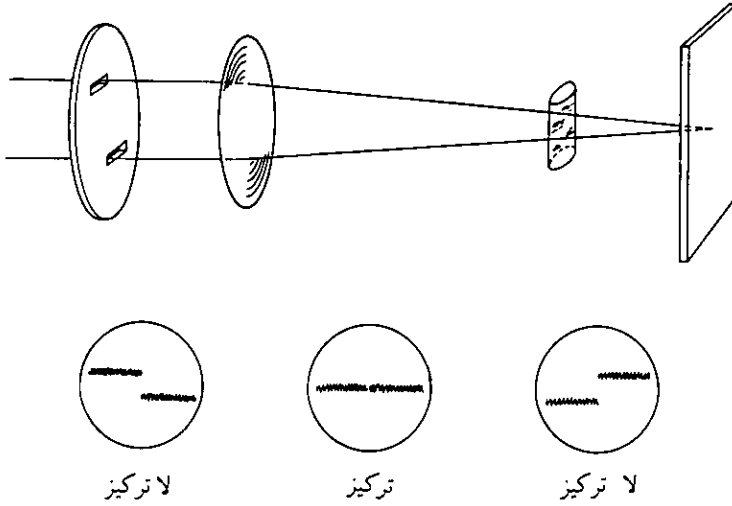
الشكل ١٨: المنظومة الكتديوبترية المتفوقة على منظومة شميت

آلات متفرقة

المسددة جهازٌ يحوّل الأشعة المتفرقة أو المتجمعة إلى أشعة مُتوازية. ويتألف أبسط أنواعها من عدسة مُجمعة موضوع في بُعدها البؤري ثُقْب صغير. وكما هو متوقع فالضوء الخارج من المسددة وحتى بغياب أي زوغان، لا يكون مُتوازياً تماماً، لأن الثُقْب له قطر محدود. وفي الأنواع الأخرى من المسدات، يُسقّط شق أو شعرات مُتعامدة أو أية أنماط أخرى في مالا نهاية. أما المسددة الذاتية فهي مُسددة تُصمَّم إلى تلسكوب بغرض تدقيق أن الشعرات المتعامدة هي حقاً في تركيز صحيح أي أن صورتها واضحة تماماً. ويمكن بناء

٥ ج. بيكر: براءة الاختراع الأمريكية رقم ٢,٤٥٨,١٣٢ المسجلة عام ١٩٤٥.

مُراقبات التركيز البصريّ **Optical focus monitors** بعدة طُرُق . وفي أحد أنواعها تُعملُ متسلسلةً من الشُّقوق المستطيلة الضيقة في أسطوانة ، بحيثُ تبدو في شكلٍ لَوَلَبٍ عِنْدَ النظر إليها في اتجاه عموديٍّ على المِخْوَرِ البصريّ . وَعِنْدَمَا تَدُورُ الأسطوانةُ يَمُرُّ الضوءُ الآتي من العدسة في الشُّقوق ، وَيَسْقُطُ على كاشِفٍ كهروضوئيٍّ داخلِ الأسطوانة مُخْدِثاً بذلك مُتسلسلةً من التَّبَضّات الكهربية . وَتَبَعاً لِيَكُونَ الجسمُ نُقْطَةً أو خَطّاً بَعِيداً عَنِ التركيزِ تكونُ الصورةُ على الأسطوانة غَيْرَ واضحةٍ نوعاً ما . وتأتي التَّبَضُّةُ القصيرةُ من الصورة الأَوْضَحُ ، وَيُمْكِنُ مُراقبتها باستخدام مُحلِّلةٍ عَرَضِ النبضة **Pulse-width analyzer** . ومن حَسَنَاتِ نَوْعِ آخَرَ منها أَنَّهُ لا يَحْوِي أَجزاءً متحركةً . فكما يَظْهَرُ تَخْطِيطاً في الشكل ١٩ تتألَّفُ المراقبةُ من ستارةٍ مُعْتَمَةٍ بِشَقَّيْنِ مَوْضوعَيْنِ في رُبْعَيْنِ مُتَقَابِلَيْنِ ، حيثُ تَوْضَعُ الستارةُ أَمَامَ الشَّيْءِ أو خَلْفَهَا بِمَسَافَةٍ مُعَيَّنَةٍ ، كما تُثَبَّتُ عدسةُ أسطوانيةٌ على مَسَافَةٍ معلومةٍ ثابتةٍ أَمَامَ المُستوى البُوريِّ للشَّيْءِ ، وَتَوَجَّهُ بحيثُ يُكَوَّنُ للجسمِ التَّقْطِعةُ صورتانِ خَطَّيتانِ . وَيَقَعُ هذانِ الخَطَّانِ بِحَيْثُ يَلْتَقِي طَرَفَاهُمَا لِيشْكَلا خَطّاً مُتَّصِلاً واحداً ، وذلك عندما تكونُ الصورةُ في حَالَةٍ «التركيز الصحيح» . أما إذا كانت الصورةُ في غَيْرِ حَالَةِ التركيز الصحيح ، فَإِنَّ نِصْفِي الخَطَّيْنِ سَيُزاحانِ وَيَظْهَرانِ مِثْلَ خَطِّ مُنْكَسِرٍ .



الشكل ١٩ : شكل تخطيطي لمراقبة التركيز من دون أجزاء متحركة (الى الأعلى)، وَاوضاع تركيز مختلفة لجسم نقطة بعيد كما يشاهد بها (الى الاسفل) .

اقتراحات لقراءات اضافية

- A. B. Meinel, "Astronomical Telescopes," in *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. V, ed. R. Kingslake (New York and London: Academic Press, Inc., 1969), Part II, 133-82.
- G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst, ed., *Telescopes* (Chicago: University of Chicago Press, 1960).
- A. G. Ingalls, *Amateur Telescope Making*, Vol. 1-3 (New York: Scientific American, Inc., 1955).
- V. E. Cosslett, *Modern Microscopy* (Ithaca: Cornell University Press, 1966).
- J. R. Benford and H. E. Rosenberger, "Microscopes," *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. IV, ed. R. Kingslake (New York and London: Academic Press, Inc., 1967), Part I, 31-93.
- C. Dobell, *Antony van Leeuwenhoek and his "Little Animals"* (New York: Dover Publications, Inc., 1960).
- L. M. Biberman, *Reticles in Electro-Optical Devices* (Oxford: Pergamon Press Ltd., 1966).

المسائل

- ١-٩:١ تِلِسْكُوبٌ فَلَكيٌّ يَتَأَلَّفُ مِنْ عَدَسَتَيْنِ مُتَبَاعِدَتَيْنِ مَسَافَةً ١ م. فَإِذَا كَانَ التَّكْبِيرُ الزَّاوِيُّ عِنْدَ التَّرْكِيزِ عَلَى مَا لَا نِهَآيَةَ يُسَاوِي ٥×، فَجِدْ قُوَّةَ الْكَسْرِ لِكُلِّ مِنَ الْعَدَسَتَيْنِ.
- ٢-٩:١ وُجَّهَ تِلِسْكُوبٌ تَكْبِيرُهُ الزَّاوِيُّ ١٠× صَوَّبَ الشَّمْسَ، وَهُيَّءْ لِيُعْطِيَ صُورَةً وَاضِحَةً فِي مَا لَا نِهَآيَةَ. فَإِذَا كَانَ الْبُعْدُ الْبُورِيُّ لِلشَّيْءِ ٦٠ سم، فَجِدْ الْمَسَافَةَ وَالْآتَجَاةَ اللَّذَيْنِ يَنْبَغِي أَنْ تُحَرَّكَ فِيهِمَا الْعَيْنِيَّةُ لِيُعْطِيَ صُورَةً وَاضِحَةً لِلشَّمْسِ عَلَى سِتَارَةٍ تَبْعُدُ ٣٠ سم مِنْهَا.
- ٣-٩:١ تِلِسْكُوبٌ فَلَكيٌّ يَتَأَلَّفُ مِنْ شَيْئَةٍ بَعْدُهَا الْبُورِيُّ + ٤٠ سم وَعَيْنِيَّةٍ بَعْدُهَا الْبُورِيُّ ٢,٥٠ سم، هُيَّءْ لِيُعْطِيَ صُورَةً وَاضِحَةً عَلَى مِقْيَاسٍ يَبْعُدُ ٣ م لِمُغْرَضِ الْمَشَاهِدَةِ الْبَصَرِيَّةِ عَلَى مَسَافَةِ الرُّؤْيَةِ الْأَكْثَرِ وَضُوحاً. (أ) جِدْ طَوْلَ التِّلِسْكُوبِ أَيِ الْمَسَافَةِ بَيْنَ الْعَدَسَتَيْنِ. (ب) جِدْ التَّكْبِيرَ الْغَرَضِيَّ الْخَطِّيَّ الْكُلِّيَّ.

- ٤-٩:١ جد التكبير الزاوي الحاصل بتلسكوب: البُعدان البُورِيَّان لِشَيْئَةٍ وَعَيْنِيَّةِ
 ٣٠ سم و ٥ سم على التوالي: (أ) عِنْدَ النَّظَرِ إِلَى جِسْمٍ بَعِيدٍ جِداً. (ب) عِنْدَ
 التَّركِيزِ عَلَى جِسْمٍ يَتَعَدُّ ٨ م.
- ٥-٩:١ أَلْبَعْدُ البُورِيُّ لِشَيْئَةٍ تَلْسُكُوبُ فَلَكَتِي ٤٠ سم وَالْبَعْدُ البُورِيُّ لَهَا $\frac{٤}{٥}$. فَإِذَا
 كَانَ قُطْرُ بُؤْيُ الْخُرُوجِ لِلْأَشْعَةِ الْمُتَوَازِيَةِ ٢ سم فَجِدْ:
- (أ) التَّكْبِيرُ الزَاوِيُّ لِلتَّلْسُكُوبِ (ب) الْبَعْدُ البُورِيُّ لِلْعَيْنِيَّةِ.
- ٦-٩:١ قُطْرُ شَيْئَةٍ تَلْسُكُوبُ ٥٠ مم، وَبُعْدُهَا البُورِيُّ ٤٠ سم؛ جِدْ قُطْرُ بُؤْيُ الْخُرُوجِ
 وَالْبَعْدُ البُورِيُّ لِعَيْنِيَّةِ، إِذَا كَانَ التَّكْبِيرُ الزَاوِيُّ ٨ ×.
- ٧-٩:١ الْمَسَافَةُ بَيْنَ الشَّيْئَةِ وَالْعَيْنِيَّةِ فِي تَلْسُكُوبٍ أَرْضِيٍّ ١٢ سم، جِدْ بُعْدَيْهِمَا البُورِيَّيْنِ
 إِذَا كَانَ التَّكْبِيرُ الزَاوِيُّ لِلتَّلْسُكُوبِ ٤ ×.
- ٨-٩:١ مِثْطَارُ أَوْ بَرَا: الْبَعْدُ البُورِيُّ لِعَدَسَتِهِ الشَّيْئِيَّةِ ٦ سم وَتَكْبِيرُهُ ٣ ×:
- (أ) مَا الْبَعْدُ البُورِيُّ لِعَيْنِيَّةِ.
- (ب) مَا الْمَسَافَةُ بَيْنَ الشَّيْئَةِ وَالْعَيْنِيَّةِ عِنْدَ تَرْكِيزِهِ عَلَى مَا لَا نِهَآيَةَ.
- ٩-٩:١ تَلْسُكُوبُ تَكْبِيرُهُ الزَاوِيُّ ٣ ×، وَالْبَعْدُ البُورِيُّ لِشَيْئَةٍ ٥٠ سم. جِدْ قُوَّةَ الْكَسْرِ
 لِلْعَيْنِيَّةِ، وَجِدِ الْمَسَافَةَ بَيْنَ الْعَدَسَتَيْنِ إِذَا كَانَ التَّلْسُكُوبُ (أ) فَلَكَتِيَّاً (ب) مِنْ
 نَوْعِ جَالِيلُو.
- ١٠-٩:١ إِذَا أُعْطِيَ مِيكْرُوسُكُوبُ لِيَفْهَوْكَ فِي الشَّكْلِ ٧ مِنْ هَذَا الْفَصْلِ تَكْبِيرًا زَاوِيًّا
 مِقْدَارُهُ ١٢٥ ×؛ فَجِدِ الْبَعْدُ البُورِيُّ لِلْعَدَسَةِ مَفْتَرَضًا أَنَّ النَّاطِرَ لَهُ مَدَى بَصَرٍ
 عَادِيٍّ.
- ١١-٩:١ مِيكْرُوسُكُوبُ مَرْكَبٌ: الْبَعْدُ البُورِيُّ لِشَيْئَةٍ ٣ مم، وَتَكُونُ شَيْئَتُهُ صُورَةً
 وَسِيطَةً عَلَى بُعْدِ ١٦٠ مم يَخْلُفُ مُسْتَوَاهَا البُورِيُّ الثَّانِي. فَإِذَا كَانَ تَكْبِيرُ
 الْعَيْنِيَّةِ بِمُفْرَدِهَا ٢٠ ×، فَجِدِ التَّكْبِيرَ الْكُلِّيَّ الَّذِي يُعْطِيهِ الْمِيكْرُوسُكُوبُ.
- ١٢-٩:١ الْبُعدَانِ البُورِيَّانِ لِشَيْئَةٍ وَعَيْنِيَّةٍ مِيكْرُوسُكُوبٍ مَرْكَبٍ هُمَا عَلَى التَّوَالِي ٤ مم،
 ١٥ مم. وَضَعِ جِسْمٌ عَلَى ١,٤ مم مِنَ الشَّيْئَةِ، وَشَوَّهَدْتَ الصُّورَةَ عَلَى مَسَافَةِ
 الرُّؤْيَا الْأَوْضَحِ. جِدِ التَّكْبِيرَ الْخَطِّيَّ لِلْمِيكْرُوسُكُوبِ.

١٣-٩:١ ميكروسكوب طول أنبويه البصري ١٥ سم أي المسافة بين المستوى البؤري الخلفي وموقع الصورة الوسيطة، والبعد البؤري لشيئته ٢٠ مم، والتكبير الزاوي للعينية ١٢,٥ ×. جد التكبير الكلي الذي يُمكن الحصول عليه. وإذا كانت الفتحة العددية تساوي ١,٠، فهل التكبير الحاصل ضمن الحد المقبول؟

١٤-٩:١ جُهِزَ ميكروسكوب بثلاث شبيات أبعادها البؤرية على الترتيب ١٦ مم، ٤ مم، ١,٦ مم، وتكون كل شبيّة صورة وسيطة على بُعد ١٦٠ مم خلف مستواها البؤري الخلفي، وتوجد له مجموعتان من العينات تكبيرهما ٥ ×، ١٠ ×؛ جد:-

(أ) أعلى و (ب) أصغر تكبير خطي يُمكن الحصول عليه بهذا الميكروسكوب آخذاً بعين الاعتبار مُشاهدة الصورة على مدى الرؤية الأوضح.

١٥-٩:١ عينية مؤلفة من عدستين رقيقتين: البعد البؤري لكل منهما ٢٠ مم، والمسافة بينهما ١٦ مم. جد: (أ) البعد البؤري المكافئ للعينية (ب) المسافة بين المستوى البؤري وأقرب عدسة (ح) التكبير الزاوي الحاصل.

١٦-٩:١ مرآتان مُقعّرتان: البعد البؤري لكل منهما ٢٠ سم. وُضِعَتَا مُتَقَابِلَتَيْنِ بحيث كانت المسافة بين قطبتيهما ٨٠ سم، ثم وُضِعَ جسم ارتفاعه ١ سم بين المرأتين وعلى بُعد ١٠ سم من إحداهما. جد موقع الصورة وارتفاعها.

١٧-٩:١ مُسدّدة بسيطة تتألف من ثقب قطره ٠,١٥ مم وعدسة مُسدّدة بُعدها البؤري ٥٠ سم. من وجهة بصرية هندسية، جد أكبر زاوية بين الأشعة في الضوء الخارج من العدسة؟

١٨-٩:١ مُعامل انكسار بلورة ما للأشعة السينية اللينة التي طولها الموجي ٥ أنجستروم يساوي ١-١,١ × ١٠^{-٣}. جد الزاوية التي تسقط بها الأشعة على سطح البلورة بحيث تنعكس كليّة. لاحظ أن زاويا السقوط في تكنولوجيا الأشعة السينية تُقاس بالنسبة إلى السطح وليس إلى العمود المُقام على السطح من نقطة السقوط كما في البصريات الاعتيادية.

الجزء الثاني

أبصريّات الموجية

Wave Optics

نَسْتَتَبَّعُ من البصريّات الهندسيّة أنّ حدود الظلّ تكون دقيقةً وواضحةً. وتُظهِرُ التجربة أنّ الأمر ليس كذلك. وفي الحقيقة تكون حدود الظلّ غيرَ مُحدَّدةٍ، وتتألف من أهداب fringes. ويُمكنُ تفسيرُ ذلك بافتراضٍ أنّ الضوءَ مُؤلَّفٌ من أمواجٍ.

وتَسْلُكُ هذه الأمواجُ مِنْ بَعْضِ الأوجِه مِثْلَ الأمواج الأخرى. فهي تَنَحْنِي حَوْلَ الحواجزِ، وتَنَجِدُ مَعَ مِثْلَيْهَا من الأمواجِ، فَيَدْعَمُ أَوْ يُضْعِفُ كُلُّ مِنْهَا الآخر. وهي تَمُرُّ عِبرَ الثُقُوبِ، الشقوقِ، والأفلام الرقيقة بِكَيْفِيّاتٍ مُمَيَّزَةٍ لَا يُمكنُ التنبؤُ بِهَا من البصريّات الهندسيّة. وتلزمُ الأمواجُ لِتفسيرِ عَمَلِ فِتَّةِ هَامَتِ من الآلاتِ التي تُعرَفُ بِمَقاييسِ التداخلِ interferometers. وَسَتَبْحَثُ هذه الموضوعاتُ في الفصولِ التالية التي جُمِعَتْ تحت اسمِ البَصَرِيّاتِ المَوْجِيّةِ.

الفصل ٢ : ١

الحركة الموجية التوافقية

Harmonic wave Motion

على الرغم من أن المائلات الميكانيكية analogs ذات فائدة محدودة، فإن أمواج الضوء تُشبه غالباً بالأمواج التي يُمكن إحداثها في حبل. ولكن لاحظ أن نقطة ما على الحبل لا تتحرك إلا إلى أعلى وإلى أسفل، وأنها لا تتحرك إلى الأمام.

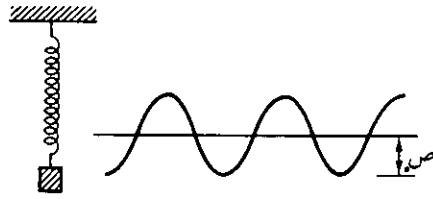
أما ما يتحرك إلى الأمام فهو التكوين الموجي Wave configuration ، وليس أجزاء الحبل. وتقدير التكوينات الموجية على الحركة المستمرة في بُعد أو بُعدين أو ثلاثة أبعاد. وفي الحبل تنتشر الأمواج في اتجاه أي بعد واحد. فالحجر الذي يُلقى في بركة يتسبب في أحداث موجات في سطحها تتسع في شكل حلقات مستوية ومتحدة المركز، أما الصوت والضوء فينتشران في الأبعاد الثلاثة.

الاهتزازات الميكانيكية Mechanical Oscillations

افترض أن لديك كتلة ك مربوطة بطرف زنبرك ، وأن الزنبرك والكتلة في حال اتزان . فعند إيقاع قوة ق ليمط الزنبرك تُزاح الكتلة مسافة (-ص) . وطالما أن الزنبرك لم يمتد فوق حد المرونة ، فإن الإزاحة تتناسب مع القوة المُحدثة لها .

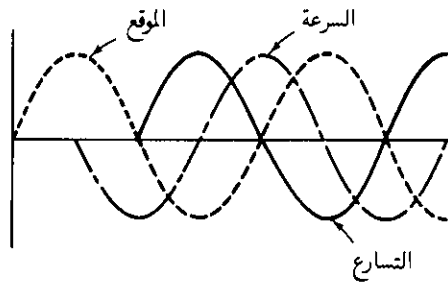
ق = -أص [١:٢-١]

وهذه المعادلة هي قانون هوك . إن الرمز ثابت يُمثل قساوة الزنبرك stiffness . وعند ترك الزنبرك حراً تهتز الكتلة إلى الأعلى وإلى الأسفل كما في الشكل ١ ، وتتغير سرعته الكتلة باستمرار.



الشكل ١: كتلة تهتز الى الاعلى والى الاسفل .

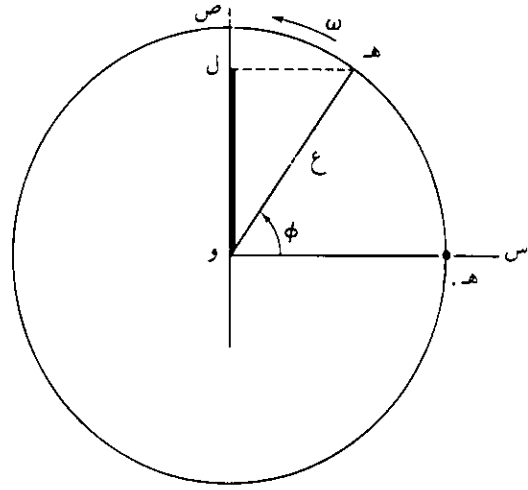
فَعِنْدَ مُرُورِ الكِتْلَةِ بِخَطِّ الوَسْطِ أَوْ بِمَوْقِعِ الاتزان ، فَإِنَّ سُرْعَتَهَا تَصِلُ أَقْصَى مَقْدَارٍ لَهَا ، أَمَّا فِي مَوْقِعِهَا فِي الذَّرْوَةِ أَوْ الحَضِيضِ فَإِنَّ سُرْعَتَهَا تَكُونُ صِفْراً . وَمِنْ جِهَةٍ أُخْرَى فَإِنَّ تَسَارُعَهَا يُسَاوِي صِفْراً عِنْدَ مُرُورِهَا بِمَوْقِعِ النِّقْطَةِ الوَسْطِيَّةِ أَيْ مَوْقِعِ الاتزان . وَلِذَلِكَ يُمَكِّنُ تَمَثُّلُ المَوْقِعِ ، السَّرْعَةِ ، وَالتَّسَارُعِ بِمُنْحَنِيَّاتِ الجَيْبِ أَوْ جَيْبِ التَّمَامِ المَزَاحَةِ ٩٠° مِنْ بَعْضِهَا بَعْضاً . وَ يُبَيِّنُ الشَّكْلُ ٢ مَقْدَارَ تَقَدُّمِ مُنْحَنِ التَّسَارُعِ عَنْ مُنْحَنِ السَّرْعَةِ .



الشكل ٢: الموضع ، السرعة ، والتسارع لكتلة مهتزة بدلالة الزمن .

دائرة المرجع The Reference Circle

تَخَيَّلْ نَقْطَةً تَتَحَرَّكُ عَلَى خَطِّ رَأْسِيٍّ إِلَى الْأَعْلَى وَإِلَى الْأَسْفَلِ . فَمِثْلُ هَذِهِ الْحَرَكَةِ الْعُلُويَّةِ - السُّفْلِيَّةِ يُمَكِّنُ اعْتِبَارَهَا الْإِسْقَاطَ الظَّلِّيَّ لِنَقْطَةٍ تَتَحَرَّكُ فِي دَائِرَةٍ وَاقِعَةٍ فِي مُسْتَوَى الدُّوْرَانِ ، عِنْدَ النَّظَرِ إِلَيْهَا مِنْ الْجَانِبِ تَمَاماً ، وَتُسَمَّى هَذِهِ الدَّائِرَةُ دَائِرَةُ المَرْجِعِ . اَعْتَبِرْ أَنَّ النِّقْطَةَ هـ . فِي الشَّكْلِ ٣ تَتَحَرَّكُ فِي مَسَارٍ دَائِرِيٍّ بِسُرْعَةٍ زَاوِيَّةٍ مُنْتَظِمَةٍ . قَبْلَ فِتْرَةٍ زَمْنِيَّةٍ تَصِلُ النِّقْطَةُ هـ . إِلَى مَوْضِعِ النِّقْطَةِ هـ ، وَيُعْطَى إِسْقَاطُ هـ عَلَى المَحْوَرِ الصَّادِيِّ النِّقْطَةَ ل . وَهَكَذَا فَعِنْدَمَا تَدْوُرُ النِّقْطَةُ هـ فِي دَائِرَةِ المَرْجِعِ ، تَتَحَرَّكُ النِّقْطَةُ ل إِلَى الْأَعْلَى وَإِلَى الْأَسْفَلِ عَلَى



الشكل ٣ : دائرة المرجع

المِخْوَرِ الصَّادِيَّ. وَ يُمَكِّنُ الإِشَارَةَ إِلَى نِصْفِ قُطْرِ دَائِرَةِ المَرْجِعِ بِالرَّمْزِ مِنَ السَّعَةِ، وَ يَكُونُ عُلُوُّ النُّقْطَةِ ل عَنْ نُقْطَةِ الأَصْلِ (و) كَمَا يَلِي :-

[٢-١:٢]

$$ص = ع \text{ جا } \phi \dots\dots$$

وَتُعْطَى السَّرْعَةُ الزَّاوِيَةُ لِلنُّقْطَةِ هـ بـ:

[٣-١:٢]

$$\omega = \frac{\phi}{ز} \dots\dots$$

حَيْثُ ز هُوَ الزَّمَنُ.

وَمِنْ المَعَادِلَتَيْنِ [٢-١:٢] وَ [٣-١:٢] نَحْصُلُ عَلَى:

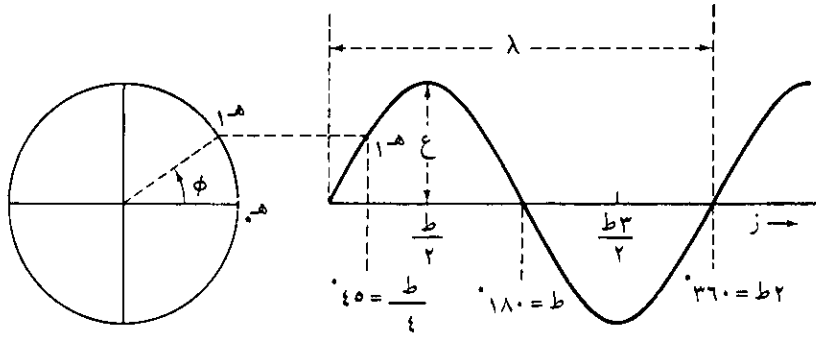
[٤-١:٢]

.....

$$ص = ع \text{ جا } (\omega ز)$$

وَهِيَ مَعَادَلَةُ حَرَكَةِ النُّقْطَةِ ل عَلَى المِخْوَرِ الصَّادِيَّ بِدَلَالَةِ الزَّمَنِ. وَهَذِهِ الحَرَكَةُ هِيَ مِثَالٌ عَلَى الحَرَكَةِ التَّوَافِقِيَّةِ البَّسِيطَةِ، الَّتِي هِيَ حَالَةٌ خَاصَّةٌ مِنَ الحَرَكَةِ الدَّوْرِيَّةِ. وَتُعْرَفُ الحَرَكَةُ الدَّوْرِيَّةُ بِحَرَكَةِ نُقْطَةٍ أَوْ دَقِيقَةٍ مَادِّيَّةٍ فِي المَسَارِ نَفْسِهِ مِرَاراً وَتَكَرَّراً، أَمَّا الحَرَكَةُ التَّوَافِقِيَّةُ البَّسِيطَةُ فَهِيَ حَرَكَةُ نُقْطَةٍ تَتَغَيَّرُ مَعَ الزَّمَنِ مِثْلَ دَالَّةِ الجَيْبِ.

نَرَسُمُ الآنَ عَلَى المَحْوَرِ السَّيْنِيِّ، كَمَا يَتِمُّ عَادَةً، قِيَمَ المَتَغَيِّرِ المُسْتَقِلِّ (الزَّمَنِ)، وَعَلَى المَحْوَرِ الصَّادِيَّ قِيَمَ المَتَغَيِّرِ التَّابِعِ أَيْ الإِزَاحَةَ ص - الشَّكْل ٤. إِنَّ النُّقْطَةَ هـ فِي دَائِرَةِ



الشكل ٤ : الحركة التوافقية البسيطة .

المرجع تَبْدَأُ حَرَكَتَهَا من الموقع الابتدائي هـ . حيث $ز = \text{صفر}$ ، $ص = \text{صفر}$ ، ثُمَّ تتحركُ بزواوية $\emptyset = ٩٠^\circ$ فتَصِلُ الموقع هـ . وَيُحَدِّدُ مَوْقِعَ النِّقْطَةِ هـ١ على مُنْحَنِي الجيبِ بإِخْدَائَيْنِ : المسافة ص والبُعْدُ الزاوي للنقطة هـ من هـ . الذي رُسِمَ على المِخْوَرِ السَّيْنِي . ولأنَّ مُحِيطَ دائرة الوَحْدَةِ يُنَاطِرُ زاوية ط ٢ بالتقديرِ الدائريِّ ، فَإِنَّ مَوْقِعَ النِّقْطَةِ هـ١ يُسَاوِي $\frac{\text{ط}}{٤}$ زاوية نصف قطرية . وَبَعْدَ فِتْرَةٍ زمنيةٍ مُسَاوِيَةٍ تتحركُ النِّقْطَةُ هـ الى الوُضْعِ $\emptyset = ٩٠^\circ$ أي ما يُسَاوِي $\frac{\text{ط}}{٢}$ زاوية نصف قطرية ، وهذا الوُضْعُ هو النِّقْطَةُ التي تَبْلُغُ عندها ص نهايتها العُظْمَى . وَبَعْدَ أَنْ تَدَوَّرَ النِّقْطَةُ هـ زاوية $\emptyset = ١٨٠^\circ$ ط زاوية نصف قطرية ، تَصِلُ إلى مَوْقِعِ فيه ص = ٠ ؛ وعند $\emptyset = ٢٧٠^\circ = \frac{٣\text{ط}}{٢}$ زاوية نصف قطرية تَصِلُ النِّقْطَةُ هـ إلى نهايتها الصغرى ، وهكذا دواليك . وَبِوَضْعِ تلكِ النِّقَاطِ نَحْصِلُ على المُنْحَنِ الجيبيِّ الاعتياديِّ الذي يَظْهَرُ في الشكل ٤ .

تَعْرِيفَات

أَلْسَعَةُ amplitude هي ارتفاعُ الموجةِ عن الوُضْعِ الوسط . وتردُّدُ السَّعَةِ من + ع الى - ع ، وتَأْخُذُ أَيَّةَ قِيَمَةٍ بَيْنَهُمَا - الشكل ٥ :

شِدَّةُ الموجةِ ش intensity هي كميَّةُ الطاقةِ التي تَنَدَقُّ في الثانية الواحدةِ عِبْرَ وَحْدَةٍ المسَاحَةِ المُقَامَةِ عموديةً على اتِّجَاهِ الدَّفْقِ . وَهِيَ تَنَاسَبُ مَعَ مُرَبَّعِ السَّعَةِ أي ش $\propto ع^٢$ ، وَمَعَ مُرَبَّعِ التَّوَاتُرِ .

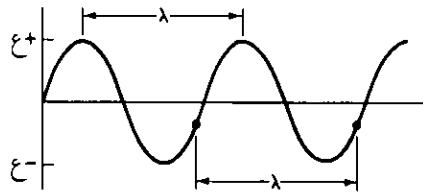
الطول الموجي λ Wavelength هو قياس للطول، ومن ثم فهو يُقاس بنفس الوحدات التي يُقاس بها الطول. ويُعرّف الطول الموجي الواحد بأنه مسافة دورة كاملة تُكرّر الموجة بعدها نفسها. فعلى سبيل المثال الطول الموجي هو المسافة بين قِمَتَيْن مُتتاليتين أو المسافة بين نُقْطَةٍ على موجة واحدة ونُقْطَةٍ أُخْرَى مكافئة أو مناظرة على الموجة التي تليها.

والوَحدة الأساسية في نظام الوحدات العالمي الذي يُرمز له بـ SI هي المتر (م). ولَمَّا كَانَ الطول الموجي للضوء قصيراً إلى درجة فائقة لَزِمَ استخدام وحدات كسرية من المتر، وهذه الوحدات هي:

$$1 \text{ مم} = 10^{-3} \text{ م}$$

أما الوَحدة الكسرية المنطقية فهي الميكرومتر $= 10^{-6} \text{ م}$ ؛ ولِسوء الحظ فهذه الوَحدة مُستولى عليها، إذ تُستخدَم لوصف آلة أيضاً.

١ نانومتر $= 10^{-9} \text{ م}$. وهي الوَحدة المفضلة للطول الموجي التي أوصيَ باستخدامها للجزء المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي، إذ يمتدّ مدى الجزء المرئي من ٣٨٠ نانومتر (البنفسجي-الازرق) إلى ٧٥٠ نانومتر (الاحمر الغامق).



الشكل ٥: السعة والطول الموجي.

١ أنجستروم «أ»: ويساوي تقريباً 10^{-10} م .

زمن الدورة Period وهو قياس للزمن، وهو الزمن الذي تأخذه نقطة ما في التكوين الموجي لتصل إلى النقطة التالية المكافئة لها. وبصورة مُماثلة، زمن الدورة هو

* سميت باسم أندرز جِتر أنجستروم Anders Jens Angström (١٨١٤-١٨٧٤): استاذ الفيزياء في أُبْسالا، السويد.

الفترة الزمنية التي تأخذها نقطة لتُكمل دورة كاملة على الدائرة المرجعية. إنَّ مُحيط دائرة الوحدة = 2π زاوية نصف قطرية أو 360° ، ولذا فإنَّ زمن دورة واحدة (د) يكون قد انقضى عندما يزيد حاصل ضرب السرعة الزاوية ω في الزمن زمن الصفر إلى 2π ، أي :-

$$\omega = 2\pi$$

[٥-١:٢]

$$\dots\dots \frac{2\pi}{\omega} = d$$

التواتر frequency ν ويُعرَّف بعدد الدورات أو الاهتزازات الحاصلة في ثانية واحدة. فمثلاً إذا أتمَّ جسم مهتز اهتزازة كاملة واحدة أي جيته وذهاباً في ثانية واحدة، فإنَّ زمن دورته د هو $d = 1$ ثانية، ويكون تواتره ν مساوياً ١ اهتزازة/الثانية. وإذا أتمَّ (١٠) اهتزازات في الثانية فإنَّ $d = \frac{1}{10}$ ثانية، و $\nu = 10$ اهتزازة/ثانية. وهكذا فكل من د و ν هو مقلوب الآخر:

[٦-١:٢]

$$\dots\dots \frac{1}{d} = \nu$$

ولأية حركة موجية يساوي التواتر نسبة السرعة أو السرعة الطورية Phase velocity في وسط ما إلى الطول الموجي في الوسط نفسه :-

[٧-١:٢]

$$\dots\dots \frac{v_{\text{الفراغ}}}{v_{\text{الهواء}}} = \frac{v_{\text{الهواء}}}{v_{\text{الهواء}}} = 1$$

حيث رهي السرعة. وتُعرَّف وحدة التواتر هيرتز (هن).

العدد الموجي الخطي linear wave number σ : وهو عدد الأمواج في وحدة الطول، ويُعرَّف بمقلوب الطول الموجي :-

+ نسبة إلى هنريخ رودلف هرترز Heinrich Rudolf Hertz : الفيزيائي الألماني .

[٨-١:٢]

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \dots\dots$$

أما وَخَدَتْهُ فَهِيَ الكَيْسَر Kayser ك المكافئة ل ١ سم^{-١}. وهكذا فَلِلضَّوِّ الذي عَدَدُه الموجي $\sigma = ٢٥,٠٠٠$ سم^{-١} تكون $\lambda = ٤ \times ١٠^{-٧}$ م $= ٤٠٠$ نـم.

العدد الموجي الدائري K circular wave number وَيُعرَّف بِ:-

[٩-١:٢]

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \dots\dots$$

السرعة ر التي تَتَحَرَّكُ بها مَوْجَةٌ هي المسافة المَقْطُوعَةُ في وَخْدَةِ الزمن :-

[١٠-١:٢]

$$r = \frac{f}{z} \dots\dots$$

وَلَمَّا كَانَ التَّوَاتُرُ هو عَدَدُ الاهتزازات في الثانية، فإن الموجة تَقْطَعُ خِلالَ ثانيةٍ واحدةٍ مسافةً λ ، وَتَقْطَعُ خِلالَ ز ثانيةٍ مسافةً ف :-

$$f = \lambda z$$

وَلِذَا فَإِنَّ :-

[١١-١:٢]

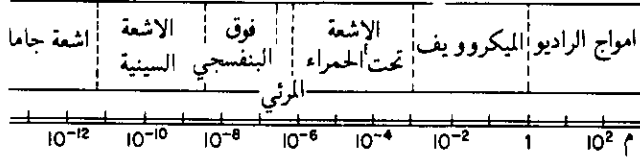
$$\dots\dots \boxed{r = \lambda \nu}$$

وهي علاقة هَامَّةٌ تَصِيحُ لِأَيَّةِ موجةٍ.

الطيف الكهرومغناطيسي

تَمْتَدُّ الأطوال الموجية للضوء المرئي من حَوَالِي ٣٨٠ نـم للأزرق - البنفسجي إلى حَوَالِي ٧٥٠ نـم للأحمر الغامق. وَتَخْتَلِفُ حُدُودُ الرؤية باختلاف المُلَاحِظِينَ وَبِعُمُرِ المُلَاحِظِ. وَتَحْتَ الطول الموجي ٣٨٠ نـم يوجَدُ الضوء فوق البنفسجي بَيْنَمَا توجَدُ فَوْقَ ٧٥٠ نـم الأشعة تحت الحمراء - الشكل ٦.

الامواج الكهرومغناطيسية



الشكل ٦: الطيف الكهرومغناطيسي

وَلْيَقْصِرِ الْأَشْعَةُ السَّيْنِيَّةُ أَطْوَالَ موجةٍ تَصِلُ فِي قِصَرِهَا إِلَى 10^{-12} م. أما أطوالُ الْأَشْعَةِ السَّيْنِيَّةِ التي تُعْرَفُ بِالْأَشْعَةِ السَّيْنِيَّةِ اللَّيْنَةِ فتَصِلُ إِلَى ٥٠ سم. وَتَمْتَدُّ الْأَشْعَةُ فَوْقَ الْبَنْفَسْجِيَّةِ مِنْ حَوَالِي ٤ م إِلَى الْحَدِّ الْأَذْنَى لِلضَّوْءِ الْمَرْتَبِيِّ أَيْ حَدِّ الرُّؤْيَةِ ٣٨٠ سم. وَتَحْتَ ١٨٠ سم تُمْتَصُّ الْأَشْعَةُ فَوْقَ الْبَنْفَسْجِيَّةِ بِالْهَوَاءِ، وَمِنْ ثَمَّ فَإِنَّ هَذَا الْحَزَامَ لَا يُمَكِّنُ اسْتِقْصَاؤَهُ إِلَّا فِي الْخَلَاءِ التَّامِ. وَيُمْكِنُ تَقْسِيمُ الْأَشْعَةِ فَوْقَ الْبَنْفَسْجِيَّةِ فِي الْخَلَاءِ إِلَى ثَلَاثَةِ أَجْزَاءٍ مُسَمَّاةٍ بِأَسْمَاءِ بَاحْثِيهَا الْأَوَائِلِ: مَدَى مِيلِيكَان Milikan ويمتدُّ مِنْ ٤ ... ٦٠ سم، مَدَى لِيْمَان Lyman ويمتدُّ مِنْ ٦٠ ... ١٢٠ سم، وَمَدَى شومان schumann مِنْ ١٢٠ ... ١٨٠ سم. إِنَّ الْحَدِّ الْأَعْلَى لِلرُّؤْيَةِ هُوَ حَوَالِي ٧٥٠ سم حَيْثُ تَبْدَأُ الْأَشْعَةُ تَحْتَ الْحَمْرَاءِ. وَتُقَسَّمُ الْأَشْعَةُ تَحْتَ الْحَمْرَاءِ أحياناً إِلَى تَحْتَ الْحَمْرَاءِ الْقَرِيبَةِ مِنْ ٨, ٠, ١٠, ٢, ٣ مم، تَحْتَ الْحَمْرَاءِ الْوُسْطَى مِنْ ٢, ٥ ... ١٠, ٥٠, ١٠٠ مم، تَحْتَ الْحَمْرَاءِ الْبَعِيدَةِ مِنْ ١٠٠, ٥, ١٠٠٠ مم. وَتَمْتَدُّ أَمْوَاجُ الْمَيْكْرُو لِتَصِلَ إِلَى ١ م، أما أَمْوَاجُ الرَّادِيَوْذَاتِ التَّرْدِيدِ فَوْقَ الْعَالِي أَيْ UHF فَتَمْتَدُّ مِنْ ١٠٠ إِلَى ١٠٠٠ م.

إِنَّ هَذِهِ الْحُدُودَ جَمِيعَهَا تَغْلِيْمِيَّةٌ وَلَا غُرَاضَ الْجَدْوَلَةِ فَقَطْ، وَلَا تُمَثِّلُ خَطُوطاً فَاصِلةً. فَخَصَائِصُ نَوْعٍ مَا تَتَدَاخَلُ مَعَ خَصَائِصِ النُّوعِ الَّذِي يَلِيهِ، كَمَا أَنَّ طُرُقَ انْتَاكِهَا وَالْكَشْفِ عَنْهَا تَتَدَاخَلُ. وَمِنْ غَيْرِ الْمَلَايِمِ اسْتِخْدَامُ وَخَدَاتِ الطُّوْلِ نَفْسِهَا عَلَى الْمَدَى الْهَائِلِ لِلظُّفِيفِ الْكَهْرُومَغْنَاطِيْسِيِّ. وَلِذَا يُعْبَرُ عَنْ أَمْوَاجِ الرَّادِيَوْ بِالْأَمْتَارِ، وَالْأَشْعَةِ تَحْتَ الْحَمْرَاءِ بِأَجْزَاءٍ مِنْ أَلْفٍ مِنَ الْمِلْمِيْتَرِ (١٠-٣ مم)، وَالضَّوْءِ الْمَرْتَبِيِّ وَالْأَشْعَةِ فَوْقَ الْبَنْفَسْجِيَّةِ بِالنُّومْتَرَاتِ (نم).

• روبرت اندروز ميليكان (١٨٦٨-١٩٥٣): الفيزيائي الأمريكي الحاصل على جائزة نوبل ١٩٢٣؛ ثيودور ليمان (١٨٧٤-١٩٥٤): استاذ الفيزياء في جامعة هارفارد؛ فكتور شومان (١٨٤١-١٩١٣): صانع الآلات الدقيقة والفيزيائي.

معادلة الحركة التوافقية

دَعْنَا نُعَيِّدُ ذِكْرَ قَانُونِ هُوكْ:

$$[١-١:٢] \quad \text{ق} = - \text{أص} \cdot \dots\dots$$

إِنَّ التَّسَارُعَ هُوَ التَّغْيِيرُ فِي السَّرْعَةِ فِي وَحْدَةِ الزَّمَنِ، أَيْ:

$$[١٢-١:٢] \quad \text{ت} = \frac{\text{د}^2}{\text{دز}} = \frac{\text{د}^2 \text{ص}}{\text{دز}^2} \dots\dots$$

وَيَضَمُّ الْمَعَادِلَةَ اعْلَاهِ وَمَعَادِلَةَ قَانُونِ هُوكْ وَقَانُونِ نِيوتُنْ $\text{ق} = \text{ك ت}$ ، وَبِحَذْفِ ت نَحْصُلُ عَلَى:-

$$[١٣-١:٢٩] \quad \frac{\text{د}^2 \text{ص}}{\text{دز}^2} = \frac{\text{أ} - \text{ك}}{\text{ك}} \text{ص} \dots\dots$$

وَبِأَخِذِ الْمَشْتَقَةِ الْأُولَى لِلْمَعَادِلَةِ [٤-١:٢] بِالنِّسْبَةِ إِلَى الزَّمَنِ:-

$$[١٤-١:٢] \quad \frac{d}{dz} [\text{ع جا } (\omega z)] = \omega \text{ع جتا } (\omega z) \dots\dots$$

وَبِأَخِذِ الْمَشْتَقَةِ الثَّانِيَةِ نَجِدُ أَنَّ:-

$$[١٥-١:٢] \quad \frac{d^2 \text{ص}}{dz^2} = -\omega^2 \text{ع جا } (\omega z) \dots\dots$$

وَيَضَمُّ الْمَعَادِلَةَ هَذِهِ إِلَى الْمَعَادِلَةِ (١٣-١:٢) نَحْصُلُ عَلَى:-

$$[١٦-١:٢] \quad -\omega^2 \text{أ جا } (\omega z) = \frac{\text{أ} - \text{ك}}{\text{ك}} \text{ص} \dots\dots$$

وَبِاخْتِيَارِ السَّرْعَةِ الزَّاوِيَةِ بِحَيْثُ $\omega^2 = \frac{\text{أ}}{\text{ك}}$ نَجِدُ أَنَّ:-

$$\sqrt{\frac{\text{أ}}{\text{ك}}} = \omega$$

وَيَتَذَكَّرُ أَنَّ دَ زَمَنِ الدَّوْرَةِ $\frac{2\pi}{\omega}$ وَمِنَ الْمَعَادِلَةِ [٥-١:٢]، نَجِدُ أَنَّ زَمَنَ دَوْرَةِ اهْتِزَازِ كُتْلَةٍ مُتَدَلِّيةٍ مِنْ زُنْبُرِكَ هِيَ:-

• يَشِيرُ الرَّمْزُ الْغَامِقُ إِلَى أَنَّ الْكَمِيَّةَ قِيدَ الْبَحْثِ هِيَ كَمِيَّةٌ مُتَجَهَةٌ .

[١٧-١:٢]

$$..... \sqrt{\frac{ك}{أ}} ط٢ = \frac{ط٢}{\omega} = د$$

وهكذا فليجميع الحركات التوافقية البسيطة أزمان دورات تُحدَّد فقط بِكثَلَةِ الدَّقِيقَةِ المهتزة وَمُعَامِلِ قَسَاوَةِ الزنبرك أ. ويكون تواتر الكتلة المهتزة بدورها:-

[١٨-١:٢]

$$..... \sqrt{\frac{أ}{ك}} \frac{١}{ط٢} = \frac{\omega}{ط٢} = \frac{١}{د} = \nu$$

لَقَدْ رأينا أنَّ سرعة انتشار موجة ما تَحْتَلِفُ كليَّةً عن السرعة الاهتزازية لأية نقطة فيها إلى أعلى وإلى أسفل مَعَ أَنَّها غيرُ منفصلةٍ عَنْهَا . وَتَذَكَّرُ من الميكانيكا الابتدائية أنَّ السرعة الزاوية تُعرَّفُ ب:-

[١٩-١:٢]

$$..... \frac{\phi}{دز} = \omega$$

وَأَنَّ التسارعَ الزاويَّ يُعطى بالمعادلة:-

[٢٠-١:٢]

$$..... \frac{\phi^٢}{دز^٢} = \frac{\omega}{دز} = \alpha$$

وتنطبق هاتان المعادلتان كذلك على الحركة في الدائرة المرجعية . وَنَجِدُ للحركة الرأسية إلى أعلى وأُفْقَلْ، أي لإسقاطيَّ حَرَكَةٍ نُقْطَةٍ دائرية على المِخْوَرِ الصَّادِيَّ، أن السرعة هي، آخذين بعين الاعتبارِ المعادلةَ [٤-١:٢] :-

[٢١-١:٢]

$$..... \omega = \frac{دص}{دز} = \omega \text{ أ جتا } (ز \omega)$$

وَأَنَّ التسارعَ هو:

[٢٢-١:٢]

$$..... \alpha = -\frac{در}{دز} = -\omega^٢ \text{ أ جا } (ز \omega)$$

وَهُمَا كَمَا تَرَى دالَّتَانِ جَيِّبَتَانِ .

وبالعودة لِلْحُظَّةِ إلى الكتلة المعلقة بِظَرْفِ الزُّنْبَرِكِ نَسْتَطِيعُ وَصَفَ سُرْعَةِ الاهتزازِ كَمَا يلي :

$$r_{ص} = \pm \sqrt{\frac{1}{k}} \quad (ع-٢ ص٢) \dots [٢٣-١:٢]$$

وتحدث السرعة القصوى عندما تكون $v = 0$ ، والسرعة الصفرية عند $v = A$ ، وذلك بحسب الشكل ٢ الذي سبق شرحه.

وهناك طريقتان للنظر إلى الحركة الموجية التوافقية. فلنتظر أولاً في الأمواج التي تتكون على سطح بحيرة في لحظة ما. ويمكننا على سبيل المثال أن نأخذ نقطة فوتوغرافية لتلك الأمواج مُجمَّدين بذلك حركتها في اللحظة $z = z_0$ ، ومن ثمَّ يُمكن وصف شكل التكوين الموجي كدالة مكانية على النحو التالي:-

$$v = c (s) \dots [٢٤-١:٢]$$

وبالطبع فلنسا نريد أن نُقيِّد أنفسنا بوصف الموجة الواقفة. ولذا فبمرور الزمن تتحرك الموجة إلى اليمين. وإذا كانت رهي السرعة التي تتحرك بها الموجة أي:-

$$r = \frac{\Delta s}{\Delta z} \text{، فإن هذا يعني أن الموجة، بعد مرور فترة زمنية } \Delta z \text{ تكون قد تحركت مسافة } \Delta s \text{:-}$$

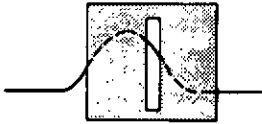
$$\Delta s = r \Delta z$$

وبازدياد z فإن المقدار Δz يَتَّبِعِي أن يُطْرَحَ من s . للاحتفاظ بالمساواة في المعادلة [٢٤-١:٢]. وهكذا يكون:-

$$v = c (s - r z) \dots$$

وعندما تتحرك الموجة إلى اليسار تكون $v = c (s + r z)$ ، بحيث تنقص s بمرور الزمن. وبعد ذلك ننظر إلى نقطة واحدة فقط في الموجة ونسأل كيف تتحرك هذه النقطة إلى أعلى وإلى أسفل بدلالة الزمن. ويمكننا أن ننظر على سبيل المثال إلى أمواج الماء عبر شق ضيق - الشكل ٧. وفي مقابل المعادلة [٢٤-١:٢]، نحصل الآن على:-

$$v = c (z) \text{، } s = \text{ثابت} \dots [٢٦-١:٢]$$



الشكل ٧: التكوين الموجي المتحرك كما يشاهد عبر شق ساكن.

وَنَسْتَطِيعُ أَنْ نَصِفَ حَرَكَةَ الْمَوْجَةِ بِدَلَالَةِ الزَّمَنِ مِنْ خِلَالِ إِدْخَالِ سُرْعَتِهَا الزَّاوِيَةِ ω عَلَى النُّحُوِّ التَّالِيِ :-

$$[4-1:2] \quad \text{ص} = \text{ع جا } (\omega \text{ ز}) \dots\dots$$

$$\text{وَهِيَ نَفْسُ الْمَعَادَلَةِ الَّتِي أَشْتَقْتُ سَابِقاً. وَلَكِنْ } \omega = \frac{\text{ط}^2}{\text{د}}, \text{ وَ } \nu = \frac{1}{\text{د}}$$

وَبِذَلِكَ تَصْبِحُ الْمَعَادَلَةُ [4-1:2] عَلَى النُّحُوِّ التَّالِيِ :-

$$[27-1:2] \quad \text{ص} = \text{ع جا } (\text{ط}^2 \nu \text{ ز}) \dots\dots$$

لَقَدْ رَأَيْنَا أَنَّ سُرْعَةَ مَوْجَةٍ مَا هِيَ $r = \nu \lambda$. وَإِذَا تَحَرَّكَتِ الْمَوْجَةُ عَلَى الْمَحْوَرِّ السِّينِيِّ، أَمْكَنْتَنَا كِتَابَةُ السَّرْعَةِ عَلَى النُّحُوِّ التَّالِيِ :

$$[28-1:2] \quad r = \nu \lambda = \frac{\text{س}}{\text{ز}}, \nu = \frac{\text{س}}{\lambda} \dots\dots$$

وَبِتَغْوِيضِ الْمَعَادَلَةِ [28-1:2] فِي الْمَعَادَلَةِ [27-1:2] نَحْصُلُ عَلَى :-

$$[29-1:2] \quad \text{ص} = \text{ع جا } 2 \left(\frac{\text{ط}^2 \text{س}}{\lambda} \right) \dots\dots$$

وَلْتُمَثِّلِ الْمَوْجَةَ فِي الزَّمَانِ وَالْمَكَانِ مَعاً أَيْ بِجَعْلِ الْمَوْجَةِ تَتَحَرَّكُ، نُدْخِلُ الزَّمْنَ كَمَا فِي الْمَعَادَلَةِ [29-1:2]، وَنَحْصُلُ عَلَى :-

$$[30-1:2] \quad \text{ص} = \text{ع جا } \left[\frac{\text{ط}^2}{\lambda} (\text{س} - \text{ر ز}) \right] \dots\dots$$

وَبازْدِيَادِ الزَّمَنِ يَتَحَرَّكُ التَّكْوِينُ الْمَوْجِيُّ فِي اتِّجَاهِ قِيَمِ سِ الْمَوْجَةِ بِسُرْعَةِ ر. وَهَذَا لِكَ عَدَدٍ مِنَ الصَّيَغِ الْمَكَافِئَةِ الَّتِي نَسْتَطِيعُ الْحَصُولَ عَلَيْهَا بِتَغْوِيضَاتٍ مُتَعَدِّدَةٍ، مِنْهَا عَلَى سَبِيلِ الْإِثَالِ :-

$$[31-1:2] \quad \text{ص} = \text{ع جا } \left[\omega \left(\text{ز} - \frac{\text{س}}{\text{ر}} \right) \right] \dots\dots$$

$$[32-1:2] \quad \text{ص} = \text{ع جا } \left[\text{ط}^2 \left(\text{ز} \nu - \frac{\text{س}}{\lambda} \right) \right] \dots\dots$$

$$[33-1:2] \quad \text{ص} = \text{ع جا } \left[\text{ط}^2 \nu \left(\text{ز} - \frac{\text{س}}{\text{ر}} \right) \right] \dots\dots$$

$$[34-1:2] \quad \text{ص} = \text{ع جا } \left[\text{ط}^2 \left(\frac{\text{ز}}{\text{د}} - \frac{\text{س}}{\lambda} \right) \right] \dots\dots$$

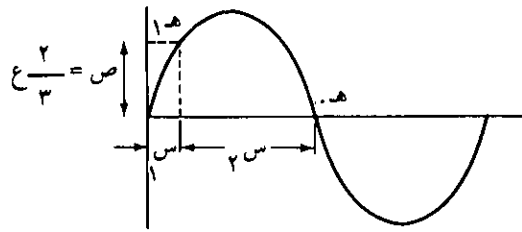
وفي جميع هذه المعادلات: v هي ارتفاع الاضطراب، c السعة، ω السرعة الزاوية، s المسافة المقطوعة على المحور السيني، v سرعة انتشار الموجة، λ الطول الموجي، ν التواتر، و T زمن دورة الموجة.

مثال:

افترض أن موجة في زمن ما قد بلغت $\frac{2}{3}$ إزاحتها الموجية أقصى أي $v = \frac{2}{3}c$ ؛ فإذا كانت $\lambda = 10$ سم، فجد بُعد هذه النقطة من النقطة هـ. - الشكل ٨.

الحل:

من المعادلة [٣٢-١:٢] نجد أن:



الشكل ٨

$$\frac{2}{3}c = c \text{ جا } \left(\frac{2\pi s_2}{\lambda} \right)$$

$$\frac{2}{3} = \text{جا } \left(\frac{2\pi s_2}{\lambda} \right) = 42^\circ$$

$$\text{ومن الشكل ٨، } s_2 = s_1 - \frac{\lambda}{2}$$

$$\frac{42}{360} = \frac{s_1}{10} \therefore s_1 = 1,16 \text{ سم}$$

$$\text{وبذلك } s_2 = 1,16 - \frac{10}{2} = 3,84 \text{ سم}$$

Phase and Group Velocity السرعة الطورية والسرعة الزمرية

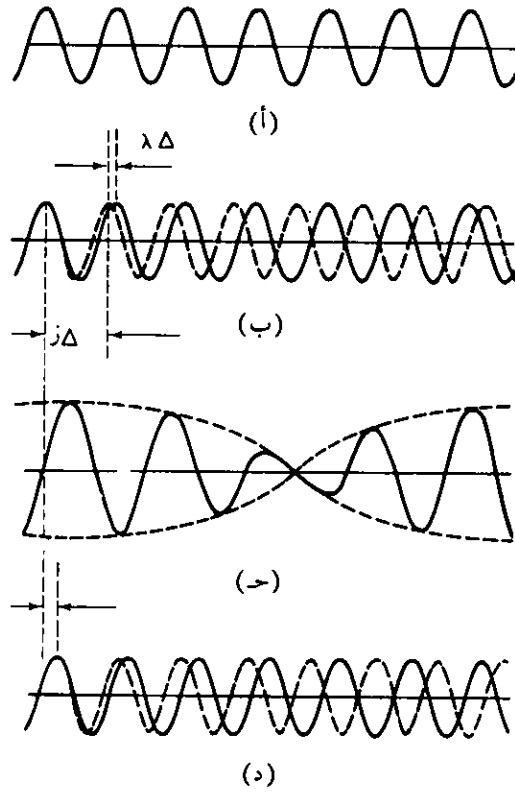
لسرعة الضوء في الخلاء التام أي الفراغ المطلق قيمة متفردة، وهي واحدة لجميع الأطوال الموجية. أما في الوسط المادي فالأمر مختلف. ومن ناحية فعلية فلبا أوساط الشفافة معاملات انكسار تختلف باختلاف الأطوال الموجية؛ فهي لذلك أوساط تحلل الضوء. ويعني هذا أن مكونات حزمة من الضوء الأبيض التي لها أطوال موجية مختلفة تتحرك بسرعات مختلفة. ومع أن التكوين الموجي الواحد من طول موجي معين يتحرك بسرعة متفردة تسمى السرعة الطورية، فإن مجموع جميع المكونات لا تتحرك ضرورة بنفس السرعة. وتسمى سرعة المجموع هذا السرعة الزمرية أو الجماعية.

دَعْنَا نُوَضِّحْ هذه النقطة بالنظرِ أولاً إلى موجة جيبية اعتيادية - الشكل ٩ أ. إنَّ سرعة نقطة ما في هذا التكوين الموجي هي السرعة الطورية. لِنَتَغَيَّرْ بَعْدَ ذَلِكَ مَوْجَتَيْنِ مُتْرَاكِتَيْنِ وَمُتَسَاوِيَتَيْنِ فِي سَعَتَيْهِمَا وَلَهُمَا طَوْلَانِ مَوْجِيَّانِ مُخْتَلِفَانِ قَلِيلاً - الشكل ٩ ب. وَلِنَفَرِّضْ أَنَّ السرعةَ الطوريةَ لِلْمَوْجَةِ الْأَطْوَلِ هِيَ r وَلِلْمَوْجَةِ الْأَقْصَرِ هِيَ سُرْعَةُ أَقْلُ أَيُّ $r - \Delta$ ر. وَنُمَثِّلُ مُحْصَلَةَ هَاتَيْنِ الْمَوْجَتَيْنِ الْخَطَّ الْغَامِقُ فِي الشَّكْلِ ٩ ح. وَلَكِنَّ غَطَاءَ الْمُحْصَلَةِ **Envelope** هُوَ تَكْوِينٌ مَوْجِيٌّ جِيبِيٌّ لَهُ سُرْعَةٌ وَاتِّجَاهُ حَرَكَةٍ خَاصَّانِ بِهِ - الْخَطُّ الْمَتَقَطِّعُ فِي الشَّكْلِ ٩ ح. وَتُسَمَّى هذه الموجة الجيبية الجديدة «الزُّمْرَةُ المَوْجِيَّةُ» **wave group**. وَدَاخِلَ هذه الزمرة المَوْجِيَّةِ لَا يُمَكِّنُ تَمَيِّزُ أَيِّ مِنْ مَكُونَاتِهَا الْمَوْجِيَّةِ الْأَصْلِيَّةِ وَلَا سُرْعَهَا الطورية، فَكُلُّ مَا يُسْتَطَاعُ قِيَاسُهُ هُوَ السَّرْعَةُ الزُّمْرِيَّةُ.

وَلِنَتَعَيَّنِ السَّرْعَةَ الزُّمْرِيَّةَ نَلْزُمُنَا مَرَّةً أُخْرَى عِلَامَةً مَا، وَنُفَضِّلُ أَنْ تَكُونَ نَقْطَةُ النِّهَايَةِ الْعَظْمَى لِلزُّمْرَةِ. فَعِنْدَ الزَّمَنِ $z = 0$ صَفْرٍ، نَنْطَبِقُ الْقِمَتَانِ الْمَوْجِيَّتَانِ لِلْمُكُونَتَيْنِ الْمَوْجِيَّتَيْنِ وَنُحَدِّثَانِ بِذَلِكَ النِّهَايَةَ الْعَظْمَى لِلزُّمْرَةِ. وَبَعْدَ فِتْرَةٍ زَمْنِيَّةٍ Δz ، تَتَحَرَّكُ الْقِمَتَانِ إِلَى الْيَمِينِ: الْمَوْجَةُ الْأَطْوَلُ مَسَافَةً $r \Delta z$ ، وَالْمَوْجَةُ الْأَقْصَرُ مَسَافَةً $r \Delta z - \Delta z = (r - \Delta) \Delta z$. وَنَمَكِّنُ التَّعْبِيرُ عَنْ فَارِقِ الْمَسَافَتَيْنِ الْمَقْطُوعَتَيْنِ Δz بِكَسْرِ مِنَ الطَّوْلِ الْمَوْجِي $\Delta \lambda$. وَمَعَ أَنَّ الشَّكْلَ ٩ يُظْهِرُ الْأَمْوَاجَ بِدَلَالَةِ الْمَكَانِ وَلَيْسَ بِدَلَالَةِ الزَّمَنِ، إِلَّا أَنَّنَا نُلَاحِظُ أَنَّ السَّرْعَتَيْنِ الطَّوْرِيَّتَيْنِ لِلْمُكُونَتَيْنِ الْمُشْهِمَتَيْنِ هُمَا مُخْتَلِفَتَانِ أَيْضًا. وَتَعْنِي هَذَا أَنَّ النِّقْطَةَ الَّتِي يَتَسَاوَى فِيهَا الطَّوْرَانِ تُغَيَّرُ مِنْ مَوْقِعِهَا الْمَكَانِيِّ بَعْدَ مُرُورِ الْفِتْرَةِ الزَّمْنِيَّةِ Δz - الْمُنْحَنَى د مِنَ الشَّكْلِ ٩. وَفِي الْحَقِيقَةِ، فَالْقِمَتَانِ الْمَوْجِيَّتَانِ اللَّتَانِ تَنْطَبِقَانِ الْآنَ هُمَا غَيْرُ الْقِمَتَيْنِ الْمَوْجِيَّتَيْنِ فِي الرَّسْمِ ب - الشَّكْلِ ٩، وَهُمَا فِي الْحَقِيقَةِ الْقِمَتَانِ الْمُجَاوِرَتَانِ التَّالِيَتَانِ. وَلِذَا قَبْلَ فِتْرَةٍ زَمْنِيَّةٍ Δz تَكُونُ نَقْطَةُ الْإِنْطِبَاقِ أَيُّ النِّهَايَةِ الْعَظْمَى لِلزُّمْرَةِ الْمَوْجِيَّةِ قَدْ تَحَرَّكَتْ مَسَافَةً لَيْسَتْ هِيَ الْمَسَافَةُ $r \Delta z$ وَإِنَّمَا هِيَ مَسَافَةُ أَقْصَرُ مِنْهَا بِطَوْلِ مَوْجِيٍّ، أَيُّ الْمَسَافَةُ $r \Delta z - \Delta \lambda$.

وَمِنْ ثَمَّ تَكُونُ سُرْعَةُ الزُّمْرَةِ الْمَوْجِيَّةِ هِيَ:

$$v_g = \frac{r \Delta z - \Delta \lambda}{\Delta z} . \text{ لَقَدْ حَدَّدْنَا أَنَّ } \Delta z = \frac{\lambda \Delta}{r \Delta} , \text{ وَلِذَا فَالسَّرْعَةُ الزُّمْرِيَّةُ هِيَ:}$$



الشكل ٩: السرعة الطورية والسرعة الزمرية - ارجع الى النص للتفاصيل

$$\frac{r \Delta \lambda}{\lambda \Delta} - r = \frac{\lambda}{z \Delta} - \frac{z \Delta r}{z \Delta} = \bar{r}$$

$$[٣٥-١:٢] \quad \dots \quad \frac{r \Delta}{\lambda \Delta} \lambda - r =$$

وَلَمَّا كَانَ مُعَامِلُ الانكسارِ لِمُعْظَمِ الْمَوَادِّ الْبَصْرِيَّةِ أَكْبَرَ لِلْأَطْوَالِ الْمَوْجِيَّةِ الْأَقْصَرِ، أَيْ أَنَّ السَّيْرَةَ الطَّوْرِيَّةَ أَقْلُ لِلْأَطْوَالِ الْمَوْجِيَّةِ الْأَقْصَرِ، فَإِنَّ السَّيْرَةَ الزَّمْرِيَّةَ لِلضَّوْءِ أَقْلُ مِنَ السَّيْرَةِ الطَّوْرِيَّةِ لِأَيِّ مِنْ مَكُونَاتِهِ. وَفِي حَالِ كَوْنِ مُعَامِلِ الانكسارِ مَثَابِتًا أَوْ كَوْنِ السَّيْرَةِ الطَّوْرِيَّةِ مُسْتَقْلَةً تَمَامًا عَنْ تَوَاتُرِ الْمَوْجَةِ، تَكُونُ السَّرْعَتَانِ الطَّوْرِيَّةُ وَالزَّمْرِيَّةُ مُتَسَاوِيَتَيْنِ.

المعادلة الموجية العامة

يُمْكِنُ لِأَحَدِ طَرَفِي حَبْلِ أَنْ يَتَحَرَّكَ سَرِيعاً إِلَى الْأَعْلَى وَآلَى الْأَسْفَلِ مُخْدِثاً بِذَلِكَ حَرَكَةً اهْتِزَازِيَّةً. وَنُرِيدُ أَنْ نَجِدَ سُرْعَةَ جُزْءٍ مِنْ هَذَا الْحَبْلِ - الشَّكْل ١٠. فَإِذَا كَانَ ش هُوَ الشَّدُّ فِي الْحَبْلِ تَكُونُ مُرَكَّبَةُ الْقُوَّةِ فِي الْإِتِّجَاهِ السَّيْنِيَّ هِيَ:

$$\text{قس} = \text{ش جتا } \theta \quad \dots\dots$$

وَلَمَّا كَانَتْ $\theta \approx ٢٠$ ، فَإِنَّ الْمُرَكَّبَتَيْنِ السَّيْنِيَّتَيْنِ لِلْقُوَّتَيْنِ الْمُؤَثِّرَتَيْنِ عَلَى جَانِبِي جُزْءِ الْحَبْلِ ذَلِكَ تَتَعَادَلَانِ، وَلَا يَتَحَرَّكُ الْجُزْءُ إِلَّا إِلَى أَعْلَى وَآلَى أَسْفَلٍ.

وَتَكُونُ الْقُوَّةُ الَّتِي تُؤَثِّرُ فِي الْإِتِّجَاهِ الرَّأْسِيَّ هِيَ:-

$$\text{قس} = \text{ش جا } \theta \quad \dots\dots$$

كَذَلِكَ تَكُونُ مُحَصَّلَةُ الْقُوَّتَيْنِ الرَّأْسِيَّتَيْنِ هِيَ:

$$\text{قس} = \text{ش جا } \theta - \text{ش جا } \theta \quad \dots\dots$$

وَلَا زَوَاحِجَ صَغِيرَةٍ يَكُونُ:- جا $\theta \approx$ ظا $\theta = \gamma_1$ ،

$$\text{جا } \theta = \text{ظا } \theta = \gamma_2$$

حَيْثُ γ_1, γ_2 هُمَا زَاوِيَتَا الْمَيْلِ عِنْدَ س_١، س_٢؛ $\gamma = \frac{\text{د ص}}{\text{د س}}$.

وَنَجِدُ لِلزَّوَايَا الصَّغِيرَةِ أَنَّ:-

$$\gamma_2 = \gamma_1 + \frac{\gamma \text{ د}}{\text{د س}} \Delta \text{ س،}$$

أَيْ $\gamma_2 - \gamma_1 = \frac{\gamma \text{ د}}{\text{د س}} \Delta \text{ س}$ ، حَيْثُ نَفْتَرِضُ أَنَّ مُعَدَّلَ التَّغْيِيرِ فِي زَاوِيَةِ الْمَيْلِ عَبْرَ الْمَسَافَةِ $\Delta \text{ س}$ يَتَغَيَّرُ خَطِيئاً مَعَ س. وَبِهَذَا التَّقْرِيبِ تُصْبِحُ الْمَعَادِلَةُ [٣٨-١:٢] عَلَى النَحْوِ التَّالِي:-

$$\Delta \text{ قمر} = \text{ش} \frac{\gamma \Delta}{\Delta s} \dots\dots [٢:١-٣٩]$$

وَنُطَبِّقُ بَعْدَ ذَلِكَ قَانُونَ نِيوتُنَ الثَّانِي: $ق = ك \alpha$ عَلَى جُزْءِ الْحَبْلِ وَاضْمِينَ كَثَلَتَهُ $ك = \Delta \text{ ث}$ ، حَيْثُ ث هِيَ كَثَافَةُ مَادَّةِهِ. وَإِذَا كَانَتْ رَهِي سُرْعَةُ الْجُزْءِ، فَإِنَّ تَسَارُعَهُ يَكُونُ:-

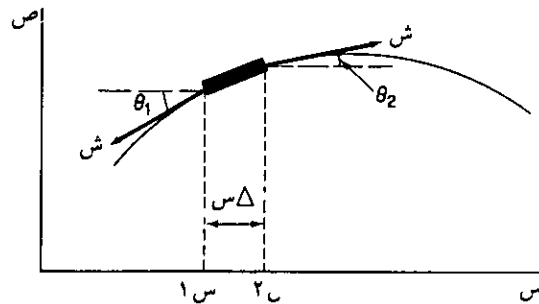
$\alpha = \frac{r}{r}$. وَتَكُونُ الْقُوَّةُ الرَّأْسِيَّةُ اللَّازِمَةُ لِإِحْدَاثِ هَذَا التَّسَارُعِ، بِإِهْمَالِ قُوَّةِ الْجَاذِبِيَّةِ، هِيَ:-

$$\Delta \text{ قمر} = \Delta \text{ ث} \frac{dr}{dz} = \text{ش} \frac{\gamma \Delta}{\Delta s} \text{ س، وَبِحَذْفِ } \Delta \text{ س مِنْ الطَّرَفَيْنِ نَحْصُلُ عَلَى:-}$$

$$\text{ث} \frac{dr}{dz} = \text{ش} \frac{\gamma \Delta}{\Delta s} \dots\dots [٢:١-٤٠]$$

وَهِيَ مُعَادَلَةٌ تَرْبِطُ بَيْنَ التَّسَارُعِ وَمُعَدَّلِ تَغْيِيرِ زَاوِيَةِ الْمَيْلِ مَعَ الْمَحْوَرِ السَّيْنِيِّ. وَبِأَخِذِ مُشْتَقَّةِ الطَّرَفَيْنِ فِي الْمُعَادَلَةِ [٢:١-٤٠] بِالنَّسْبَةِ لِلزَّمَنِ نَحْصُلُ عَلَى:-

$$\text{ث} \frac{r^2}{z^2} = \text{ش} \frac{\gamma^2 \Delta}{s^2} \dots\dots [٢:١-٤١]$$



الشكل ١٠: جزء من حبل مشدود يستخدم لاشتقاق معادلة الموجة المتحركة عليه.

وَيُمْكِنُ تَبْسِيطُ الْمُعَادَلَةِ الْأَخِيرَةِ عَلَى النَّحْوِ التَّالِي:-

$$\frac{\partial y}{\partial s} \text{ ص} \text{ هِيَ مُشْتَقَّةُ } \text{ص} \text{ الْجَزْئِيَّةُ بِالنَّسْبَةِ إِلَى } \text{س} \equiv \frac{\partial y}{\partial x}.$$

$$\frac{د^2ص}{دس دز} = \frac{د^2ص}{دس} \leftarrow \frac{دص}{دز} = \gamma$$

$$\gamma = \frac{دص}{دس} \leftarrow \frac{د^2ص}{دز} = \frac{د^2ص}{دس دز} \text{؛ وبذلك يكون:}$$

$$\frac{د^2ص}{دز} = \frac{د^2ص}{دس} \text{ . وبإجراء الاشتقاق بالنسبة لـ } \gamma \text{ نحصل على :-}$$

$$\frac{د^2ص}{دز دس} = \frac{د^2ص}{دس^2} \text{ . ويتغويض العلاقة الأخيرة في المعادلة [٤١-١:٢] نحصل على :-}$$

$$[٤٢-١:٢] \quad \frac{د^2ص}{دس^2} = \frac{ش}{ث} \text{}$$

والمعادلة الأخيرة هي المعادلة التفاضلية لِمَوْجَةٍ مُسْتَعْرِضَةٍ transverse تتحرك في وسط مادي في بُعدٍ واحدٍ أي اتجاهٍ واحدٍ .

وبعزل عن أية شروط ميكانيكية أو بارامترات تُصبح المعادلة الأخيرة كما يلي :-

$$[٤٣-١:٢] \quad \boxed{\frac{د^2ص}{دس^2} = \frac{د^2ص}{دز^2}} \text{}$$

وهي المعادلة الموجية العامة .

اقتراحات لقراءات إضافية

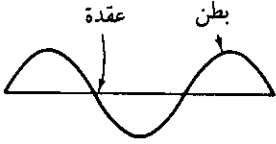
R. W. Pohl, *Optik und Atomphysik* (Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag Inc., 1963).

C. L. Andrews, *Optics of the Electromagnetic Spectrum* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1960).

المسائل

١-١:٢ وُضِعَ حَبْلٌ طوله ١ م في حَرَكَةٍ اهتزازية، بحيثُ يَتَكَوَّنُ عَلَيْهِ في أَيِّ وَقْتٍ $\frac{1}{4}$ مَوْجَةٍ. فإذا كَانَتْ سُرْعَةُ انْتِقَالِ الْأَمْوَاجِ ١٠ م/ث، فَجِدْ تَوَاتُرَ الاهتزاز.

٢-١:٢ يُمكنُ أَنْ تَتَكَوَّنَ الْأَمْوَاجُ الْوَاقِفَةُ الْمُبَيَّنَّةُ في الشَّكْلِ ١١ من أَرْبَعِ عُقَدٍ وَثَلَاثَةِ بُطُونٍ كَمَا تَظْهَرُ في لَحْظَةِ الْإِزَاحَةِ الْعُظْمَى. أَرَسُمْ رَسْمًا تَخْطِيطِيًّا لِلْأَمْوَاجِ كَمَا تَبْدُو بَعْدَ $\frac{1}{4}$ ، $\frac{1}{2}$ ، ١ دَوْرَةٍ. بَيِّنْ طَوْلَ الْمَوْجَةِ عَلَى أَحَدِ هَذِهِ الرُّسُومِ.



الشكل ١١

٣-١:٢ قَدْ تَتَّبَعَ الْأَمْوَاجُ السُّطْحِيَّةُ في الْمُحِيطِ بَعْضَهَا بَعْضًا بِطَوْلِ مَوْجِيٍّ $\lambda = ٤٠$ م وَبِقِيَمَةٍ تَمُرُّ بِنُقْطَةٍ مَا كُلَّ ٥ ثَوَانٍ. جِدْ سُرْعَةَ التَّكْوِينِ الْمَوْجِيَّ.

٤-١:٢ سُرْعَةُ الْأَمْوَاجِ الْكَهْرُومَغْنَاطِيْسِيَّةِ في الْفَرَاغِ التَّامِّ 3×10^8 م/ث. وَنَمْتِدْ الطِّيفَ الْمَرئيَّ مِنْ ٣٨٠ نَم في مَنَاطِقَةِ الْأَزْرَقِ إِلَى ٧٥٠ نَم في مَنَاطِقَةِ الْأَحْمَرِ الْغَامِقِ. (أ) جِدِ التَّوَاتُرَ الَّذِي يُنَاطِرُ هَذَيْنِ الطَّوْلَيْنِ الْمَوْجِيَّيْنِ. (ب) جِدِ الْعَدَّةَ الْمَوْجِيَّةَ الْخَطِّيَّةَ لِكُلِّ مِثْلُهُمَا.

٥-١:٢ يَتَلُغُّ مَدًى مَا مِنْ أَمْوَاجِ الرَّادِيوِ ٢٠٠ كِيلُوهِرْتِزْ وَيَتَمَرَّكُزُّ عِنْدَ ١,٢ مِيْجَاهِرْتِزْ. عَبَّرْ عَنِ عَرْضِ الْمَدَى أَيْ الْحَدِّ الْعُلَوِيِّ وَالسُّفْلِيِّ لَهُ بِوَحْدَةِ الطَّوْلِ الْمَوْجِيَّ.

٦-١:٢ يَتَلُغُّ مَتَوَسِّطُ الطَّوْلِ الْمَوْجِيَّ لِضَوْءِ الصُّوْدِيومِ الْأَضْفَرِ ٥٨٩,٣ نَم. (أ) جِدْ عَدَدَ الْأَمْوَاجِ في الْمِلْمَتِ الْوَاحِدِ (ب) جِدْ تَوَاتُرَهُ (ج) جِدِ الطَّوْلَ الْمَوْجِيَّ لِضَوْءِ الصُّوْدِيومِ في الْمَاءِ (د) جِدْ تَوَاتُرَهُ في الْمَاءِ.

٧-١:٢ عُلِّقَتْ كِتْلَةٌ ٢ كِغَم مِنْ زُنْبُرِكٍ ثَابِتَةٌ ٨ نِيُوتِن / م. فَإِذَا رُفِعَتْ الْكِتْلَةُ ١,٠ م مِنْ وَضْعِ الْإِتْرَانِ ثُمَّ تُرِكَتْ حُرَّةً لَتَهْتَزَّ حَرَكَةً اهتزازيةً. عَيِّنْ:-

(أ) تَوَاتُرَ الْاهْتِزَازِ (ب) زَمَنَ دَوْرَةِ الْاهْتِزَازِ (ج) السَّرْعَةَ الْقُصْوَى لِلْكِتْلَةِ. عُلِّقَتْ كِتْلَةٌ ١٠٠ غَم مِنْ زُنْبُرِكٍ مُطَّ بِالْكِتْلَةِ نَفْسِهَا إِلَى طَوْلِ يَتَلُغُّ ١٩,٦ سَم. ثُمَّ وُضِعَتْ الْكِتْلَةُ في حَرَكَةٍ سَعَتْهَا ٥ سَم، جِدْ:-

(أ) الْقُوَّةَ الْعُظْمَى الْمُؤَثَّرَةَ في الزُّنْبُرِكِ (ب) مَقْدَارَ ثَابِتِ الزُّنْبُرِكِ (ج) تَوَاتُرَ الْاهْتِزَازِ (د) السَّرْعَةَ الْقُصْوَى لِلْكِتْلَةِ.

٩-١:٢ أمواج منتشرة على خطٍ مستقيم تواترها ١٦٠ هرتز، سعتها ١,٢ سم، وسرعتها

انتشارها ٣٢٠ م/ث. (أ) جد الطول الموجي (ب) جد فارق زاوية الطور

بين جُزئين في الموجة المسافة بينهما ١,٢ م. أعط جوابك بالدرجات.

(ج) جد فارق زاوية الطور بالتقدير الدائري.

١٠-١:٢ يُساوي زمنُ الدورة الواحدة لموجة ٠,٢ ثانية وتبلغ سعتها ٤ سم. جد إزاحة

جزءٍ من الموجة في اللحظة التي تكون فيها زاوية طوره قد زادت من صفر إلى

٦٠، وجد كذلك سرعته.

١١-١:٢ يُمكنُ وصفُ موجةٍ ما بالمعادلة ص = ع جا $(\frac{2\pi}{\lambda} z)$. فإذا كانت سعة

الموجة ٢ سم وزمنُ دورتها ٠,٠٢ ثانية وسرعتها ٤٠ سم/ث، فجد:-

(أ) التواتر (ب) الطول الموجي

(ج) معادلة الموجة التي تصف الإزاحة بدلالة موقعها الأفقي والزمن أي

ص = ق (س، ز)

١٢-١:٢ يُمكنُ وصفُ موجةٍ مستعرضةٍ تنتقلُ على حبلٍ بالمعادلة ص = ع جا

$[\frac{2\pi}{\lambda} (س - رز)]$. بين ماذا تعني هذه المعادلة عند:-

(أ) تثبيت الزمن ز (ب) تثبيت س؛ ثم

(ج) بين كيف تتغير قيم ص لقيمة مُحددة ل س بعد انقضاء زمنٍ مقداره

$\frac{س}{ر}$.

الفصل ٢ : ٢

التداخل

Interference

يُشير لَفْظُ التداخل إلى الظاهرة التي تقوى فيها الأمواج أو يُضَعِفُ بَعْضُهَا بَعْضاً تَبَعاً لِكَيْفِيَّةِ تَشَابُهِهَا أَوْ تَرَاكُيْهَا. وَ يَصِفُ لَفْظُ «قياس التداخل» التجارب التي يَتِمُّ فيها تَوَافُقُ الضوءِ تَحْتَ شُرُوطٍ مُعَيَّنَةٍ بِحَيْثُ يَخْذُلُ التَّدَاخُلُ. إِنَّ التَّعَابِيرَ مِثْلَ التَّدَاخُلِ الْبَتَاءِ أَوْ التَّدَاخُلِ الْهَدَامِ تَعَابِيرُ مُسْتَنْكَرَةٌ لِأَنَّهَا تَتَضَمَّنُ عَلَى مَا يَبْدُو أَنَّ مِنَ الْمُمْكِنِ هَذِمَ الضوءِ أَوْ الطَّاقَةَ؛ ذَلِكَ لِأَنَّ هَذَا الْأَمْرَ بِكُلِّ تَأَكِيدٍ لَا يَخْذُلُ: فَوُصُولُ ضَوْءٍ قَلِيلٍ إِلَى نَقْطَةٍ مَا يَعْنِي أَنَّ ضَوْءاً أَكْثَرَ سَيَصِلُ نَقْطَةً أُخْرَى، فَالتَّدَاخُلُ لَا يَتَسَبَّبُ إِلَّا فِي إِعَادَةِ تَوْزِيعِ الضوءِ.

تجربة الشقين الطولين ليونغ Young Double slit Experiment

إِنَّ الْمَثَالَ الْكِلَاسِيكِيَّ عَلَى قِيَاسِ التَّدَاخُلِ هُوَ تَجْرِبَةُ الشَّقَيْنِ الَّتِي أَجْرَاهَا أَوَّلَ مَرَّةٍ ثوماس يونغ * عام ١٨٠١. وَفِي أَوَّلِ الْأَمْرِ اسْتُخْدِمَ يُونْغُ ثَقْبَيْنِ بِحَجْمِ ثَقْبِ اللَّذْبُوسِ مَرَّرَ

* ثوماس يونغ Thomas Young (١٧٧٣-١٨٢٩): الطبيب والفيزيائي البريطاني، حَصَلَ عَلَى شَهَادَةِ الطَّبِّ مِنْ جَامِعَةِ جُوتِنْجِن عام ١٧٩٦، وَفِي عام ١٨٠١ أَصْبَحَ أَسْتَاذًا لِلْفِيزِيَاءِ فِي الْمَعْهَدِ الْمَلِكِيِّ فِي لَنْدُن. أَشْهَمَ فِي النِّظَرِيَّةِ الْمَوْجِيَّةِ لِلضَّوْءِ، رُؤْيَا الْأَلْوَانِ، طَبِيعَةِ عَمَلِ الْقَلْبِ الْهَيْدُرُودِيْنَامِيَّةِ، وَتَكْيِيفِ الْعَيْنِ. وَقَدْ تَرَجَّمَ الْكُتَابَاتِ الْهَيْرُودِغْلِيْفِيَّةِ عَلَى حَجَرِ رُوزَنَّا. وَكَتَبَ مَا يَلِي: مِنْ التَّجَارِبِ وَالْحِسَابَاتِ الْمَفْتَرَضَةِ يُمْكِنُنَا أَنْ نَسْتَنْتِجَ أَنَّ الضَّوْءَ الْمُنْتَجِسَ لَهُ صِفَاتٌ مُتَضَادَّةٌ قَادِرَةٌ عَلَى مُعَادَلَةٍ أَوْ هَدْمِ بَعْضِهَا بَعْضاً وَعَلَى الْغَاءِ الضَّوْءِ حَيْثُمَا تَحَالَفَتْ؛ وَتَتَعَاقَبُ هَذِهِ الصِّفَاتُ فِي سَطُوحٍ مُتَّحِدَةٍ الْمَرْكَزِ مُتَتَالِيَةٍ وَعَلَى مَسَافَاتٍ ثَابِتَةٍ لِلضَّوْءِ الْوَاحِدِ الْمَارِ فِي الْوَسْطِ الْوَاحِدِ. وَلَكِنْ لَمَّا كُنَّا نَعْرِفُ أَنَّ الصَّوْتِ يَتَفَرَّقُ فِي سَطُوحٍ مُتَّحِدَةٍ الْمَرْكَزِ، وَأَنَّ الْأَصْوَاتِ الْمَوْسِيقِيَّةِ تُتَأَلَّفُ مِنْ صِفَاتٍ مُتَضَادَّةٍ قَادِرَةٍ عَلَى مُعَادَلَةٍ بَعْضُهَا بَعْضاً وَتَتَعَاقَبُ فِي فُرَاتٍ زَمْنِيَّةٍ مُعَيَّنَةٍ تَخْتَلِفُ تَبَعاً لِلنَّعْمَةِ، فَإِنَّا مَخُولُونَ بِالْإِسْتِنْتَاكِ بِوُجُوبِ وَجُودِ شَيْءٍ كَبِيرٍ بَيْنَ طَبِيعَةِ الصَّوْتِ وَطَبِيعَةِ الضَّوْءِ. (محاضرات في الفلسفة الطبيعية، الجزء الثاني، ص ٦٤٥).. انظر كذلك:

R. W. Pohl, "Discovery of Interference by Thomas Young," *Am. J. Physics* 28 (1960), 530-32.

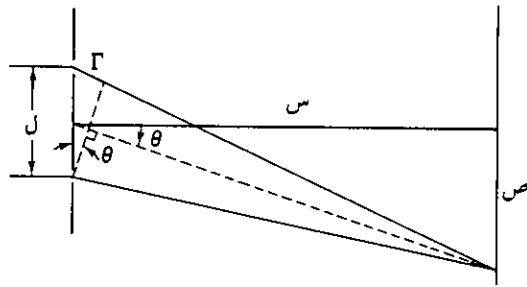
أو أيّ مُضَاعِف زَوْجِيٍّ للمقدارِ ط .

دُع «س» في الشكل ٢ تمثل المسافة بين الشقين والستارة وَص تمثل مسافة الهُذْبِ الواحدِ من المحورِ البصريّ. فإن :-

$$\text{ظا } \theta = \frac{\text{ص}}{\text{س}}$$

[٢-٢:٢]

$$\text{جا } \theta \approx \frac{\Gamma}{\text{ل}} \dots\dots$$



الشكل ٢: هندسة تجربة الشقين الطولين .

وللزوايا الصغيرة θ أو عندما ص «س» يكون :-

$$\text{ظا } \theta \approx \text{جا } \theta, \text{ وَ}$$

[٣-٢:٢]

$$\dots\dots \frac{\Gamma}{\text{ل}} = \frac{\text{ص}}{\text{س}}$$

وَيَتَضَمَّنِ المعادلةِ [١-٢:٢] في المعادلةِ [٣-٢:٢] نَجِدُ أَنَّ :-

[٤-٢:٢]

$$\text{ص} \approx \text{ن} \lambda \frac{\text{س}}{\text{ل}} \quad ; \quad \text{ن} = ٠, ١, ٢, ٣, \dots\dots$$

وهي المعادلة العامة لمواضع النهايات العظمى في تجربة الشقين الطولين ليونغ. وتحدث النهايات الصغرى عندما يكون فارق الطور δ مساوياً لـ ١٨٠° أو ط زاوية نصف قطرية أو أيّاً من مضاعفاتها الفردية، أي :-

[٥-٢:٢]

٥ الصغرى = ط، ٣ ط، ٥ ط، ٧ ط،

وَيَعْنِي هَذَا أَنَّ فَرْقَ الْمَسَارِ لِلشَّرْطِ أَعْلَاهُ هُوَ:-

[٦-٢:٢]

$$1' \text{ الصغرى} = (n - \frac{1}{4}) \lambda \dots\dots$$

وَأَنَّ مَوَاقِعَ نِهَايَاتِ التَّدَاخُلِ الصغرى هي:-

[٧-٢:١]

...، ٣، ٢، ١ = ن،

$$\frac{ص}{صغرى} \approx (n - \frac{1}{4}) \lambda \frac{س}{ل}$$

وَتَكُونُ الْمَسَافَاتُ بَيْنَ مَوَاقِعِ نِهَايَاتِ التَّدَاخُلِ الْعُظْمَى الْمُتَعَاقِبَةِ أَوِ الصغرى الْمُتَعَاقِبَةِ مُتَسَاوِيَةً فِي تَجَرِبَةٍ يُونَعُ عِنْدَ تَثْبِيتِ قِيَمِ الْكِمِيَّاتِ λ ، $س$ ، $و$ ل. وَتَتَنَاسَبُ الْمَسَافَةُ بَيْنَ الْأَهْدَابِ طَرْدِيًّا مَعَ الطَّوْلِ الْمَوْجِيَّ λ وَمَعَ الْمَسَافَةِ $س$ أَيْ مَعَ بُعْدِهَا عَنِ الشَّقِّينِ؛ كَذَلِكَ تَتَنَاسَبُ الْمَسَافَةُ بَيْنَ هُذْبٍ وَهُذْبٍ آخَرَ أَيْ الْمَسَافَةُ Δ ص عَكْسِيًّا مَعَ $ل$. وَلَمَّا كَانَ مِنَ السَّهْلِ قِيَاسُ $ل$ ، $س$ ، وَ $ص$ فَإِنَّ تَجَرِبَةً يُونَعُ يُمَكِّنُ اسْتِخْدَامَهَا لِتَعْيِينِ الطَّوْلِ الْمَوْجِيَّ لِلضَّوءِ بِالمعادلة:

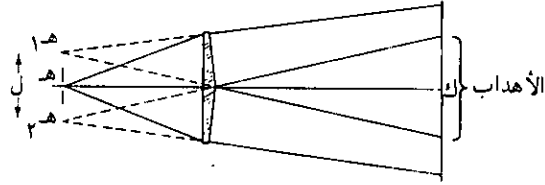
$$\lambda \approx (\Delta ص) \frac{س}{ل}$$

وَتَنْتَشِرُ النِّهَايَاتُ الْعُظْمَى وَالصغرى فِي كُلِّ الْفَرَاغِ خَلْفَ الشَّقِّينِ. وَلَا يَلْزَمُنَا عَدَسَةٌ لِإِحْدَائِهَا، عَلَى الرَّغْمِ مِنْ أَنَّ الْأَهْدَابَ الَّتِي تَكُونُ عَلَى مَسَافَةٍ قَصِيرَةٍ مِنَ الشَّقِّينِ يُمَكِّنُ أَنَّ تَكُونَ رَفِيعَةً جَدًّا إِلَى دَرَجَةٍ أَنَّنَا نَحْتَاجُ إِلَى مِيكْرُوسَكُوبٍ لِتَبْيِينِهَا.

تجارب الحزمتين الضوئيتين ذات الصلة

موشور فرنل الثنائي Fresnel's biprism

لَمْ تُعْتَبَرِ الْأَهْدَابُ النَّاتِجَةُ مِنْ تَجَرِبَةِ الشَّقِّينِ الطَّوْلِيَّيْنِ لِيُونَعُ فِي أَوَّلِ الْأَمْرِ بُرْهَانًا عَلَى أَنَّهَا نَاشِئَةٌ فِعْلًا عَنْ تَدَاخُلِ حَزْمَتَيْنِ ضَوْئِيَّتَيْنِ؛ إِذْ ظَنَّ أَنَّ حُبُودَ الضَّوءِ عَلَى حَوَافِّ الشَّقِّينِ قَدْ غَيَّرَ مِنْ صِفَاتِ الضَّوءِ. وَلِذَا قَامَ فِرْنَلُ بِالْبَحْثِ عَنْ ظَوَاهِرِ التَّدَاخُلِ الَّتِي لَا يَحْدُثُ فِيهَا أَيُّ حُبُودٍ، وَتَحَيَّلَ الْمَوْشُورَ الثَّنَائِيَّ الَّذِي سُمِّيَ بِاسْمِهِ غَيْرَ عَارِفٍ أَنَّ «أوم» قَدْ اخْتَرَعَهُ مِنْ



الشكل ٣: موشور فيرنل الثاني

قَبْلُ. وَتَتَأَلَّفُ مَوْشُورُ فِرْنَلِ الثَّانِي مِنْ مَوْشُورٍ مَزْدُوجٍ مُتَمَاثِلٍ لَهُ زَاوِيَةٌ صَغِيرَةٌ وَقَاعِدَةٌ مُشْتَرَكَةٌ - الشَّكْلُ ٣. وَيَصْدُرُ الضَّوءُ مِنَ الشَّقِّ هـ الموجِّهِ مُوَازِيًا لِلْحَافَةِ الَّتِي يَشْتَرِكُ فِيهَا الْمَوْشُورَانِ. وَلِذَا يَبْدُو الضَّوءُ لِمُشَاهِدٍ عِنْدَ الْمَوْجِعِ كَمَا لَوْ كَانَ آتِيًا مِنْ مَصْدَرَيْنِ وَهَمِيَّتَيْنِ هـ_١، هـ_٢، وَتَتَكَوَّنُ الْأَهْدَابُ حَيْثُ تَتْرَاكُبُ الْحَزْمَتَانِ الضَّوئِيَّتَانِ الْقَادِمَتَانِ مِنْهُمَا فِي الظَّاهِرِ. أَمَّا الْعِلَاقَةُ الَّتِي تَرِبُطُ بَيْنَ الْمَسَافَةِ هـ_١ هـ_٢، «المسافة هـك»، وَالطَّوِيلِ الْمَوْجِيَّ λ فَهِيَ نَفْسُ الْعِلَاقَةِ فِي تَجْرِبَةِ يُونِغ.

مرآة لويْد المنفردة Lloyd's Single Mirror



الشكل ٤: مرآة لويْد المنفردة

فِي تَجْرِبَةِ الْمِرَاةِ الْمَنْفَرْدَةِ لِلْوَيْدِ يَأْتِي الضَّوءُ مِنْ مَصْدَرٍ ضَوْئِيٍّ هـ مُوَضُوعٍ قَرِيبًا مِنْ سَطْحِ مِرَاةٍ مُسْتَوِيَةٍ. وَلَا يِلَاحِظُ الْمُشَاهِدُ الْمَصْدَرَ الْحَقِيقِيَّ هـ فَحَسْبُ، وَإِنَّمَا كَذَلِكَ صَوْرَتُهُ الْوَهْمِيَّةُ هـ الْمُنْعَكِسَةُ فِي الْمِرَاةِ - الشَّكْلُ ٤. وَبِذَلِكَ يَقُومُ الشَّقَّانِ هـ، هـ مَقَامَ الشَّقَّيْنِ فِي تَجْرِبَةِ يُونِغِ مُخْدِعَتَيْنِ الْأَهْدَابِ التَّدَاخِلِيَّةِ.

عدسة بِلْتِ المشطورة Billet's Split Lens

تَتَأَلَّفُ عَدْسَةُ بِلْتِ الْمَشْطُورَةُ مِنْ نِصْفَيْ عَدَسَتَيْنِ مُتَبَاعِدَتَيْنِ قَلِيلًا تُكَوِّنَانِ لِمَصْدَرٍ ضَوْئِيٍّ صَوْرَتَيْنِ حَقِيقَتَيْنِ أَوْ وَهْمِيَّتَيْنِ هـ_١، هـ_٢ بِطَرِيقَةٍ مُمَاثِلَةٍ تَمَامًا لِلْمَوْشُورِ الثَّانِي. وَمَرَّةً أُخْرَى يَتْرَاكُبُ الضَّوءُ مِنْ هـ_١، هـ_٢ فَيُظْهِرُ التَّدَاخُلَ.

الشروط العامة للتداخل

نَسْتَتَبَّعُ مِنْ تَجْرِبَةِ يُونِغِ وَتَجَارِبِ أُخْرَى مِمَّا ثَلَّةُ أَنَّ هُنَاكَ عِدَّةَ شُرُوطٍ يَنْبَغِي تَوَافُرُهَا لِخُدُوثِ التَّدَاخُلِ :-

*H. Lloyd, "On a New Case of Interference of the Rays of Light," *Trans. Irish Acad.* 17 (1837), 171.

١ - يَتَّبَعِي أَنْ يَكُونَ الضَّوُّ مُتَحَالِفاً جُزْئِيًّا؛ فَدَرَجَةُ التَّحَالِفِ Coherence تُعَيَّنُ وَضَوْحُ

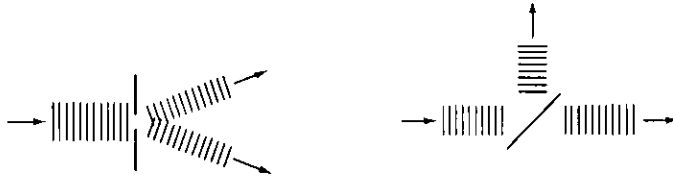
الأهدابِ التداخلية Visibility. وسوف نبحثُ التحالِفَ بالتفصيلِ في الفصلِ ٦:٢.

٢ - إِنَّ الضَّوِّءَ الْآتِيَّ مِنْ مَصَادِرَ ضَوْئِيَّةٍ مُخْتَلِفَةٍ غَيْرُ مُتَحَالِفٍ فِي الْعَادَّةِ، وَلِذَلِكَ فَلَا يَنْتُجُ عَنْهُ تَدَاخُلٌ. وَ يُعْتَبَرُ الضَّوُّ الْآتِي مِنْ لَيْزَرِينَ مُثَبَّتِي الطَّوْرِ اسْتِثْنَاءً؛ إِذْ أَنَّهُ يُعْطَى تَدَاخُلًا.

٣ - يَشِيرُ لَفْظُ الْأَهْدَابِ عَادَةً إِلَى التَّدَاخُلِ فِي الْمَكَانِ. وَلَكِنْ يُمَكِّنُ تَسْجِيلَ نَهَايَاتِ التَّدَاخُلِ الْعُظْمَى وَالصُّغْرَى كَدَوَالٍ زَمْنِيَّةٍ كَمَا فِي الْهَيْتْروداينِيَّة heterodyning *.

٤ - يَتَّبَعِي أَنْ يَكُونَ إِسْهَامَا الْمَصْدَرَيْنِ الضَّوئِيَّيْنِ مُتَسَاوِيَيْنِ تَمَامًا أَوْ مُتَسَاوِيَيْنِ تَقْرِيْبًا فِي السَّعَةِ، لِأَنَّ ذَلِكَ يَضْمَنُ إِبْغَاءَ تَامًا لِلضَّوِّ عِنْدَ النِّهَايَاتِ الصُّغْرَى، وَمِنْ ثَمَّ مُغَايَرَةً عَالِيَةً Contrast.

وَيُمْكِنُ تَصْنِيفُ مَقَايِسِ التَّدَاخُلِ تَبَعًا لِكَيْفِيَّةِ قِسْمَتِهَا الضَّوِّءَ. فَفِي أَحَدِ الْأَنْوَاعِ تُقَسَّمُ الْجَبْهَاتُ الْمَوْجِيَّةُ عَرْضِيًّا مِنْ دُونِ تَقْسِيمِ الْكثَافَةِ الطَّاقِيَّةِ - الشَّكْل ٥، وَتُسَمَّى هَذِهِ الْقِسْمَةُ «قِسْمَةُ الْجَبْهَاتِ الْمَوْجِيَّةِ»؛ وَمِنْ الْأَمْثَلَةِ عَلَى ذَلِكَ الشَّقُّ الْمَزْدَوِجُ لِيُونِغ، مَوْشُورُ فِرْنَلِ الثَّنَائِي، مِرَاةٌ لَوَيْدُ الْمَنْفَرْدَةِ، وَغَدَسُهُ بِلْتِ الْمَشْطُورَةُ وَغَيْرُ ذَلِكَ. وَفِي نَوْعٍ آخَرَ يُقَسَّمُ الضَّوُّ مِنْ خِلَالِ انْعِكَاسِهِ عَنْ مِرَاةٍ مُقَضَّضَةٍ تَقْضِضُ رَقِيقًا أَوْ بِشَاطِرِ الْحُزْمَةِ الَّتِي يَنْعَكِسُ جُزْءٌ مِنْ الْحُزْمَةِ وَيَمُرُّ الْجُزْءُ الْآخَرُ؛ وَتُسَمَّى هَذِهِ الْقِسْمَةُ قِسْمَةُ السَّعَةِ. وَيُمْكِنُ اسْتِخْدَامُ هَذَا النُّوعِ مَعَ مَصْدَرِ ضَوْئِيٍّ مُتَمَدٍّ، الْأَمْرُ الَّذِي يُسْتَرَادُّ اسْتِخْدَامَ ضَوْءٍ ذِي شِدَّةٍ عَالِيَةٍ. وَمِنْ الْأَمْثَلَةِ عَلَى هَذَا النُّوعِ التَّدَاخُلُ فِي الْأَفْلَامِ الرَقِيقَةِ وَمَقَايِسُ التَّدَاخُلِ الْمَسْمُوءِ نِسْبَةً إِلَى مَيْكَلِسُون، مَآخِ-زِنْدَر، جَامِنْ، فَبْرِي-بِيرُو وَآخَرِينَ. وَسَيَتِمُّ شَرْحُهَا فِي فَصْلِ لَاحِقٍ.



الشَّكْل ٥: قِسْمَةُ الضَّوِّ بِالْجَبْهَةِ الْمَوْجِيَّةِ إِلَى الْيَسَارِ، وَبِالسَّعَةِ إِلَى الْيَمِينِ.

* انظر الفصل ٦:٢ - الْجُزْءُ الْآخِرُ مِنْهُ.

تراكُّبُ الأمواج Superposition of waves

نَعُودُ هُنَا إِلَى وَصْفِ تَحْلِيلِيٍّ لِلْحَرَكَةِ الْمَوْجِيَّةِ التَّوَافُقِيَّةِ الْبَسِيطَةِ، وَتَبَحُّثُ تَرَكَبِ مِثْلِ هَذِهِ الْأَمْوَاجِ.

يُمْكِنُ التَّعْبِيرُ عَنِ الْمَوْجَةِ بِ:-

$$ص = ع \text{ جا } \left[\frac{2\pi}{\lambda} (س - رز) \right] \dots\dots [٨-٢:٢]$$

وَيَعْنِي هَذَا أَنَّ تَكْوِيناً مَوْجِياً مِنْ هَذَا النُّوعِ يَتَحَرَّكُ فِي اتِّجَاهِ سِ الْمَوْجِبِ بِسُرْعَةٍ ر.

تراكُّبُ الأمواج مُتساوية الطَّوَرِ

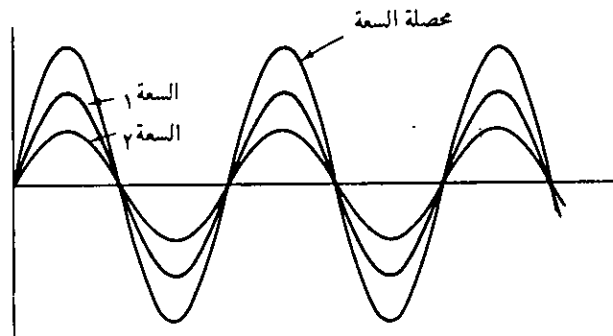
افْتَرِضْ أَنَّ مَوْجَتَيْنِ جَنِبِيَّتَيْنِ (أَوْ أَكْثَرَ) لَهُمَا طَوَلٌ مَوْجِيٌّ وَاحِدٌ تَتْرَاكِبَانِ. فَإِذَا لَمْ يَكُنْ بَيْنَ هَذِهِ الْأَمْوَاجِ أَيُّ فَرْقٍ فِي الطَّوَرِ، فَإِنَّ مُحْصَلَّةَ السَّعَةِ تُسَاوِي مَجْمُوعَ السَّعَاتِ لِكُلِّ مِّنْهَا:-

$$ع = ع_١ + ع_٢ + \dots + ع_n \dots\dots [٩-٢:٢]$$

كَمَا أَنَّ شِدَّةَ الْمَوْجَةِ الْمُحْصَلَّةِ هِيَ:-

$$ش = (ع_١ + ع_٢ + \dots + ع_n)^2 \dots\dots [١٠-٢:٢]$$

وَيُوضَحُ الشَّكْلُ ٦ هَذِهِ الْحَالَةَ بَيَانِيّاً.



الشَّكْلُ ٦: تَرَكَبُ امَّوَاجٍ مُتساوية الطَّوَرِ وَالتَّوَاتُرِ.

تراكب الامواج ذات فارق الطور الثابت

تقيسُ كُلُّ مقاييسِ التداخلِ بصورةٍ أساسيةٍ الفوارقَ في طولِ المسارِ البصريِّ . وطولُ المسارِ البصريِّ هُوَ حاصلُ ضربِ مُعاملِ الانكسارِ في طولِ المسارِ الهندسيِّ :-

[١١-٢:٢]

$$\dots\dots \boxed{\text{ف} = \text{ل} \cdot \text{م}}$$

وَيُسَمَّى الفارقُ بَيْنَ طَوْلَيْ مَسَارَيْنِ بَصَرِيَّيْنِ بِفَارِقِ المسارِ البصريِّ . فإذا قَطَعْتَ حَزْمَتَانِ ضَوْئِيَتَانِ فِي مِقْيَاسِ التَّداخلِ مَسَافَتَيْنِ مُخْتَلِفَتَيْنِ فِي وَسْطِ وَاحِدٍ فَإِنَّ :-

[١٢-٢:٢]

$$\Gamma = \text{م} (\text{ل}_1 - \text{ل}_2) \dots\dots$$

وإذا قَطَعْنَا مَسَافَةً وَاحِدَةً فِي وَسْطَيْنِ مُخْتَلِفَيْنِ فَاِنَّ الفارقَ يَكُونُ :-

[١٣-٢:٢]

$$\Gamma = \text{ل}_1 \text{م}_1 - \text{ل}_2 \text{م}_2 = \text{ل} (\text{م}_1 - \text{م}_2) \dots\dots$$

وَيُقَاسُ فَارِقُ المسارِ البصريِّ بِوَحْدَاتِ الطولِ المَوْجِيِّ .

وَنَذْكُرُ أَنَّ زاويةَ الطورِ ϕ لِمَوْجَةٍ جِيبِيَّةٍ تَتَغَيَّرُ بِـ 360° أَوْ 2π زاويةً نصفَ قطريةٍ عَبْرَ مَسَافَةٍ تُسَاوِي طَوْلًا مَوْجِيًّا وَاحِدًا . وَلذا فإذا تَرَكَبْتَ مَوْجَتَانِ غَيْرُ متَفَقَتِي الطورِ فَإِنَّ المَسَافَةَ بَيْنَ النِقَاطِ المتناظرةِ تُسَاوِي الفَارِقَ بَيْنَ زَوَايَا الطورِ أَوْ الفَارِقَ فِي زاويةِ الطورِ $\phi_1 - \phi_2 = \delta$. وَيَرْتَبِطُ فَارِقُ المسارِ البصريِّ Γ بِفَارِقِ زاويةِ الطورِ δ بالمعادلةِ التالية :-

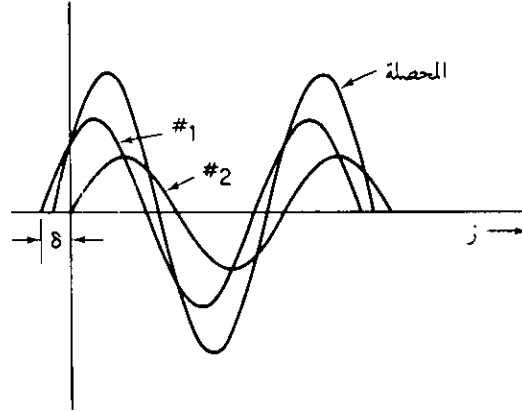
[٢٤-٢:٢]

$$\Gamma \frac{2\pi}{\lambda} = \delta , \frac{\lambda}{2\pi} \delta = \Gamma \dots\dots$$

وإذا كانت $\delta = 180^\circ$ أَوْ π زاويةً نصفَ قطريةٍ فلا يَكُونُ بَيْنَ المَوْجَتَيْنِ تَوَافُقٌ تَمَامًا ، وَتُلغِي كُلُّ مِنْهُمَا الأُخْرَى . وَعِنْدَمَا يَكُونُ $\delta > 180^\circ$ ، تَتَرَكَبُ المَوْجَتَانِ جُزْئِيًّا ، وَتَقْعُ السَعَةُ المحصلةُ بَيْنَ صِفَرٍ وَمَجْمُوعِ السَّعَتَيْنِ الابتدائِيَّتَيْنِ .

والموجة المحصلة هي مرة أخرى جيبية في شكلها - الشكل ٧. وإذا ما أُريدَ جَمْعُ عدة أمواج متساوية في السَّعة والتواتر ومُخْتَلِفَةٍ في الطور، فَإِنَّ الطريقةَ التحليليةَ تزدادُ صعوبةً باستمرارٍ، وَيُمْكِنُ استبدالُ الرسمِ البيانيِّ بها. افترضْ أَنَّ اضطراباً موجياً جِيبِيّاً يُعطى بالمعادلة التالية:-

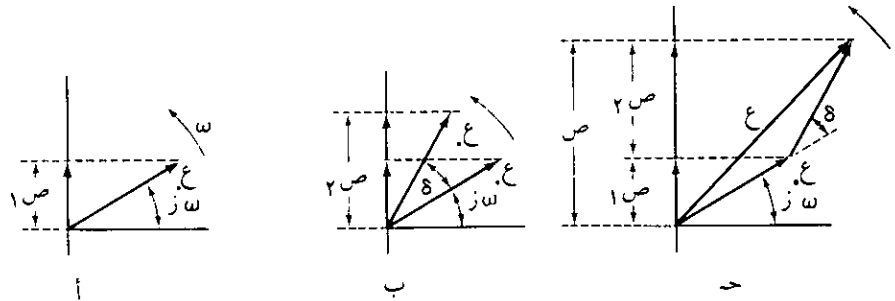
$$ص_١ = ع. جا \omega ز [١٥:٢:٢]$$



الشكل ٧: تراكب موجتين متساويتين في التواتر وبينهما فارق طور ثابت .

وَكَمَا قِيلَ سَابِقاً يُمَكِّنُ تَمَثُّلُ الْقِيَمَةِ الْحَالِيَّةِ لِلاضْطِرَابِ بِمُتَجِّهِ دَائِرٍ أَوْ مُتَجِّهِ الطَّوَرِ phasor - الشكل ٨. وَ يَدَوِّرُ هَذَا الْمُتَجِّهِ حَوْلَ نَقْطَةِ الْأَصْلِ فِي اتِّجَاهٍ ضِدِّ عَقَارِبِ السَّاعَةِ بِسُرْعَةٍ زَاوِيَّةٍ ω . افترضْ مَوْجَةً أُخْرَى ذَاتَ سَعَةٍ مِكَافِئَةٍ وَفَارِقِ طَوْرِ δ بِالنِّسْبَةِ إِلَى الْمَوْجَةِ الْأُولَى، فَإِنَّ مُعَادَلَتَهَا تَكُونُ:-

$$ص_٢ = ع. جا (\omega ز + \delta) [١٦:٢:٢]$$



الشكل ٨: (أ) سعة الموجه ع ممثلة بمتجه الطور، (ب) موجتان متساويتا السعة بفارق طور δ ، (ج) طريقة أخرى لرسم (ب).

وَبَيَانِيَا يَعْمَلُ الْمُتَجِّهُ الثَّانِي مَعَ الْأَوَّلِ زَاوِيَةً δ ، وَيُعْطِي عِنْدَ إِسْقَاطِهِ عَلَى الْمِخْوَرِ
الْصَادِقِي الْقِيَمَةَ ص_٢. وَيَكُونُ الْمَجْمُوعُ الْمُتَجِّهِي Vector Sum لِص_١ ، ص_٢ هُوَ مَجْمُوعُ
إِسْقَاطِيَّيِ الْمُتَجِّهَيْنِ الدَّائِرَيْنِ عَلَى الْمِخْوَرِ الْصَادِقِي؛ وَمِنْ ثَمَّ يُمَكِّنُ الْحَصُولُ عَلَى السَّعَةِ
الْحَاصِلَةِ (مَحْصَلَةِ السَّعَةِ) بَيَانِيَا أَوْ مِنْ قَانُونِ جَيْبِ التَّمَامِ.

وَعَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ، فَعِنْدَ جَمْعِ الْمَعَادَلَتَيْنِ [١٥-٢:٢] ، [١٦-٢:٢] نَحْصُلُ عَلَى
مُحْصَلَةِ السَّعَةِ:-

$$\text{ص} = \text{ع} . [\text{جا } \omega + \text{جا } (\omega + \delta)] \dots\dots [١٧-٢:٢]$$

وَبِاسْتِخْدَامِ مُتطَابِقَةِ مَجْمُوعِ الْجَيْبَيْنِ يُمَكِّنُ التَّعْبِيرُ عَنْ مَحْصَلَةِ السَّعَةِ بِ:-

$$\text{ص} = \text{ع} . ٢ \text{ جتا } \frac{\delta}{٢} \text{ جا } (\omega + \frac{\delta}{٢}) \dots\dots [١٨-٢:٢]$$

وَتُظْهِرُ الْمَعَادَلَةُ الْأَخِيرَةُ أَنَّ الْمَوْجَةَ الْحَاصِلَةَ هِيَ مَرَّةً أُخْرَى مَوْجَةً تَوَافُقِيَّةً بَسِيطَةً لَهَا نَفْسُ
تَوَافُرِ الْمَوْجَتَيْنِ الْمُشْهِمَتَيْنِ .

وَفِي تَجْرِبَةِ الشَّقَيْنِ الْكِلَاسِيكِيَّةِ تَكُونُ سَعَتَا الضَّوءِ الْمَارَّ بِالشَّقَيْنِ مُتَسَاوِيَتَيْنِ . وَإِذَا كَانَ
فَارَقُ الطُّورِ بَيْنَ حُرْمَتِي الضَّوءِ مِنَ الشَّقَيْنِ δ مُسَاوِيَاً صَفْراً أَوْ ٢ ط أَوْ ٤ ط أَوْ ... ، فَإِنَّ
الْأَمْوَاجَ تَكُونُ مُتَّحِدَةً الطُّورِ وَتَتَدَعَّمُ ، وَتَكُونُ الشَّدَّةُ مُتَنَاسِبَةً مَعَ (ع + ١ع) ٢ أَوْ:-

$$\text{ش العظمى} = \text{ش}_١ + \text{ش}_٢ + ٢ \sqrt{\text{ش}_١ \text{ش}_٢} \dots\dots [١٩-٢:٢]$$

وَهَذَا يَعْنِي أَنَّ شَدَّةَ النِّهَايَاتِ الْعُظْمَى هِيَ أَرْبَعَةُ أَضْعَافِ الشَّدَّةِ مِنْ أَيِّ مِنَ الشَّقَيْنِ .
وَمِنْ نَاحِيَةٍ أُخْرَى، فَإِذَا كَانَتْ $\delta = \text{ط}$ ، ٣ط ، ٥ط ، ... ، كَانَتْ الْأَمْوَاجُ مُخْتَلِفَةً الطُّورِ
بِمَقْدَارِ ١٨٠°، وَلِذَا فَهِيَ تَتَعَادَلُ؛ وَتَكُونُ الشَّدَّةُ مُتَنَاسِبَةً مَعَ (ع - ١ع) ٢، أَي:-

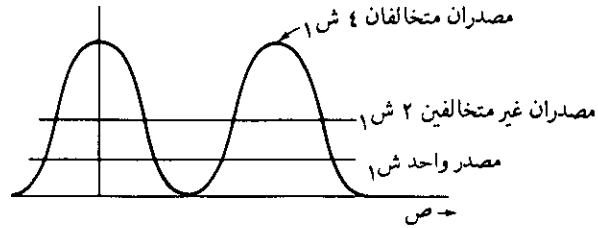
$$\text{ش الصغرى} = \text{ش}_١ + \text{ش}_٢ - ٢ \sqrt{\text{ش}_١ \text{ش}_٢} \dots\dots [٢٠-٢:٢]$$

* الْحُرُوفُ الْغَامِقَةُ اللَّوْنُ تُشِيرُ إِلَى كَمِيَّاتٍ مُتَجِّهَةٍ .

وهكذا، فعندما تكون $ش_1 = ش_2$ تبلغ الشدة عند النهايات الصغرى صفراً. وعندما يكون فارق زاوية الطور مساوياً δ فإن الشدة تساوي :-

$$ش = ش_1 (1 + جتا \delta) = ش_2 (1 + جتا \delta) \dots\dots [2:2-21]$$

وإذا نظرنا الآن إلى الشكل ٩ نجد أن كل حزمة تسقط وحدها على الستارة تسهم بشدة مقدارها $ش_1$. ولذا فحين دون تداخل وعندما $ش_1 = ش_2$ تساوي الشدة من الشقين $ش_1$ ، وتوزع بانتظام على الستارة. ولكن إذا تداخل الضوء من الشقين تكون النهاية الصغرى للشدة صفراً والنهاية العظمى لها $ش_4$ ؛ إلا أن متوسط الشدة عبر منط التداخل على الستارة يظل $ش_1$. وكما أشرنا سابقاً، فإن الطاقة في التداخل لا تخلق ولا تفتنى، وإنما يعاد توزيعها فقط.



$ط$	$ط_2$	$ط_3 = \delta$
$\frac{\lambda}{4}$	λ	$\frac{\lambda}{4} = \gamma$
ساطع	معتم	معتم

الشكل ٩: توزيع الشدة الناتجة من مصدر واحد ومن مصدرين غير متخالفين ومصدرين متخالفين.

تراكب الامواج ذات فارق الطور العشوائي

وأخيراً، إذا تداخلت سلسلة من الأمواج ذات تواتر واحد وفارق طور عشوائي تماماً، فإن :-

$$\sum_{n=1}^N ع^2 = ع^2 + ع^2 + ع^2 + \dots + ع^2 \dots\dots [2:2-22]$$

ويعني ذلك أن متوسط الشدة هي مجموع شدات الأمواج المنفردة. وباختصار، فعندما تكون العلاقة بين أطوار الأمواج العشوائية، فإننا نحصل على الشدة الكلية بإضافة شدات الأمواج المسهمة، ولا نحصل عليها بإضافة سعاتها أولاً ثم تربيع مجموع السعات الحاصل.

المسائل

- ١-٢:٢ استخدم ضوء طول موجته $\lambda = 600$ نـم لإحداث تداخل في تجربة الشقين. فإذا كانت المسافة بين مركزي الشقين $0,7$ مم وكانت الستارة على بعد $0,5$ م منهما. فجد المسافة بين أي هذين مُتتاليين.
- ٢-٢:٢ سَقَطَ ضوءٌ أحاديُّ الموجة على شقين: المسافة بينهما من مركزيهما $1,2$ مم. وكانت المسافة بين أي هذين مُتتاليين على ستارة تبعد $0,5$ م عنهما $0,3$ سم. جد الطول الموجي ولون الضوء.
- ٣-٢:٢ يُكَوِّنُ ضوء طولُه الموجي 600 نـم أهداب تداخل على ستارة تبعد $1,20$ م، فإذا كان الشقان على بُعد $0,2$ مم من بعضهما بعضاً، فجد المسافة بين النهاية العظمى المركزية وكل من: (أ) النهاية العظمى ذات الرتبة الثالثة (ب) النهاية الصغرى ذات الرتبة الثالثة.
- ٤-٢:٢ يُصْدِرُ هَوَائِيَا رَادِيو أَمْوَاجاً تَوَاتُرُهَا 750 كيلوهرتز. (أ) جد الطول الموجي للأمواج (ب) إذا كانت المسافة بين الهوائيين 100 م في الاتجاه الأفقي وكان الهوائيان يهتزآن بطورٍ واحدٍ، فجد عدد النهايات العظمى التي يُمكن استقبالها في مدى معقول في نقاط على دائرة حول الهوائيين وقرب سطح الأرض.
- ٥-٢:٢ أضيء شقان المسافة بينهما $0,25$ مم بضوءٍ يحتوي على طولين موجيين: 450 نـم و 600 نـم. ما أقل مسافة تقاس من الرتبة الصغرى تقع فيها النهاية العظمى لإحدى الموجتين على النهاية الصغرى للموجة الثانية، علماً بأن الستارة وُضِعَتْ على بُعد 4 م من الشقين؟
- ٦-٢:٢ أضيء شقان بضوءٍ يحتوي على طولين موجيين: أحدهما يبلغ 550 نـم. فإذا وقعت النهاية الصغرى من الرتبة الرابعة للطول الموجي 550 نـم تماماً على النهاية العظمى من الرتبة الثالثة للطول الموجي الآخر، فجد الطول الموجي للضوء غير المعروف.
- ٧-٢:٢ شقان ضيقان المسافة بينهما $0,3$ مم، أضيئا بضوء أحادي الموجة. فإذا كانت المسافة بين النهايتين الصغريتين من الرتبة الخامسة على جانبي مركز الأهداب تبلغ $2,78$ سم على ستارة تبعد $1,2$ م من الشقين، فجد الطول الموجي للضوء.

- ٨-٢:٢ تَحَيَّلَ فِي تَجْرِبَةِ الشَّقِينِ أَنَّكَ وَضَعْتَ فِيلْمًا رَقِيقًا أَمَامَ أَحَدِ الشَّقِينِ لِتُحَدِّثَ فَارِقًا فِي الطَّوْرِ مَقْدَارُهُ ١٨٠ أَوْ طَ زَاوِيَةً يُصَفِّ قُظْرِيَّةً. بَيِّنْ كَيْفَ تَتَغَيَّرُ الْأَهْدَابُ. اسْتَقْنِ مُعَادَلَةَ النِّهَايَاتِ الْعُظْمَى لِلتَّدَاخُلِ فِي هَذِهِ الْحَالَةِ.
- ٩-٢:٢ تَصَوِّرْ أَنَّ تَدَاخُلَ الضَّوْعِ مِنَ الشَّقِينِ فِي تَجْرِبَةِ يُونِغْ قَدْ تَمَّ فِي الْمَاءِ، فَكَيْفَ تَتَغَيَّرُ الْأَهْدَابُ. أَعْرِضْ اسْتِنْتَاجَكَ فِي صُورَةِ قِيَمَةٍ عَدَدِيَّةٍ.
- ١٠-٢:٢ عِنْدَ تَغْطِيَةِ أَحَدِ الشَّقِينِ فِي تَجْرِبَةِ التَّدَاخُلِ لِيُونِغْ بِفِيلْمٍ رَقِيقٍ مِنْ مَادَّةٍ شَفَافَةٍ، شَهِدْتَ أَنَّ الرَّتْبَةَ الصَّفْرِيَّةَ قَدْ أَزْيَحَتْ مَسَافَةً تُسَاوِي ٢,٢ هُدْبًا. فَإِذَا كَانَ مُعَامِلُ انْكَسَارِ الْمَادَّةِ ١,٤ وَالطَّوْلُ الْمَوْجِيُّ لِلضَّوْعِ ٥٠٠ نَم، فَجِدْ سُمْكَ الْفِيلْمِ.
- ١١-٢:٢ يَبْتَثُ قَمَرٌ صِنَاعِيٌّ يَدُورُ حَوْلَ الْأَرْضِ أَمْوَاجَ الْمَيَكْرُووِيْفِ الَّتِي طَوْلُهَا ١٥ سَم. وَعِنْدَمَا كَانَ الْقَمَرُ فَوْقَ مَحْطَةٍ أَرْضِيَّةٍ لَهَا هَوَائِيَّانِ الْمَسَافَةُ بَيْنَهُمَا ١٠٠ م وَمَوْضُوعَانِ فِي مُسْتَوَى مَدَارِ الْقَمَرِ، اسْتَقْبَلَتْ إِشَارَةً تَتَذَبَذَّبُ فِي شِدَّتِهَا بَزْمِنِ دَوْرَةٍ قَدْرُهُ $\frac{1}{4}$ ثَانِيَةٍ. فَإِذَا عَرَفْنَا أَنَّ ارْتِفَاعَ الْقَمَرِ ٤٠٠ كَم، فَجِدْ سُرْعَةَ الْقَمَرِ الصِّنَاعِيِّ بِإِهْمَالِ تَحْدَبِ الْأَرْضِ.
- ١٢-٢:٢ يَمُرُّ الضَّوْعُ الصَّادِرُ مِنْ شَيْءٍ مُنْفَرِدٍ فِي مَوْشُورٍ قُرْنَلِ الثَّنَائِيِّ، وَيُعْطِي ضَوْعًا طَوْلُهُ الْمَوْجِيُّ ٥٥٠ نَم أَهْدَابًا عَلَى سِتَارَةٍ تَبْعُدُ ١,٢ م. فَإِذَا كَانَتِ الْمَسَافَةُ بَيْنَ أَيِّ هُدْبَيْنِ مُتَتَابِلَيْنِ مِنْهَا ٠,٤ مَم، فَجِدِ الْمَسَافَةَ بَيْنَ مَصْدَرِي الضَّوْعِ الْوَهْمِيِّينِ.
- ١٣-٢:٢ اَعْمَلْ رَسْمًا لِتَجْرِبَةِ مَرَاةٍ لَوْنِيَّةٍ، وَسَمِّ مَسَافَةَ الْمَصْدَرِ - الْمَرَاةِ - الْمَشَاهِدِ ل ١ وَالْمَسَافَةَ الْمُبَاشَرَةَ الْمَصْدَرِ - الْمَشَاهِدِ ل ٢. (أ) بِدَلَالَةِ هَاتَيْنِ الْمَسَافَتَيْنِ، جِدْ الشَّرْطَ اللَّازِمَ لِمُشَاهَدَةِ نِهَايَةِ تَدَاخُلِ عَظْمَى آخِذًا بِعَيْنِ الْإِعْتِبَارِ أَنَّ هُنَاكَ تَغْيِيرًا فِي الطَّوْرِ قَدْرُهُ ١٨٠ بَعْدَ الْإِنْعِكَاسِ (ب) مَا الشَّرْطُ اللَّازِمُ لِلْحُصُولِ عَلَى النِّهَايَاتِ الصُّغْرَى.
- ١٤-٢:٢ عَدْسَةٌ بِلْتِ الْمَشْطُورَةُ هِيَ عَدْسَةٌ مُجْمَعَةٌ عَادِيَّةٌ قُطِعَتْ إِلَى نِصْفَيْنِ عِنْدَ قُظْرِيَّهَا، ثُمَّ لُجِمَ النِّصْفَانِ مَعًا بِالْإِسْمَنْتِ. وَبِسَبَبِ سُمْكِ الْإِسْمَنْتِ فَإِنَّ التَّصْفِيْنَ يَنْفَصِلَانِ قَلِيلًا. افْتَرِضْ أَنَّ الْبُعْدَ الْبُورِيَّ لِلْعَدْسَةِ ٢٥ سَم، وَأَنَّ الْعَدْسَةَ تَبْعُدُ ٥٠ سَم عَنْ مَصْدَرِ الضَّوْعِ النَّقْطِيِّ. فَإِذَا شَهِدْتَ الْأَهْدَابَ مُنْفَصِلَةً عَنْ بَعْضِهَا بَعْضًا بِمَسَافَةِ ١ مَم عَلَى سِتَارَةٍ تَبْعُدُ ١,٥ مَم مِنَ الْعَدْسَةِ عِنْدَ اسْتِخْدَامِ الضَّوْعِ الْأَحْمَرِ الَّذِي طَوْلُهُ الْمَوْجِيُّ ٦٥٠ نَم، فَجِدْ سُمْكَ الْإِسْمَنْتِ.

- ١٥-٢:٢ يُمكنُ عَرَضُ تجربةِ مِرآةٍ لوئِدَ باستخدامِ أمواجِ الميكروويفِ المُتَعَكِّسَةِ عَنْ قِطْعَةٍ كَبِيرَةٍ مِنْ لَوْحٍ مَعْدِنِيٍّ مَوْضُوعٍ عَلَى طَاوِلَةٍ. فَإِذَا كَانَ تَوَاتُرُ الْمَصْدَرِ ٢٠ جِيغا هرتز وَكَانَ عَلَى ارْتِفَاعِ ٥ سَمِ مِنَ اللَّوْحِ، فَجِدَ ارْتِفَاعَ النِّهَايَاتِ الْعُظْمَى الْأُولَى الثَّلَاثِ فَوْقَ اللَّوْحِ وَعَلَى بُعْدِ ٤ م مِنَ الْمَصْدَرِ.
- ١٦-٢:٢ مَوْشُورُ فَرِنَلٍ الثَّنَائِيُّ لَهُ زَاوِيَتَا رَأْسٍ تَبْلُغُ كُلُّهُمَا ٢ وَمُصْنُوعٌ مِنْ زُجَاجٍ مُعَامِلُ انْكِسَارِهِ ١,٥. فَإِذَا وُضِعَ الْمَوْشُورُ عَلَى بُعْدِ ٢٠ سَمِ مِنْ مَصْدَرِ ضَوْءٍ أَحْمَرَ طَوْلُهُ الْمَوْجِي $\lambda = ٦٥٠$ نَمٍ وَعَلَى بُعْدِ ١ م مِنَ السَّتَارَةِ. فَجِدَ الْمَسَافَةَ بَيْنَ أَيِّ هُدْبَتَيْنِ مُتَتَالِيَيْنِ عَلَى السَّتَارَةِ.
- ١٧-٢:٢ أَرَسُمُ شَكْلًا يُبَيِّنُ مَوْجَتَيْنِ مُنْفَصِلَتَيْنِ بِاسْتِخْدَامِ نَفْسِ مَنَظُومَةِ الْإِحْدَاثِيَّاتِ، عِلْمًا أَنَّ لَهُمَا نَفْسَ الطَّوْلِ الْمَوْجِيَّ وَسَعَتِيَّ اهْتِرَازِيَّ نِسْبَةِ ١:٢. ثُمَّ اجْمَعِ سَعَتِيَّ الْاهْتِرَازِ، وَأَرَسُمِ الْمَوْجَةَ الْحَاصِلَةَ مِنْ ذَلِكَ. (أ) وَعَلَى نَفْسِ الرَّسْمِ اعْمَلْ نَفْسَ الشَّيْءِ لِمَوْجَتَيْنِ مُتَسَاوِيَتَيِ السَّعَةِ وَطَوْلَاهُمَا الْمَوْجِيَّانِ بِنِسْبَةِ ١:٢ (ب) وَأَخِيرًا أَرَسُمِ الْمَوْجَةَ الْحَاصِلَةَ مِنْ مَوْجَتَيْنِ مُتَسَاوِيَتَيِ السَّعَةِ وَالطَّوْلِ الْمَوْجِيَّ، لِكَيْتَهُمَا مُخْتَلِفَتَانِ فِي الطَّوْرِ بِمِقْدَارِ ٩٠°.
- ١٨-٢:٢ جُمِعَتِ مَوْجَتَانِ جَيِّبِيَّتَانِ طَوْلَاهُمَا الْمَوْجِيَّانِ مُتَسَاوِيَانِ وَالنِّسْبَةُ بَيْنَ سَعَتَيْهِمَا مِثْلُ نِسْبَةِ ٥:٣. فَإِذَا كَانَ بَيْنَ الْمَوْجَتَيْنِ فَارِقٌ فِي الطَّوْرِ يُقَدَّرُهُ $\frac{3}{4}$ ط، فَابْتَغِ الرَّسْمَ الْمُتَّجِهيَّ، جِدِ السَّعَةَ الْحَاصِلَةَ وَفَارِقَ الطَّوْرِ بَيْنَ الْحَاصِلَةِ وَكُلِّ مِنَ الْمَوْجَتَيْنِ.
- ١٩-٢:٢ جُمِعَتِ حَرَكَتَانِ مَوْجِيَّتَانِ تَوَافِقِيَّتَانِ: $v_1 = جاس$ ، $v_2 = \frac{1}{4}جا$ س.
- (أ) اكْتُبْ مَعَادِلَةَ مُحَصَّلَةِ الْحَرَكَتَيْنِ الْمَوْجِيَّتَيْنِ.
- (ب) جِدْ زَمَنَ دَوْرَةِ الْمَوْجَةِ الْحَاصِلَةِ.
- (ج) أَرَسُمِ رَسْمًا لِلْمَوْجَتَيْنِ وَلِمُحَصَّلَتَيْهِمَا.
- ٢٠-٢:٢ اسْتَمِرَّ بِالسَّأَلَةِ ١٩-٢:٢ وَجِدْ: (أ) الْمَمَاسَاتِ الْأَفْقِيَّةَ لِلْمَوْجَةِ الْمُحَصَّلَةِ (ب) نِقَاطَ الْالتَوَاءِ points of inflection لِلْمَوْجَةِ الْمُحَصَّلَةِ.

الفصل ٢ : ٣

حيود فرونفوفر

Fraunhofer Diffraction

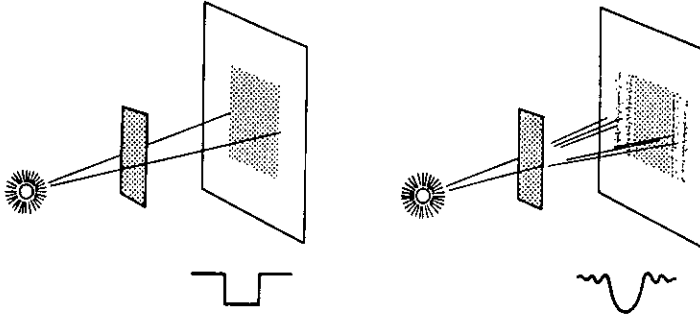
عندما يَمُرُّ الضوءُ في شِقِّ ضَيِّقٍ، فَإِنَّهُ يَنْتَشِرُ في مَدَى أَكْبَرَ مِمَّا يُمَكِّنُ تَفْسِيرُهُ بالرَّسْمِ الهَنْدَسِيِّ. وَهَذَا الانْتِشَارُ مِثَالٌ عَلَى الْحَيُودِ. وَ يُمَكِّنُ تَعْرِيفُ الْحَيُودِ بِأَنَّهُ أَيُّ انْحِرَافٍ عَنِ الانْتِشَارِ الْمُسْتَقِيمِ (أَيُّ فِي خُطُوطٍ مُسْتَقِيمَةٍ) لَا يُمَكِّنُ تَفْسِيرُهُ بِالْانْعِكَاسِ أَوِ الْانكِسَارِ.

وَصَفَتْ عَامَ لِلْحَيُودِ

دَعْنَا نَفَكِّرْ مَرَّةً أُخْرَى فِي الظِّلِّ الَّذِي دَرَسْنَاهُ مُنْذُ مَدَّةٍ مِنْ وَجْهَةِ النَّظَرِ الْبَصَرِيَّةِ الْهَنْدَسِيَّةِ. فَمِنْ مَقْصِدِ نَقْطَةٍ، وَهُوَ مَا لَا يُمَكِّنُ تَوْفِيرُهُ عَمَلِيًّا، يَكُونُ لِلظِّلِّ حَدُودٌ وَاضِحَةٌ مُعْرِفَةٌ تَمَامًا - الشَّكْلُ ١ - إِلَى الْيَسَارِ. وَتَكْشِفُ الْمَلَاخِظَةُ الدَّقِيقَةُ أَنَّ ذَلِكَ لَيْسَ صَحِيحًا مِنْ نَاحِيَةٍ وَاقِعِيَّةٍ؛ إِذْ تَقَلُّ الْإِضَاءَةُ دَاخِلَ الظِّلِّ تَدْرِجًا. كَذَلِكَ تَوْجَدُ خَارِجَ الْحَدِّ الْهَنْدَسِيِّ لِلظِّلِّ مَنَاطِقٌ مُتَعَابِقَةٌ مِنَ الْإِضَاءَةِ الْعَالِيَةِ وَالْمُنْخَفِضَةِ تُسَمَّى بِأَهْدَابِ الْحَيُودِ - الرَّسْمُ إِلَى الْيَمِينِ مِنَ الشَّكْلِ ١.

إِنَّ أَوَّلَ مَنْ لَاحَظَ مِثْلَ هَذِهِ الْأَهْدَابِ هُوَ فِرَانْسِيْسْكُو جِرِمَالْدِي * الَّذِي سَمَحَ لِضَوْءِ الشَّمْسِ بِالدُّخُولِ إِلَى غُرْفَةٍ مُظْلِمَةٍ عَبْرَ فَتْحَةٍ فِي سِتَارَةٍ، وَوَجَدَ أَنَّ الظِّلَّ الَّذِي كَوَّنَهُ جِسْمٌ صَغِيرٌ كَانَ أَغْرَضَ مِنَ الْمَتَوَقَّعِ، كَمَا كَانَ مُحَاطًا بِأَهْدَابٍ مَلَوْنَةٍ. وَنَشَرَ مُكْتَشَفَاتِ جِرِمَالْدِي صَدِيقٌ لَهُ بَعْدَ سَنَتَيْنِ مِنْ وَفَاتِهِ فِي كِتَابٍ تَرْجَمَهُ عَنْوَانُهُ هِيَ « فِيزِيَاءُ الضَّوِّ وَالْأَلْوَانِ وَالْبَصَرِ ».

* فِرَانْسِيْسْكُو مَارِيَا جِرِمَالْدِي Franciscus Maria Grimaldi (١٦٦٣-١٦٦٣): عَلَّمَ الْخُطَابَةَ، الْفِيزِيَاءَ، وَالرِّيَاضِيَّاتِ فِي كَلِيَّةِ الرِّهْبَنَةِ الْيَسُوعِيَّةِ فِي بُولُونِيَا بِإِيطَالِيَا. وَالْجُمْلَةُ الْهَامَّةُ فِي الْكِتَابِ الْمَشَارِ إِلَيْهِ تَقْرَأُ: (يَنْتَشِرُ الضَّوُّ مَبَاشَرَةً لَيْسَ بِالْانْعِكَاسِ وَالْانكِسَارِ فَحَسَبَ وَإِنَّمَا أَيْضًا إِلَى دَرَجَةٍ مَا بِالْحَيُودِ).



الشكل ١: الظل في البصريات الهندسية (الرسم الى اليسار) والبصريات الموجية (الرسم الى اليمين). أما رسماً تغير الاضاءة عبر الظل فيظهران في الاسفل.

وَنُمَيِّزُ هُنَا بَيْنَ نوعين من الحيود: **حيود فرونهورف وحيود فِرِنل** . إِنَّ **حيود فِرِنل** هو الأعم، إِذْ يَشْمَلُ حَقِيقَةً كُلَّ أَشْكَالِ **حيود فرونهورف**. وَلَكِنَّ **حيود فرونهورف** أَسهَلُ عَرْضاً، وَلِذَا فَإِنَّهُ يُنَحِّثُ عَادَةً أَوَّلًا.

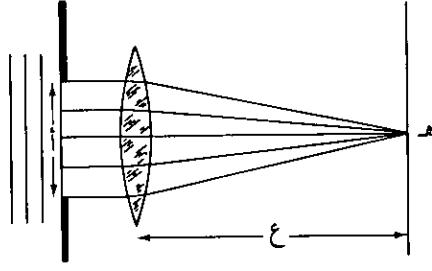
وَيَنْتُجُ **حيود فرونهورف** عِنْدَمَا يَقْتَرِبُ الضُّوءُ مِنْ عَقَبَةٍ أَوْ ثُقْبٍ أَوْ يُعَادِرُهَا فِي صُورَةِ جِهَاتٍ مَوْجِيَّةٍ مُسْتَوِيَّةٍ، حَيْثُ يَكُونُ مَصْدَرُ الضُّوءِ وَمُسْتَوَى الْمَشَاهِدَةِ فِي مَا لَانْهَائَةٍ حَقِيقَةً. أَمَّا فِي **حيود فِرِنل** فَيَكُونُ الْمَصْدَرُ أَوْ الْمَشَاهِدُ أَوْ كِلَاهُمَا عَلَى مَسَافَةٍ مَحْدُودَةٍ. وَيُشَاهَدُ **حيود فرونهورف** فِي أَفْضَلِ صُورَةٍ بِجَعْلِ الضُّوءِ التَّوَازِي يَسْقُطُ عَلَى عَقَبَةٍ أَوْ فَتْحَةٍ ثُمَّ النَّظَرُ عَبْرَهَا، وَلَيْسَ إِلَيْهَا، بِوَسَاطَةِ تَلْسَكُوبٍ مُرَكِّزٍ عَلَى مَا لَانْهَائَةٍ.

حيود فرونهورف من شقٍ منفردٍ Fraunhofer Diffraction at a single slit

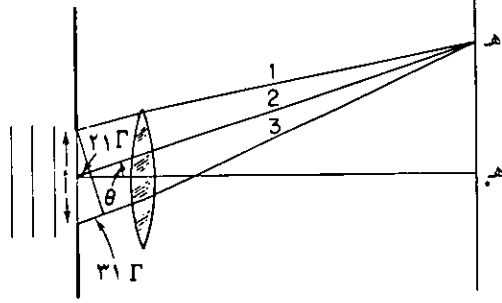
نهايات الحيود الصغرى

فِي الشَّكْلِ ٢ تَسْقُطُ الْجِبَهَاتُ الْمَوْجِيَّةُ الْمُسْتَوِيَّةُ عَلَى شَقٍّ طَوَّلِيٍّ عَرْضُهُ أ. وَيَكُونُ لِجَمِيعِ الْأَشْعَةِ الْخَارِجَةِ مِنَ الشَّقِّ نَفْسُ طَوْلِ الْمَسَارِ الْبَصَرِيِّ بَعْضَ النَّظَرِ عَنِ الْعَدْسَةِ الَّتِي تَمُرُّ فِيهَا. وَلَمَّا كَانَتِ الْأَشْعَةُ مُتَّفَقَةً الطَّوْرَ دَاخِلَ الثَّقْبِ، فَإِنَّهَا سَتَكُونُ مُتَّفَقَةً الطَّوْرَ أَيْضاً عِنْدَ النِّقْطَةِ هـ.، وَهِيَ النِّقْطَةُ الَّتِي يَكُونُ عِنْدَهَا لَتَمِطُ الْحَيُودِ نِهَائِيَّةً عَظْمَى.

* جوزف فرونهورف Joseph Fraunhofer (١٧٨٧-١٨٢٦): بدأ حياته فنيَّ بصريات في بِنْدَكْت - بِيْرْن قرب ميونخ في المانيا، وصنع محزوزات الحيود الاولى، واكتشف خطوط فرونهورف في طيف الشمس والكواكب.



الشكل ٢: النهاية العظمى المركزية في حيود فرونفوفر



الشكل ٣: حيود فرونفوفر

وَبَعْدَ ذَلِكَ نَسْأَلُ تَحْتَ أَيِّ شَرْطٍ تَحْدُثُ النِّهَايَةُ الصَّغْرَى . إِنَّ النِّهَايَةَ الصَّغْرَى تَحْدُثُ عِنْدَمَا تَكُونُ نَقْطَةً مِثْلُ هـ أَبْعَدَ عَنْ أَحَدِ جَانِبَيْ الثُّقْبِ بِمَسَافَةٍ مَا ، وَعِنْدَمَا يَكُونُ طَوَلَا الْمَسَارَيْنِ لِلشَّعَاعَيْنِ الضَّوئِيَّيْنِ مِنْ جَانِبِي الشَّقِّ إِلَى هـ يَخْتَلِفَانِ بِمَسَافَةٍ $\frac{1}{2}$ طَوَلِ مَوْجَةٍ . افْتَرِضْ كَمَا فِي الشَّكْلِ ٣ أَنَّ الضَّوءَ الْمَارَّ بِمَرْكَزِ الثُّقْبِ يَعْمَلُ زَاوِيَةً θ مَعَ الْمَحْوَرِ الْبَصَرِيِّ . وَمِنْ الْمُمْكِنِ أَنْ تَكُونَ الزَاوِيَةُ θ مِنْ مَقْدَارٍ مَنَاسِبٍ ، بِحَيْثُ يَكُونُ فَارَقُ الْمَسَارِ Γ بَيْنَ الشَّعَاعَيْنِ ١ وَ ٢ يُسَاوِي $\frac{1}{4}$ طَوَلِ مَوْجَةٍ وَذَلِكَ لِعَرَضِ مُعَيَّنٍ لِلثُّقْبِ . وَعِنْدَهَا فَلَا يَصِلُ النِّقْطَةُ هـ إِلَى ضَوْءٍ ؛ لِأَنَّ الشَّعَاعَيْنِ ١ وَ ٢ يَكُونَانِ مُخْتَلِفِي الطَّوَرِ بِفَارَقٍ يُسَاوِي 180° ، فَيُلْغِي كُلُّ مَنِهْمَا الْآخَرَ . وَبَصُورَةٍ عَامَّةٍ يُلْغَى أَيُّ شُعَاعٍ ضَوْئِيٍّ يَمُرُّ عَبْرَ النِّصْفِ الْعُلَوِيِّ مِنَ الثُّقْبِ بِشُعَاعٍ مُنَاطِرٍ يَمُرُّ فِي النِّصْفِ السُّفْلِيِّ وَيَبْعُدُ عَنْهُ مَسَافَةً $\frac{1}{4}$.

وَتُسَمَّى النِّقْطَةُ هـ النِّهَايَةُ الصَّغْرَى الْأُولَى أَيْ النِّهَايَةُ الصَّغْرَى مِنَ الرِّتَبَةِ الْأُولَى . وَتَحْدُثُ النِّهَايَةُ الصَّغْرَى الْأُولَى كُلَّمَا كَانَ :-

$$\lambda \frac{1}{4} = r_1 \Gamma'$$

$$\lambda = \lambda_1 \Gamma$$

$$\frac{\lambda_1 \Gamma}{\lambda} = \theta \quad \text{فإن جا } \theta$$

وَلَدَلِك نَحْصَلُ عَلَى :-

$$\lambda = \theta$$

وَعَلَى نَحْوِ مِثَالٍ، نَكُونُ هُنَالِكَ نِهَايَاتِ صُغْرَى أُخْرَى عَلَى السِتَارَةِ كُلَّمَا كَانَ $\lambda_1 \Gamma$ مُضَاعَفًا صَحِيحًا لِلطُّوْلِ الْمَوْجِي λ :

[٢:٣-١]

$$\lambda \pm n = \theta \quad \text{أجا } \theta$$

حيث $n = 1, 2, 3, \dots$

وَهِيَ الْمَعَادَلَةُ الْعَامَّةُ لِلنِّهَايَاتِ الصُّغْرَى فِي حُيُودِ فِرُونِهَوْفَرٍ مِنْ شَقٍّ مَنفَرِدٍ. إِنَّ الْمَسَافَةَ بَيْنَ الثُّقْبِ الْمُحَيَّدِ وَالْعَدْسَةِ الْجَامِعَةِ لَا تَهْمُ، إِذْ لَا يَتَغَيَّرُ نَمَطُ الْحَيُودِ إِذَا تَغَيَّرَتْ هَذِهِ الْمَسَافَةُ. وَبِزِيَادَةِ الْمَسَافَةِ يُخْتَصِّرُ مَجَالُ النَّظَرِ فَقَطْ، فَتُخَجَّبُ الْأَهْدَابُ الْخَارِجِيَّةُ. وَيُمْكِنُ تَبْيَانُ أَنَّ هَنْدَسَةَ الْأَهْدَابِ لَا تَتَغَيَّرُ حَقًّا بِالْمَحَاكِمَةِ التَّالِيَةِ :-

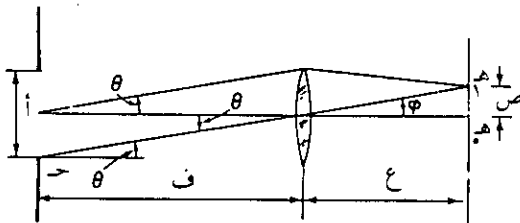
يَتَّبَعُ مِنَ الشَّكْلِ ٤ أَنَّ $\theta = \varphi$ ؛ وَمِنْ شَرِطِ النِّهَايَةِ الصُّغْرَى فِي حُيُودِ فِرُونِهَوْفَرٍ يَتَّبَعُ أَنَّ :-

$$\text{جا } \theta = \frac{n \lambda}{\sqrt{v^2 + c^2}} = \frac{n \lambda}{v}$$

وَبِحَلِّ الْمَعَادَلَةِ لَا يَجَادِ ص، نَحْصَلُ عَلَى :-

[٢:٣-٢]

$$v = \frac{n \lambda}{\sqrt{v^2 + c^2}} \quad \dots\dots$$



الشكل ٤ : المسافة بين الشق والعدسة الجامعة لا تغير من هندسة الاهداب .

وَتَعْنِي هَذِهِ الْمَعَادَلَةُ أَنَّ الْمَسَافَةَ ص وَهِيَ مَسَافَةُ هُدْبٍ مَا عَلَى السَّتَارَةِ مِنْ مَرَكِزِ نَمِطِ الْأَهْدَابِ لَا تَعْتَمِدُ عَلَى الْمَسَافَةِ ف أَي الْمَسَافَةِ بَيْنَ الثُّقْبِ الْمُحَيَّدِ وَالْعَدَسَةِ اللَّامَةِ .

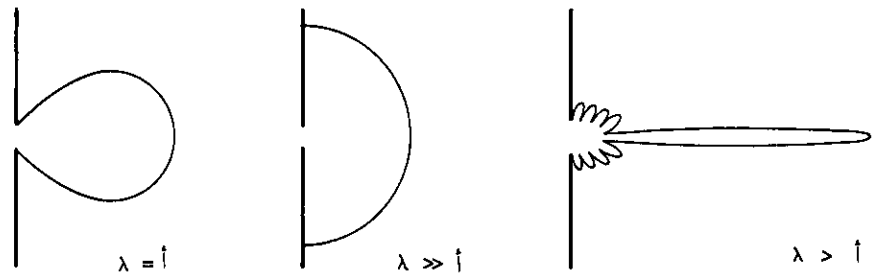
عِلَاقَةُ الْحَيُودِ بِعَرَضِ الشَّقِّ

يَتَّبَعُ مِنَ الْمَعَادَلَةِ [٢: ٣-١] أَنَّ زَاوِيَةَ الْحَيُودِ تَزْدَادُ بِتَضْيِيقِ الشَّقِّ وَأَنَّ قِيَمَةَ θ لِشَقِّ عَرِيفٍ صَغِيرَةٍ جَدًّا .

وَعِنْدَمَا تَكُونُ: $\lambda = \lambda$ ، $\lambda = \lambda$ ، فَإِنَّ: $\lambda = \lambda$.

وَيَعْنِي ذَلِكَ أَنَّ النِّهَايَةَ الصَّغْرَى الْأُولَى تَحْدُثُ عَلَى زَاوِيَةِ ٩٠° مِنَ الْمَحْوَرِّ الْبَصْرِيِّ - الشَّكْلِ ٥ ، الرَّسْمُ إِلَى الْيَسَارِ . وَعِنْدَمَا $\lambda \rightarrow 0$ صَفَرٍ يَقْتَرِبُ تَوَازِيْعُ الشَّدَةِ مِنْ شَكْلِ نِصْفِ الْكَرَةِ - الشَّكْلِ ٥ ، الرَّسْمُ فِي الْوَسْطِ . وَلِثُقْبٍ أَعْرَضَ يَكُونُ لِلتَّوَزِيْعِ عِدَّةُ نِهَآيَاتٍ عَظْمَى وَصَّغْرَى - الرَّسْمُ إِلَى الْيَمِينِ . فَعَلَى سَبِيلِ الْيَثَالِ ، تَكُونُ زَاوِيَةُ الْحَيُودِ لِلنِّهَايَةِ الصَّغْرَى الْأُولَى ٥ ، ٠ إِذَا كَانَ عَرَضُ الشَّقِّ يَسَاوِي λ .

وَتُظْهِرُ الْمَعَادَلَةُ [٢: ٣-١] أَنَّ الضَّوْءَ ذَا الطَّوْلِ الْمَوْجِيِّ الْأَكْبَرَ يُعَانِي حَيُودًا أَكْبَرَ . وَلَقَدْ قُلْنَا سَابِقًا فِي ظَاهِرَةِ الْإِكْلِيلِ ، حَيْثُ تَظْهَرُ حَلَقَةٌ حَوْلَ الشَّمْسِ بِفَعْلِ الْحَيُودِ ، أَنَّ اللَّوْنَ الْأَحْمَرَ يَظْهَرُ عَلَى السَّطْحِ الْخَارِجِيِّ بَيْنَمَا يَظْهَرُ اللَّوْنُ الْأَزْرَقُ عَلَى السَّطْحِ الدَّخِلِيِّ . وَالْأَمْرُ فِي الْإِنْكَسَارِ عَلَى عَكْسٍ ذَلِكَ .

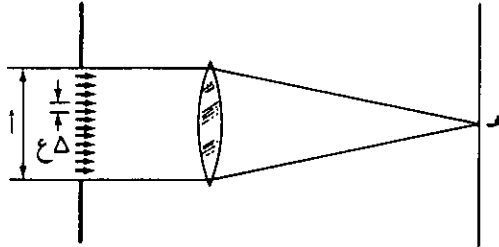


الشَّكْلِ ٥ : تَوَازِيْعُ الشَّدَةِ خَلْفَ ثُقْبٍ عَرَضُهُ $\lambda = \lambda$ (إِلَى الْيَسَارِ) ، ثُقْبٍ صَغِيرٍ جَدًّا (الْوَسْطِ) ، وَثُقْبٍ كَبِيرٍ (إِلَى الْيَمِينِ) .

الرَّسْمُ الْمُتَجَهِّيُّ Vector Construction

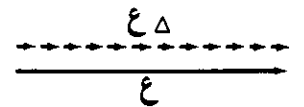
وَلَكِنِّي نَجِدُ سَعَةَ الضَّوئيةِ الْمُحَيَّدِ مِنْ شِقِّ مُنْفَرِدٍ وَشِدَّتَهُ، نَسْتَخْدِمُ طَرِيقَةَ الرَّسْمِ مَرَّةً أُخْرَى، وَنُنْشِئُ فِي هَذِهِ الْمَرَّةِ مُنْحَنِيَّاتِ الْاهْتِرَازِ.

دَعْنَا نَقْسِمَ عَرْضَ الشَّقِّ الْمُنْفَرِدِ إِلَى (١٢) قِطْعَةً طَوِيلَةً مُتَسَاوِيَةً فِي عَرْضِهَا: كُلُّ قِطْعَةٍ مِنْهَا عَرْضُهَا Δ أ. سَيَمُرُّ الضَّوئيةُ مِنْ كُلِّ مِنْ هَذِهِ الْقِطْعِ، وَسَيَكُونُ لِكُلِّ حَزْمَةٍ ضَوْئِيَّةٍ سَعَةٌ اهْتِرَازٍ Δ ع، وَسَتُمَثَّلُ كُلُّ مِنْهَا بِمُتَجَهِّ طَوِيلٍ أَيْ سَهْمٍ قَصِيرٍ فِي الشَّكْلِ ٦. وَلَمَّا كَانَ الضَّوئيةُ السَّاقِطُ عَلَى الشَّقِّ فِي حَيُودِ فِرُونِهوفرٍ مُتَوَازِيًا وَمُتَحَالِفًا وَذَا طَوِيلٍ وَاحِدٍ، فَإِنَّ جَمِيعَ مُتَجَهِّاتِ الطَوِيلِ لَهَا نَفْسُ الطَوِيلِ وَالْاِتِّجَاهِ.



الشَّكْلُ ٦: حَيُودِ فِرُونِهوفرٍ عَنْ شَقِّ مُنْفَرِدٍ: الْأَسْهَمُ الْقَصِيرَةُ الْمُتَوَازِيَةُ دَاخِلَ الشَّقِّ تُمَثِّلُ مُتَجَهِّاتِ السَّعَةِ الْجَزْئِيَّةِ.

وَعِنْدَ النِّقْطَةِ هـ. سَتَصِلُ الْأَمْوَاجُ الْجَزْئِيَّةُ مُتَّحِدَةً الطَوِيلِ؛ وَلِذَلِكَ يَكُونُ لِمَحْصَلَةِ السَّعَةِ ع الطَوِيلِ الْأَقْصَى الَّذِي يَسَاوِي الْمَجْمُوعَ الْجَبْرِيَّ لِلْمُتَجَهِّاتِ - الشَّكْلُ ٧:-

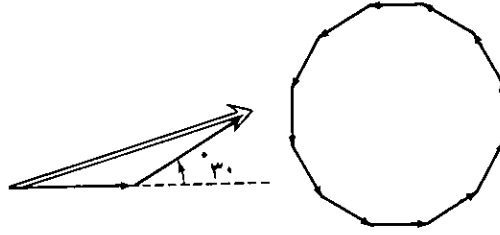


الشَّكْلُ ٧: التَّمْثِيلُ الْمُتَجَهِّيُّ
لِلسَّعَاتِ فِي حَالَةِ تَكُونِ النِّهَايَةِ
الْعَظْمَى ذَاتِ الرِّبَّةِ الصَّفْرِيَّةِ.

$$ع = \sum \Delta \dots\dots$$

لَكِنِّ عِنْدَ نِقَاطٍ أُخْرَى هـ عَلَى السَّتَارَةِ، لَا تَكُونُ الْمَوْجَاتُ الْمَارَّةُ عَبْرَ مَنَاطِقٍ مُخْتَلِفَةٍ مِنْ الشَّقِّ مُتَّحِدَةً الطَوِيلِ. وَعَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ، لَوْ كَانَتِ النِّقْطَةُ هـ النِّهَايَةُ الصَّغْرَى الْأُولَى فَسَوْفَ يَكُونُ هُنَاكَ فَارَقٌ فِي زَاوِيَةِ الطَوِيلِ δ مِقْدَارُهُ 360° بَيْنَ أَوَّلِ مُتَجَهِّ طَوِيلٍ وَآخِرِ مُتَجَهِّ طَوِيلٍ. وَلَوْ كَانَ لَدَيْنَا كَمَا افْتَرَضْنَا ١٢ مَنَاطِقَةً مُتَسَاوِيَةً، فَإِنَّ أَيْ مُتَجَهِّينِ طَوِيلَيْنِ مُتَجَاوِزَيْنِ سَيَكُونُ بَيْنَهُمَا فَارَقٌ فِي زَاوِيَةِ الطَوِيلِ Δ مِقْدَارُهُ $\delta = \frac{360}{12} = 30^\circ$. وَسَتَكُونُ مُتَجَهِّاتُ الطَوِيلِ الْاِثْنَا

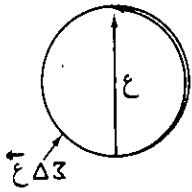
عَشْرَ دَائِرَةٍ كَامِلَةٍ - الشكل ٨. وَلِذَا فَإِنَّ السَّعَةَ الْحَاصِلَةَ ع، تُسَاوِي صَفْراً. وَعِنْدَ تَقْسِيمِ الضَّوءِ إِلَى عَدَدٍ غَيْرِ مَتْنَاهُ مِنَ الْأَجْزَاءِ مَتْنَاهِيَّةِ الصَّغَرِ، فَإِنَّ الْمُنْحَنِي الَّذِي يُمَثِّلُ جَمْعَ الْمَتَجَهَاتِ أَيْ مُنْحَنِي الْاهْتِزَازِ يَكُونُ مُتَّصِلاً.



الشكل ٨: الجمع الاتجاهي لأجزاء الجبهة الموجية التي تختلف في الطور بمقدار ٣٠° (إلى اليسار)، تمثيل المتجهات الاثني عشر معا (إلى اليمين).

تَحْيَلٌ بَعْدَ ذَلِكَ أَنَّ نُقْطَةً ه تَقَعُ بَيْنَ النِّهَايَةِ الْعُظْمَى الصَّغْرِيَّةِ وَالنِّهَايَةِ الصَّغْرَى الْأُولَى. فَمِنْ الْمُمْكِنِ اخْتِيَارُ هَذِهِ النُّقْطَةِ بِحَيْثُ يَكُونُ فَارَقُ الطَّوْرِ بَيْنَ شُعَاعَيْنِ خَارِجِيَّيْنِ مُتَطَرِّقَيْنِ $8 = 180^\circ$ ؛ وَعِنْدَهَا يَكُونُ الْمُنْحَنِي الْاهْتِزَازِيُّ نِصْفَ دَائِرَةٍ. وَلَمَّا كَانَ طَوْلُ نِصْفِ مُحِيطِ الدَّائِرَةِ مُسَاوِيًا لِي $\Delta \lambda$ ع، فَإِنَّ مُحَصَّلَةَ السَّعَةِ ع (قَطْرَ نِصْفِ الدَّائِرَةِ) تَكُونُ:-

$$[2:3-4] \quad \vec{E} = \frac{\Delta \lambda}{\tau} \dots$$



وَإِذَا كَانَتِ النُّقْطَةُ ه خَارِجَ النِّهَايَةِ الصَّغْرَى الْأُولَى، تَعْمَلُ مَتَجَهَاتُ السَّعَةِ مَعًا أَكْثَرَ مِنْ دَوْرَةٍ. فَلِلنِّهَايَةِ الْعُظْمَى مِنَ الرِّبَةِ الْأُولَى عَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ يَكُونُ مُنْحَنِي الْاهْتِزَازِ قَدْ دَارَ تَقْرِيْبًا $\frac{1}{2}$ دَوْرَةٍ - الشكل ٩؛ وَيَكُونُ مُحِيطُ الدَّائِرَةِ لِذَلِكَ مُسَاوِيًا $\frac{2}{3} \Delta \lambda$ ع، كَمَا يَكُونُ:-

$$[2:3-5] \quad \vec{E} \approx \frac{\Delta \lambda}{\tau} \dots$$

الشكل ٩: منحنى الاهتزاز الذي يظهر النهاية العظمى من الرتبة الاولى.

وَعِنْدَ النِّهَايَةِ الصَّغْرَى التَّالِيَةِ مِنَ الرِّبَةِ الثَّانِيَةِ، نَحْصُلُ مَرَّةً أُخْرَى عَلَى $\vec{E} = 0$ صَفْرٍ. لَكِنْ عِنْدَ النِّهَايَةِ الْعُظْمَى مِنَ الرِّبَةِ الثَّانِيَةِ نَحْصُلُ عَلَى:-

[٦-٣:٢]

$$\overleftarrow{ع} \approx \frac{٢}{٥} \frac{\overleftarrow{ع} \Delta \Sigma}{ط} \dots\dots$$

وهكذا دواليك. ويُلخص الشكل ١٠ هذه العلاقات.

لَقَدْ سَمَّيْنَا $\delta \Delta$ الفارق في زاوية الطورِ بَيْنَ أَيِّ جُزْئَيْنِ مُتَجَاوِرِينَ مِنَ المَوْجَةِ، كَمَا سَمَّيْنَا δ الفارقَ فِي الطورِ بَيْنَ المَوْجَتَيْنِ الخَارِجَتَيْنِ اللَّتَيْنِ تَمُرَّانِ قُرْبَ ظَرْفِي الشَّقِّ العلَوِيِّ والسفليِّ، أَيِّ هِيَ أَيْضاً الزَاوِيَةُ المحصورةُ بَيْنَ امتدادي المُتَجَهِّينِ الأوَّلِ والأخيرِ أَوْ هِيَ الفَارِقُ بَيْنَ «مَيْلَي» المماسَّيْنِ للقوسِ عِنْدَ نِهَائَيْتَي مُنْحَنِي الاهتزاز - الشكل ١١.

وتكونُ مُحصلةُ السَّعَةِ $\overleftarrow{ع}$ هي وَتَرُ القوسِ. ومن الرِّسْمِ يَتَبَعُ أَنَّ:

$$\frac{٢/\overleftarrow{ع}}{نق} = \frac{\delta}{٢} \text{ جا}$$

[٧-٣:٢]

$$\text{أو } \overleftarrow{ع} = ٢ \text{ نق جا } \frac{\delta}{٢} \dots\dots$$

وبالتقدير الدائري:

[٨-٣:٢]

$$\dots\dots \frac{\overleftarrow{ع} \Delta \Sigma}{نق} = \delta$$

وَبَحَلَّ المَعَادِلَةَ الأخيرةَ لِلْحَصُولِ عَلَى نق، وَبَتَعْوِضِ قِيَمَةِ نق فِي المَعَادِلَةِ [٧-٣:٢] نَحْصُلُ عَلَى :-

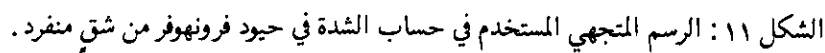
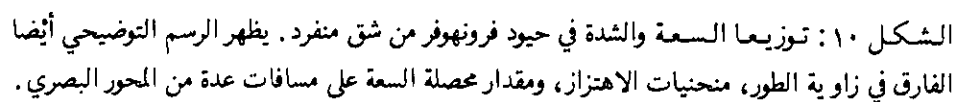
$$[٩-٣:٢] \dots\dots \frac{\frac{\delta}{٢} \text{ جا}}{\frac{٢}{\delta}} \overleftarrow{ع} \Delta \Sigma = \frac{\delta}{٢} \text{ جا } \frac{\overleftarrow{ع} \Delta \Sigma}{\delta} = \overleftarrow{ع} = ٢ \frac{\overleftarrow{ع} \Delta \Sigma}{\delta} \text{ جا } \frac{\delta}{٢}$$

وَلَمَّا كَانَتِ الشَّدَّةُ بالتعريف هِيَ مَرَبُعُ السَّعَةِ، فَإِنَّ الشَّدَّةَ عِنْدَ النِّقْطَةِ هِيَ ش عَلَى بُعْدِ زَاوِيٍّ مِنَ المحورِ البصريِّ مَقْدَارُهُ θ هِيَ:

[١٠-٣:٢]

$$\text{ش} = \text{ش} \cdot \left(\frac{\frac{\delta}{٢} \text{ جا}}{\frac{\delta}{٢}} \right)^٢$$

حيثُ ش هي شدةُ الضوء الساقط.



نهايات الحيود العظمى Diffraction Maxima

لَقَدْ رَأَيْنَا مِنَ الشَّكْلِ ١٠ أَنَّ النِّهَايَاتِ الصَّغْرَى لِلْحَيُودِ مِنْ شَيْءٍ مُنْفَرِدٍ تَقَعُ عَلَى مَسَافَاتٍ مُتَسَاوِيَةٍ عَلَى جَانِبَيِ النِّهَايَةِ الْعَظْمَى الصَّغْرَى. وَحَقِيقَةٌ تَظْهَرُ النِّهَايَاتِ الصَّغْرَى إِذَا كَانَ الْفَارَقُ فِي زَاوِيَةِ الطُّورِ δ مُسَاوِيًا لِمَا يَلِي:-

$$\delta = \pm \tau, \pm 2\tau, \dots, \pm n\tau, \dots, n = 1, 2, 3, \dots$$

لَكِنَّ النِّهَايَاتِ الْعَظْمَى لَا تَقَعُ تَمَامًا فِي مُنْتَصَفِ الْمَسَافَاتِ بَيْنَ النِّهَايَاتِ الصَّغْرَى، فَهِيَ مُزَاحَةٌ إِلَى وَسْطِ (أَيِّ مَرْكَزٍ) نَمِطِ الْحَيُودِ، وَتَقُلُّ هَذِهِ الْإِزَاحَةُ كُلَّمَا ابْتَعَدْنَا عَنِ الْمَرْكَزِ.

وَمِنَ الْمُمْكِنِ إِيجَادُ مَوَاقِعِ النِّهَايَاتِ الْعَظْمَى بِأَخِذِ مُشْتَقَّةِ الْمَعَادِلَةِ [٢: ٣-١٠] بِالنِّسْبَةِ إِلَى $\frac{1}{2}$ فَارَقِ زَاوِيَةِ الطُّورِ بَيْنَ الْإِسْهَامَيْنِ مِنْ طَرَفِي الشَّقِّ الْمُتَقَابِلَيْنِ وَمِنْ ثَمَّ يَوْضَعُ الْمَشْتَقَّةُ مُسَاوِيَةً لِلصَّغْرِ.

وَلِلتَّيْسِيرِ دَعْنَا نُعَبِّرَ عَنْ $\frac{\delta}{2}$ بِـ s ، وَبَعْدَ ذَلِكَ نُجْرِي الْحُلَّ عَلَى النِّحْوِ التَّالِي:

$$[2: 3-12] \quad \frac{d}{ds} \left(\frac{s^2}{s} \right) = \text{صفر} \dots$$

وَيَتَّبَعُ مِنْ ذَلِكَ أَنَّ النِّهَايَةَ الْعَظْمَى لِلشَّدَّةِ تَكُونُ لِقِيمِ s تِلْكَ الَّتِي تَحَقِّقُ الْمَعَادِلَةَ التَّالِيَةَ:

$$[2: 3-13] \quad \text{ظا } s = s \dots$$

[وَكَمَا أَشِيرَ إِلَى ذَلِكَ فِي الْمَسْأَلَةِ ٢: ٣-٤، يُعْمَلُ رَشْمَانِ $s = s$ ، $\text{ظا } s = s$ ، وَتُحَدَّدُ مَوَاقِعُ النِّهَايَاتِ الْعَظْمَى بِنِقَاطِ تَقَاطُعِ الْمُتَحَنِّتَيْنِ. وَسُيْرِي بِوُضُوحٍ أَنَّ النِّهَايَاتِ الْعَظْمَى ذَاتِ الرَّتَبِ الْعَالِيَةِ تَقَعُ تَقْرِيْبًا فِي مُنْتَصَفِ الْمَسَافَاتِ بَيْنَ النِّهَايَاتِ الصَّغْرَى، لَكِنَّ النِّهَايَاتِ الْعَظْمَى ذَاتِ الرَّتَبِ الْمُنْخَفِضَةِ تُزَاحُ نَحْوَ الْمَرْكَزِ كَمَا ذُكِرَ].

وَيُمْكِنُ حِسَابُ الشَّدَّةِ عِنْدَ النِّهَايَاتِ الْعَظْمَى إِلَى دَرَجَةٍ تَقْرِيْبِيَّةٍ بِإِيجَادِ قِيَمِ $\frac{\delta^2}{2}$ عِنْدَ مُنْتَصَفِ الْمَسَافَاتِ أَيْ حَيْثُ $\delta = \frac{\tau_3}{2}, \frac{\tau_5}{2}, \frac{\tau_7}{2}, \dots$ ، وَنَحْصَلُ مِنْ ذَلِكَ عَلَى الْقِيَمِ:

$$\dots, \frac{1}{121}, \frac{1}{61,7}, \frac{1}{22,2}, \text{أي} \dots, \frac{4}{2 ط 49}, \frac{4}{2 ط 25}, \frac{4}{2 ط 9}$$

من شدة النهاية العظمى الصفرية. وبصورة عامة نجد أن :-

$$[14-3:2] \quad \text{ش} = \text{ش} \cdot \frac{1}{(ن + \frac{1}{2}) ط 2} \dots$$

حيث ش. هي الشدة عند النهاية العظمى الصفرية.

نصف العرض Halfwidth

إن نصف العرض للنهاية العظمى الصفرية هو العرض الزاوي للنهاية العظمى عند النقطة التي تبلغ الشدة عندها نصف القيمة القصوى للشدة. وهكذا نجد من المعادلة [10-3:2] أن :-

$$[15-3:2] \quad \dots \left(\frac{\frac{\delta}{2} \text{ جا}}{\frac{\delta}{2}} \right) = \frac{1}{2}$$

ولا نستطيع حل هذه المعادلة مباشرة للحصول على δ . ولكن نجد بطريقة التجربة والخطأ أن :-

$\frac{\delta}{4} = 1,40$ زاوية نصف قطرية $= 80^\circ$ ونصف هذه حتى الآن فارق الطور المرتبط بها. ولكن فارق الطور هذا يُعطى أيضاً بالمعادلة التالية :

$$[16-3:2] \quad \dots \frac{1}{\lambda} ط \frac{\delta}{4} \text{ جا} \theta = \frac{\delta}{4}$$

ولما كان نصف العرض يُقاس إلى أحد جانبي القمة المركزية أي النهاية العظمى الصفرية، فإن نصف العرض «الكلي» يساوي ضعف θ التي تُحسب من المعادلة [16-3:2]. وهكذا نجد أن :-

$$(2) (1,4) \text{ زاوية نصف قطرية} = \frac{1}{\lambda} \text{ ط جا } \theta$$

$$\frac{1}{\lambda} \approx \frac{2,8}{\text{ط}} \theta, \text{ و}$$

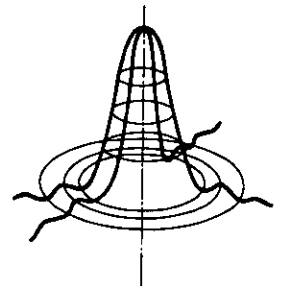
[17-3:2]

$$\frac{\lambda}{1} \approx \theta \dots\dots$$

حيود فرونفوفر من شق دائري

قرص أيري Airy Disk

ولحيود فرونفوفر من شق دائري أهمية بالغة؛ ذلك لأن معظم العدسات والحواجر دائرية في شكلها. ويُعتبر الاشتقاق الرياضي لهُ أكثر صعوبة منه في الشق الطولي. ولقد حلَّ هذه المسألة أول مرة تحليلياً أيري* عام ١٨٣٥. ومن حيث المبدأ يمكن تحليل الشق مرة أخرى على أنه مُقسَّم إلى مناطق أي أجزاء ضيقة ذات عرض واحد. ويتغير الطور داخل كل منطقة تبعاً لمسافة المنطقة من مركز الشق. وعلاوة على ذلك، ولأن المناطق ليست متساوية في أطوالها تكون السعات غير متساوية أيضاً. وتوجد محصلة السعة باستخدام حساب التكامل. ويُعرف نمط الحيود الذي يتكون خلف ثقب دائري بقرص أيري؛ وهو يتألف من نهاية عظمى مركزية ساطعة تحيط بها عدد من الحلقات الأقل سطوعاً. ويبدو توزيع الشدة في رسم ثلاثي الأبعاد كما في الشكل ١٢. والتوزيع الإجمالي تقريباً هو نفس التوزيع في حالة نمط الحيود من شق منفرد، إلا أن أبعاد ذلك التوزيع مختلفة. إذ قد وُجد في الحيود من شق منفرد أن المسافات الزاوية θ للنهايات الصغرى من المركز كانت:



الشكل ١٢: توزيع الشدة - قرص أيري

[18-3:2]

$$\theta = \text{جا}^{-1} \frac{\lambda}{1} \approx \frac{\lambda}{1} \dots\dots$$

* السير جورج بيدل أيري Sir George Biddell Airy (١٨٠١-١٨٩٢): الفلكي الملكي، بحث تكوين الصور بالتلسكوبات ودقة المشاهدات الفلكية. ومن بين منشوراته أَل ١٨ مقالته الأساسية: «في حيود الضوء من جسم زجاجي ذي ثقب دائري» التي نُشرت في مجلة Trans Cambridge Phil. Soc. العدد ٥ (١٨٣٥)، ص ٢٨٣-٢٩٠.

حَيْثُ نَ هو عددٌ صحيحٌ يبدأ من الواحد. أما في نمط الحيود خلف الثقب الدائري فإنَّ المسافة الزاوية للنهايات الصغرى ماثلة؛ لكنَّ الأعدادَ ن ليست أعداداً صحيحة، إذ تُحَسَّب مقاديرُها من دالاتٍ أو اقتراناتٍ بِسِلِّ من الرتبة الأولى. ويحتوي الجدولُ (١) على بعض تلك المقادير.

الجدول ١: مواقع النهايات الصغرى في الحيود من شق منفرد،
وقيَم اقتراناتِ بِسِلِّ من الرتبة الأولى للحيود من شقٍّ دائري.

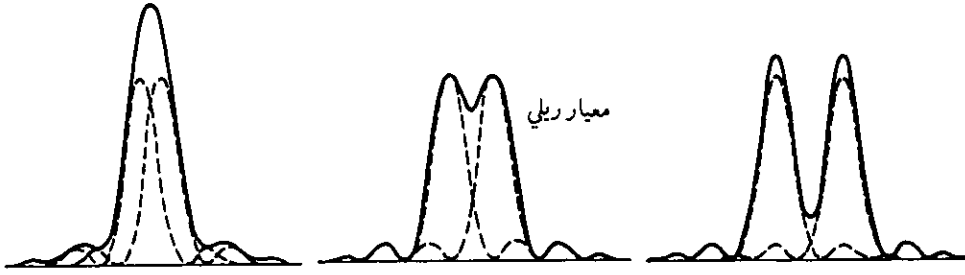
الشق المنفرد	الشق الدائري
ن =	ن =
١	١,٢٢٠
٢	٢,٢٣٣
٣	٣,٢٣٨
٤	٤,٢٤١
٥	٥,٢٤٣
النهاية الصغرى من الرتبة الأولى	
النهاية الصغرى من الرتبة الثانية	
النهاية الصغرى من الرتبة الثالثة	
النهاية الصغرى من الرتبة الرابعة	
النهاية الصغرى من الرتبة الخامسة	

مِغْيَارُ رَيْلي Rayleigh's Criterion

من المحتمل أن ريلي* كان أول من استخدمَ لفظَ «قُوَّة التبيين Power resolving»؛ إذ استدَلَّ أن الخطَّين المتوازيَّين يَظهَران مثلَ خَطَّينِ اثنين بَدَلَ خطٍّ واحدٍ إذا كانَ نمطَ حيودهما منفصلَين بوضوح، لكن عندما تندمجُ نهايتاهما العُظُمَيان المركزَتان في نهايةٍ واحدةٍ، فإنَّهما أي الخطان يَبْدُوَانِ مِثْلَ خطٍّ واحدٍ. أما عندما يُنطبقُ عَفْوَاً مركزُ أحَدِ النمطينِ على النهايةِ الصغرى الأولى للآخر، فإنَّه يقالُ بأنَّ الخطَّينِ مُتَبَيِّنَانِ أو مُمَيَّزَانِ،

* اللورد ريلي، البارون الثالث، جون وليم شترت (١٨٤٢ - ١٩١٩): الاستاذ في جامعة كامبرج والمعهد الملكي، والحاصل على جائزة نوبل لعام ١٩٠٤. انظر مقالته: لورد ريلي «استقصاءات في البصريات، مع إشارة خاصة الى كاشفة الطيف»، المجلة الفلسفية (phil. Mag.)، العدد ٥ المجلد ٨ (١٨٧٩)، ٢٦١-٢٧٤.

وَيُسَمَّى هَذَا الشَّرْطُ مَعْيَارَ رَيْلِي - الشَّكْل ١٣ .



الشَّكْل ١٣ : جِسْمَانِ نَقْطِيَّانِ الْمَسَافَةُ الزَّائِيَةُ بَيْنَهُمَا صَغِيرَةٌ جِدًّا لَا تَمَكِّنُ مِنْ رُؤْيَيْهِمَا مِثْلَ نَقْطَتَيْنِ (الْيَسَارِ)، مَعْيَارُ رَيْلِي (الْوَسْطِ)، جِسْمَانِ يَمَكُنُ بِسَهُولَةٍ تَعْرِفُهُمَا كَجِسْمَيْنِ مُخْتَلِفَيْنِ (الْيَمِينِ)

وَبَصُورَةٍ كَمِيَّةٍ، يُعْطَى الْمَوْقِعُ الزَّائِيُّ لِلنِّهَايَةِ الصَّغْرَى الْأُولَى خَلْفَ شَقِّ دَائِرِيٍّ قَطْرُهُ Q بِالْمَعَادِلَةِ التَّالِيَةِ:

$$\theta = 1,220 \frac{\lambda}{Q} \text{ ، انظر الجدول ١ .}$$

وَهَكَذَا قَوْفُوقَ مَعْيَارِ رَيْلِي يَنْبَغِي لِلْجِسْمَيْنِ أَنْ يَتَفَصَّلَا بِمَسَافَةٍ زَائِيَةٍ صُغْرَى مَقْدَارِهَا:

$\theta_{\text{صغرى}} = 1 - \left(\frac{1,220 \lambda}{Q} \right)$ حَتَّى يُمَكِّنَ تَبْيِينُهُمَا . وَلَمَّا كَانَتِ الزَّوَايَا الدَّاخِلَةُ صَغِيرَةً، فَيَمَكِّنُنَا حَذْفُ الْجَيْبِ وَالْقَوْلُ إِنَّ :-

$$\theta_{\text{الصغرى}} \approx 1,22 \frac{\lambda}{Q} \dots\dots [١٩-٣:٢]$$

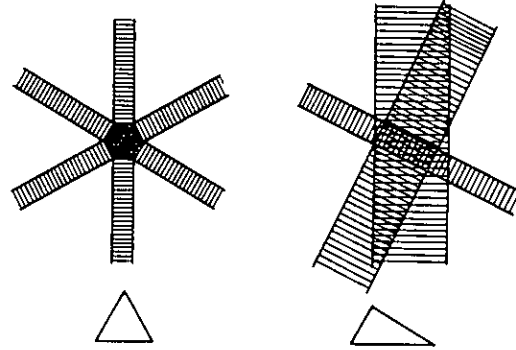
هَذَا وَقَدْ انْتَقَدَ مَعْيَارُ رَيْلِي لَعَدَّةِ أَسْبَابٍ . وَيَزْعُمُ الْبَعْضُ أَنَّهُ مَعْيَارٌ مُتَسَامِحٌ بِإِفْرَاطٍ ؛ إِذْ يَمَكُنُ حَقًّا تَحْتَ شُرُوطٍ مُلَائِمَةٍ تَبْيِينُ مَسَافَاتٍ زَائِيَةٍ أَصْغَرَ . وَيُؤْمِنُ الْبَعْضُ الْآخَرُ بِمَعْيَارِ رَيْلِي كَأَنَّ الْمَلَائِكَةَ كَتَبَتْهُ عَلَى أَقْرَاصٍ مِنْ ذَهَبٍ † . أَمَّا رَيْلِي نَفْسُهُ فَاعْتَبَرَ مَعْيَارَهُ أَنَّهُ لَا يَغْدُو أَنْ يَكُونَ مَعْيَارًا تَقْرِيبيًّا .

†As quoted from F. H. Perrin, *J. Soc. Motion Pict. Televis. Eng.* 69 (1960), 152.

حيود فرونفوفر من ثقبٍ أخرى

نذكرُ هنا الثقبُ من الاشكالِ الأخرى غيرِ التي بحثت الى الآن باختصارٍ وبصورةٍ وُصفيةٍ فقط. و يُمكنُ بسهولة، كما سيُشرحُ بتفصيلٍ أكثرَ لاحقاً، اظهارُ أن توزيعَ سعةِ الضوءِ في نمطِ الحيودِ يتناسبُ مع مُحوّلةِ فورييه (Fourier Transform) لتوزيعِ السعةِ داخلِ الشق. و يعني ذلك أن الاهدَابَ في نمطِ الحيودِ الناشيء عن مُرورِ الضوءِ في شقٍّ منفردٍ عريضٍ تكونُ قريبةً مِنْ بعضها بعضاً، والعكسُ بالعكسِ.

وعندما يكونُ شكلُ الفتحةِ مثلَ شكلٍ متوازي الأضلاع، فإن خطي النهاياتِ العظمى لا يعودان يتعامدان؛ إلا أنهما ما يزالان بالطبع يتعامدان معَ حافاتِ الفتحة. ولثقبٍ مثلثي الشكلٍ توجدُ هنالك ثلاثة أزواجٍ من النهاياتِ العظمى تتعامدُ جميعُها معَ أضلاعِ المثلث، ولذا يكونُ هناك ما مجموعهُ ستِ مُراوِجٍ ضوئية - الشكل ١٤. و يكونُ للمضلعِ المستقيمِ الذي لَهُ ن ضلعاً على الأكثرِ ٢ن من تلك المِراوِج: فالثقبُ الخمسُ سيكونُ لَهُ عَشْرُ مُراوِجٍ؛ أما المسدسُ الذي يتوازي فيه كُلُّ ضلعين متقابلين فلا يُعطي إلا ستَ مُراوِجٍ.



الشكل ١٤: ثقبان مثلثان شكلاهما مختلفان (الرسم الى الاسفل) ونمطا الحيود الحاصلان منهما (الرسم العلوي).

افترض أن لديك ستارتين متتامتين: بمعنى أن الاولى معتمة بينما الأخرى شفافة، أي على سبيل المثال ستارة معتمة ذات عدة فجواتٍ وستارة شفافة ذات بقع معتمة مماثلة للفجوات. فعند وضع هاتين الستارتين في طريق حزمة ضوئية يتماثل تماماً نمط الحيود الحاصلين طالما شوهذا خارج حزمة الضوء الأصلية، وهذه الظاهرة تُعرفُ بمبدأ بابنيت (Babinet).

اقتراحات لقراءات اضافية

- F. S. Harris, Jr., "Light Diffraction Patterns," *Applied Optics* 3 (1964), 909-13.
 R. B. Hoover and F. S. Harris, Jr., "Die Beugungserscheinungen: a Tribute to F. M. Scherard's Monumental Work on Fraunhofer Diffraction," *Applied Optics* 8 (1969), 2161-64.
 M. Cagnet, M. Francon, J. C. Thrierr, *Atlas of Optical Phenomena* (Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag Inc., 1962).

المسائل

- ١-٣:٢ شقٌ منفردٌ عَرْضُهُ أ مُضَاءٌ بِضَوْءٍ أَحْمَرَ طَوْلُهُ ٦٥٠ ن.م. وَيُعْطِي النِّهَايَاتِ الصَّغْرَى مِنَ الرَّتْبَةِ الْاُولَى لِحِيودِ فِرُونِهوفرَ عَلَى مَسَافَةِ زَاوِيَةٍ مِنَ المَحْوَرِ البَصْرِيِّ تَسَاوِي ٥. جَدِّ عَرْضِ الشَّقِّ.
- ٢-٣:٢ أَضْيَاءٌ شَقٌّ عَرْضُهُ ١,١٦٨ م.م. بِضَوْءٍ أَحَادِيٍّ المَوْجَةِ. وَكَانَتِ المَسَافَةُ بَيْنَ النِّهَايَتَيْنِ الصَّغْرَيْنِ مِنَ الرَّتْبَةِ الثَّانِيَةِ وَالثَّالِثَةِ ٣ سم. وَذَلِكَ عَلَى سِتَارَةٍ تَبْعُدُ ٢ م. مِنَ الشَّقِّ. جَدِّ الطَّوْلَ المَوْجِيَّ للضَّوْءِ.
- ٣-٣:٢ إِذَا كَانَتِ سَعَةُ الِاهْتِزَازِ لِلنِّهَايَةِ العَظْمَى الصَّغْرَى فِي نَمَطِ الحِيودِ مِنْ شَقٍّ مَنفَرِدٍ تَسَاوِي ٦ وَخُدَاتٍ، فَمَا قِيَمَةُ السَّعَةِ: (أ) لِلنِّهَايَةِ الصَّغْرَى الْاُولَى (ب) لِلنِّهَايَاتِ العَظْمَى الْاُولَى وَالثَّانِيَةِ وَالخَامِسَةِ؟
- ٤-٣:٢ عَلَى نَفْسِ وَرْقَةٍ الرَّسْمِ البَيَانِيَّ، ارْسُمْ مَنحْنِيَيْنِ يَتَرَاكِبَانِ عَلَى بَعْضِهِمَا: الْاَوَّلُ لِلدَّالَةِ ص = س وَالثَّانِيَةُ لِلدَّالَةِ ص = ظاس مَعْبَرًا عَنْ س بِالزَّوَايَا نَصْفِ القَطْرِيَةِ. وَيَمْكِنُ اعْتِبَارُ النِّقْطَةِ (.,.) تَنَاظِرُ النِّهَايَةِ العَظْمَى الصَّغْرَى فِي حِيودِ فِرُونِهوفر. أَلْقِمْ س = ط، ٢ ط، ٣ ط، تَشِيرُ إِلَى النِّهَايَاتِ الصَّغْرَى بِنَفْسِ الطَّرِيقَةِ الَّتِي وُضِّحَتْ سَابِقًا فِي الشَّكْلِ ١٠-٣:٢. وَيَحْدُدُ تَقَاطُعُ الحِطِّ المَسْتَقِيمِ مَعَ المَنحَنِ ص = ظاس مَوَاقِعَ النِّهَايَاتِ العَظْمَى لِحِيودِ فِرُونِهوفر. وَإِذَا كُنْتَ قَدْ رَسَمْتَ تَوَازِيْعَ السَّعَةِ فِي نَمَطِ الحِيودِ فَوْقَ المَنحْنِيَاتِ المَرْسُومَةِ، فَصِلْ النِّهَايَاتِ العَظْمَى وَنَقَاطَ التَّقَاطُعِ بِخُطُوطٍ رَاسِيَةٍ.

٥-٣:٢ شقٌّ منفردٌ بضاءٍ بضوءٍ طوله الموجي ٦٠٠ نـم. فإذا كان نصف العرض الكلي للنهاية العظمى المركزية هو ٠,٠٠٥ زاوية نصف قطرية، فجد عرض الشق.

٦-٣:٢ تمر أمواج الميكروويف التي تواترها ١٠ جيجا هرتز عبر شقٍّ عرضه ٢٠ سم. جد نصف العرض الكلي للنهاية العظمى الصفرية لِنَمِطِ الحيود.

٧-٣:٢ عندما تكون السماء مُعتمة قليلاً بسبب الغيوم الخفيفة تظهر حول القمر حلقات ملونة متحدة المركز. ويبدو داخل أي من الحلقات أحمر، أما الخارج فيبدو أزرق. كيف تفسر هذه الظاهرة؟

٨-٣:٢ في الشكل ١٦، توجد عدة ثقب ذات أشكال مختلفة يراد وضعها في طريق حزمة ضوئية، بين لكل ثقب شكل نمط الحيود المتكون. افترض أن الضوء الساقط على جميع الثقوب هو ضوء أبيض، باستثناء الثقب الثاني الذي ينبغي رسم حيوده كذلك لضوء أحادي الموجة.

٩-٣:٢ عدسة مجمعة قطرها ٣٢ مم وبُعْدُها البؤري ٨٠ سم. جد أصغر مسافة زاوية يُمكنُ تمييزها باستخدام العدسة مفترضاً أن الطول الموجي للضوء الأبيض $\lambda = ٥٥٠$ نـم. جد كذلك المسافة المناظرة في مُستوى الصورة.



الشكل ١٦

١٠-٣:٢ جد: أ) قوة التمييز الزاوي ب) قوة التمييز الخطي لتلسكوب عرض فتحته ٤٠ سم ومُوجَّهٌ لجسم على مسافة ٥٠ كم إذا كان الطول الموجي للضوء يساوي ٥٠٠ نـم.

١١-٣:٢ جد المسافة الزاوية الفاصلة بين النجمين في نجم ثنائي يُمكنُ تمييزه وفق معيار ريلي بواسطة تلسكوب فتحته ١٢ سم وبُعْدُها البؤري ١,٢٥ م. افترض أن الطول الموجي للضوء $\lambda = ٥٥٠$ نـم. جد أيضاً القطر الخطي لِنَمِطِ الحيود الناتج في مُستوى الصورة والذي يُعْتَبَرُ لأغراض عملية مساوياً لضعف نصف العرض الكلي للنهاية العظمى المركزية.

الفصل ٢ : ٤

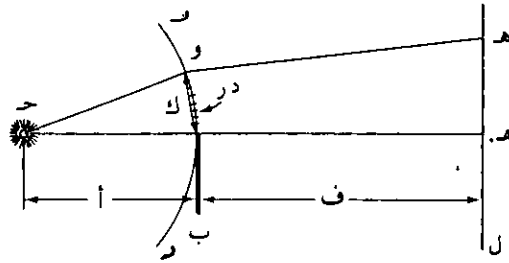
حيود فرنل

Fresnel Diffraction

يَتَنَاوَلُ حيودُ فرنلِ الحالةَ الأكثرَ عُمُومًا التي لا تقتصرُ على الجبهاتِ الموجيةِ المستوية، ذلك لأنَّ تلكَ الجبهاتِ توجَدُ بالتعريفِ في حيودِ فرونهورف. ففي حيودِ فرنلِ يكونُ المصدرُ أو الستارةُ أو كلاهما على مسافاتٍ محدودةٍ من الجسمِ المُحَيِّدِ؛ إذ لا توجَدُ هنالك عدساتٌ مسدَّدة. وَيُشارُ إلى حيودِ فرنلِ أحياناً بأنه «حيودُ المجالِ القريبِ»، بينما يُشارُ إلى حيودِ فرونهورف بأنه «حيودُ المجالِ البعيدِ». ويفترضُ أنَّ المجالَ القريبَ يَمْتَدُّ من الجسمِ المُحَيِّدِ إلى مسافةٍ $\lambda/2$ ، حيثُ q هو قطرُ الثقبِ المُحَيِّدِ وحيثُ λ هي الطولُ الموجيُّ. أمَّا المجالُ البعيدُ فيمتدُّ من $(q/\lambda)^2$ إلى ما لا نهاية.

تكامليات فرنل Fresnel Integrals

افترض أنَّ حـ مصدرٌ ضوئيٌّ تصدرُ منه جبهاتٌ كريةٌ رر- الشكل ١، وأنَّ الحاجزَ ب وَضِعَ في مسارِ الضوءِ. إنَّ الجبهاتِ الموجيةَ تتقدَّمُ نحوَ الستارةِ ل. وَتَرَعَبُ الآنَ في حسابِ السعةِ والشدَّةِ عِنْدَ نُقْطَةِ ما مِثْلَ ه على الستارةِ.

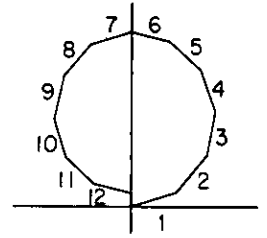


الشكل ١: حيود فرنل من حاجز نصف مستو.

• أوغسطين جان فرنل Augustin Jean Fresnel (١٧٨٨-١٨٢٧): مهندس الطرق الفرنسي؛ عرض في أطروحته التي قدَّمها للأكاديمية الفرنسية للعلوم عام ١٨١٨ أوَّلَ معالجةٍ رياضيةٍ صارمةٍ لظاهرة الحيود.

افترض مرة أخرى أنَّ الجبهة الموجية تتألف من أجزاءٍ متناهيةٍ في الصغرِ در. وهذه الأجزاءُ تتضامُّ عندَ هـ؛ ولكنَّ لَمَّا كانت المسافاتُ من أية نقطةٍ في الجبهة الموجية إلى النقطةِ هـ مختلفةً، فإنَّ تلك الأجزاءَ تصلُّ النقطةَ هـ غيرَ متحدةٍ الطور، ولذلك لا تساوي محصلةُ السعةِ عندَ هـ المجموعُ الجبريُّ للسَّعاتِ الجزئيةِ بلَّ المجموعُ المتجهيُّ.

وبنفسِ الطريقةِ التي عُرِضَتْ سابقاً في حيود فرونفور، تُقسَّمُ الجبهةُ الموجيةُ إلى اثني عشرِ جزءاً. وخلافاً لحيود فرونفور فلا يُعطي مجموعُ تلك المتجهاتِ الجزئيةِ دائرةً كاملةً، كما أنَّ مُحصلةَ السعاتِ حتى في حالاتِ النهاياتِ الصغرى لا تكونُ صفراً - الشكل ٢. ويُعزى ذلك إلى أنَّ سعاتِ الضوءِ المارِّ بالمناطقِ التي تبتعدُ أكثرَ فأكثرَ من الحاجزِ أي الحافةِ المُحيَّدةِ تُصبحُ أقلَّ فأقلَّ. أمَّا سببُ هذا النقصانِ المطردِ في السعةِ فهو تأثيرُ عاملِ الانفراج **obliquity factor** الذي سيبحثُ مزيد من التفصيلِ في نهاية هذا الفصل. ولذا يُعطي جمعُ المتجهاتِ لولباً أو حلزواً يتجمعُ نحوَ نقطةٍ مركزيةٍ بدَلِ دائرةٍ مُغلقةٍ.



الشكل ٢: المجموع المتجهيُّ لأثني عشر متجهاً يميل كل منها على الآخر بزاوية مقدارها ٩٠°. ولَمَّا كانت الأجزاءُ (أطوال المتجهات) المتعاقبةُ تُصغَّرُ بالتدرجِ فإن الشكل الناتج يكون لولباً.

ويمكنُ وصفُ الدالَّةِ الموجيةِ عندَ هـ. بالمعادلةِ التاليةِ:-

$$\vec{v} = \vec{e} \cos (2\pi z) \dots\dots [1-4:2]$$

وتَنصِفُ هذه المعادلةُ كما رأينا من قَبْلُ توزيعَ الموجةِ عندَ نقطةٍ ما في جميعِ الأوقاتِ.

وعند النقطةِ هـ يكونُ الاضطرابُ الناشئُ من الجزءِ در المجاورِ للحافةِ كما يلي:-

$$\vec{v} = \vec{e} \cos (2\pi \left(\frac{z}{d} - \frac{f}{\lambda} \right)) \dots\dots [2-4:2]$$

حيث f هي المسافةُ بين الحافةِ والستارةِ.

وإذا كان هنالك جزءٌ آخرُ من الجبهةِ الموجيةِ يبتعدُ عن النقطةِ هـ بمسافةٍ I^1 أكثرَ من

الجزءِ السابق، فإن الاضطرابَ عندَ هـ يكونُ:-

$$\vec{v} = \vec{e} \cos (2\pi \left(\frac{z}{d} - \frac{f + I^1}{\lambda} \right)) \dots\dots [3-4:2]$$

وَيُحَسَّبُ الاضطرابُ الكليُّ عند هـ الناتج من جميع الاجزاءِ در بالتكاملِ على النحو التالي :-

$$[٤-٤:٢] \quad \text{ص} = \overleftarrow{ع} \text{ جا } \left(\frac{\Gamma + ف}{\lambda} - \frac{\text{ط}^2}{\text{د}} \right) \text{ در} \dots\dots$$

وعندما تكون ع = ١ ، تُعطي المعادلةُ الأخيرةُ للشدة ما يلي :-

$$[٥-٤:٢] \quad \text{ش} = \left[\text{جتا } \frac{\Gamma \text{ط}^2}{\lambda} \cdot \text{در} \right]^2 + \left[\text{جا } \frac{\Gamma \text{ط}^2}{\lambda} \cdot \text{در} \right]^2 \dots\dots$$

ونجدُ للنقاطِ على الجبهةِ الموجيةِ القريبةِ نوعاً ما من المحورِ البصريِّ أن :-

$$[٦-٤:٢] \quad \Gamma \approx \frac{\text{ك}^2 \text{أ} + \text{ف}}{\text{أ}^2} \dots\dots$$

حيث ك هي المسافةُ بين النقطةِ وطرفِ الحاجز - الشكل ١ . ومن ثَمَّ تكونُ الشدةُ هي :-

$$[٧-٤:٢] \quad \text{ش} = \left[\text{جتا ط } \frac{\text{ك}^2 (\text{أ} + \text{ف})}{\lambda \text{أ}^2} \cdot \text{در} \right]^2 + \left[\text{جا ط } \frac{\text{ك}^2 (\text{أ} + \text{ف})}{\lambda \text{أ}^2} \cdot \text{در} \right]^2 \dots\dots$$

ومن الأنسب أن نستخدمَ التكاملاتِ التي لا تعتمدُ على القيمِ الخاصةِ أ، ف وهذا ممكنٌ بادخالِ متغيرٍ جديدٍ ح يُعرَّفُ بالمعادلةِ التالية :-

$$\frac{\text{ط}^2}{\text{د}} = \frac{\Gamma \text{ط}^2}{\lambda} \text{، أي :-}$$

$$[٨-٤:٢] \quad \text{ح} = \sqrt{\frac{\Gamma \text{ط}^2}{\lambda}} \dots\dots$$

وبتعويضِ المعادلةِ [٨-٤:٢] في المعادلةِ [٧-٤:٢] نحصلُ على :-

$$\text{ش} = \frac{\text{أ}^2 \text{ف}}{(\text{أ} + \text{ف})^2} \left[\left(\text{جتا } \frac{\text{ط}^2 \text{ح}}{\text{د}} \cdot \text{در} \right)^2 + \left(\text{جا } \frac{\text{ط}^2 \text{ح}}{\text{د}} \cdot \text{در} \right)^2 \right]$$

$$[٩-٤:٢] \quad \dots\dots \left(\text{جا } \frac{\text{ط}^2 \text{ح}}{\text{د}} \cdot \text{در} \right)^2 + \left(\text{جتا } \frac{\text{ط}^2 \text{ح}}{\text{د}} \cdot \text{در} \right)^2 \dots\dots$$

وَيُعَرَفُ التكامليان اللذان يَظهَران في المعادلة السابقة بتكاملَيَّي فِرِنل، وهما يُمثَلان مُكوْنَتَي مُحصلة السعة على مِخَوْرَيْن مُتَعَامِدَيْن . وَعندما يكاملُ تكامليَا فِرِنل بَيْنَ القِيمَتَيْن المُعْطَاتَيْن لِح، فان نَتِيجَتَي التكاملي تُحدِدانِ الاضطراب الناشيءَ مِنْ جِزءٍ مِنَ الجِهةِ الموجيةِ أَوْ جِزءٍ مِنَ الثقبِ الذي تَمُرُّ فِيهِ الجِهةُ الموجيةُ. وَيَقْدُمُ الجدولُ ١ متسلسلةً بِقِيمِ مِثْلَةٍ لِهَذَيْنِ التكامليين.

الجدول ١ : تكامليَا فِرِنل

ح	س	ص	ح	س	ص
0.00	0.0000	0.0000	4.50	0.5261	0.4342
0.10	0.1000	0.0005	4.60	0.5673	0.5162
0.20	0.1999	0.0042	4.70	0.4914	0.5672
0.30	0.2994	0.0141	4.80	0.4338	0.4968
0.40	0.3975	0.0334	4.90	0.5002	0.4350
0.50	0.4923	0.0647	5.00	0.5637	0.4992
0.60	0.5811	0.1105	5.05	0.5450	0.5442
0.70	0.6597	0.1721	5.10	0.4998	0.5624
0.80	0.7230	0.2493	5.15	0.4553	0.5427
0.90	0.7648	0.3398	5.20	0.4389	0.4969
1.00	0.7799	0.4383	5.25	0.4610	0.4536
1.10	0.7638	0.5365	5.30	0.5078	0.4405
1.20	0.7154	0.6234	5.35	0.5490	0.4662
1.30	0.6386	0.6863	5.40	0.5573	0.5140
1.40	0.5431	0.7135	5.45	0.5269	0.5519
1.50	0.4453	0.6975	5.50	0.4784	0.5537
1.60	0.3655	0.6389	5.55	0.4456	0.5181
1.70	0.3238	0.5492	5.60	0.4517	0.4700
1.80	0.3336	0.4508	5.65	0.4926	0.4441
1.90	0.3944	0.3734	5.70	0.5385	0.4695
2.00	0.4882	0.3434	5.75	0.5551	0.5049
2.10	0.5815	0.3743	5.80	0.5298	0.5461
2.20	0.6363	0.4557	5.85	0.4819	0.5513
2.30	0.6266	0.5531	5.90	0.4486	0.5163
2.40	0.5550	0.6197	5.95	0.4566	0.4688
2.50	0.4574	0.6192	6.00	0.4995	0.4470
2.60	0.3890	0.5500	6.05	0.5424	0.4689
2.70	0.3925	0.4529	6.10	0.5495	0.5165
2.80	0.4675	0.3915	6.15	0.5146	0.5496
2.90	0.5624	0.4101	6.20	0.4676	0.5398
3.00	0.6058	0.4963	6.25	0.4493	0.4954
3.10	0.5616	0.5818	6.30	0.4760	0.4555
3.20	0.4664	0.5933	6.35	0.5240	0.4560
3.30	0.4058	0.5192	6.40	0.5496	0.4965
3.40	0.4385	0.4296	6.45	0.5292	0.5398
3.50	0.5326	0.4152	6.50	0.4816	0.5454
3.60	0.5880	0.4923	6.55	0.4520	0.5078
3.70	0.5420	0.5750	6.60	0.4690	0.4631
3.80	0.4481	0.5656	6.65	0.5161	0.4549
3.90	0.4223	0.4752	6.70	0.5467	0.4915
4.00	0.4984	0.4204	6.75	0.5302	0.5362
4.10	0.5738	0.4758	6.80	0.4831	0.5436
4.20	0.5418	0.5633	6.85	0.4539	0.5060
4.30	0.4494	0.5540	6.90	0.4732	0.4624
4.40	0.4383	0.4622	6.95	0.5207	0.4591

حَلَزُون كِرْنِيه Cornu Spiral

عندما يُرَسَّمُ أَحَدُ تَكَامُلِيَّيْنِ فَرِنَلٍ عَلَى الْمَحْوَرِ السَّيْنِيِّ وَالْآخَرُ عَلَى الْمَحْوَرِ الصَّادِيّ، فَإِنَّ الرِّسْمَ الْحَاصِلَ يُعْرَفُ بِحَلَزُونِ كِرْنِيه - الشكل ٣. فَحَلَزُونُ كِرْنِيه هُوَ الْمُنْحَنِي الْمُحَدَّدُ بِمَا يَلِي:-

$$\left. \begin{aligned} \text{س} &= \left[\text{جتا } \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ ط ح}^2 \cdot \text{د ح} \right] \\ \text{ص} &= \left[\text{جا } \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ ط ح}^2 \cdot \text{د ح} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots [١٠-٤:٢]$$

حَيْثُ ح هُوَ طَوَّلُ الْمُنْحَنِ مَقَاساً مِنَ النُّقْطَةِ (٠، ٠). وَيَصِفُ الْحَدُّ (ط ح) تَقْوَسَ الْحَلَزُونِ عِنْدَ أَيْةِ نُقْطَةٍ.

وَيُعْطَى إِحْدَاثِيَّاتُ النُّقْطَةِ K مَرَكِزِ الْعَيْنِ الْعُلْيَا لِلْحَلَزُونِ بِالْمَعَادِلَةِ التَّالِيَةِ:-

$$\left[\text{جتا ه}^2 \cdot \text{ده} = \left[\text{جا ه}^2 \cdot \text{ده} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\text{ط}}{2}} \right] \right]$$

وَمِنَ الْمَعَادِلَةِ السَّابِقَةِ نَحْصَلُ عَلَى مَا يَلِي:-

$$\left[\text{جتا } \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ ط ح}^2 \cdot \text{د ح} = \left[\text{جا } \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ ط ح}^2 \cdot \text{د ح} = ٠,٥+ \dots\dots [١١-٤:٢] \right]$$

أَمَّا النُّقْطَةُ K، فَإِنَّ إِحْدَاثِيَّيْهَا هُمَا (٠، ٥-، ٠، ٥-). وَيَضْنَعُ الْمَاسُّ لِلْحَلَزُونِ زَاوِيَةَ σ مَعَ الْمَحْوَرِ السَّيْنِيِّ تُعْطَى بِالْمَعَادِلَةِ التَّالِيَةِ:-

* أَي. كِرْنِيه A. Cornu (١٨٤١-١٩٠٢): أَسَازُ الْفِيْزِيَاءِ التَّجْرِبِيَّةِ فِي مَدْرَسَةِ الْبُولِيْتِكْنِيك، بَارِيْسَ، فَرَنْسَا.

$$\sigma = \text{ظا}^{-1} = \left(\frac{\text{دص}}{\text{دس}} \right) = \frac{1}{\text{ط ح}^2} \dots\dots [12-4:2]$$

وَيُظْهَرُ مِنْ ذَلِكَ أَنَّ الْمُنْحَنِي يَوَازِي الْمَحْوَرَّ السِّينِيَّ عِنْدَمَا تَكُونُ ح = صفر. وَ يُقَاسُ جُزْءُ الطَّوْلِ Δ ح عَلَى الْحَلَزُونِ نَفْسِهِ، كَمَا يُعْطَى نِصْفُ قُطْرِ التَّكْوِيرِ بِالمَقْدَارِ $\frac{\text{د ح}}{\text{د س}} = \frac{1}{\text{ط ح}}$ ؛ وَلِذَا يَنْقُصُ نِصْفُ قُطْرِ التَّكْوِيرِ كُلَّمَا زَادَتْ ح، الْأَمْرُ الَّذِي يُفَسِّرُ وُجُودَ حَلَزُونٍ مُزْدَوِجٍ.

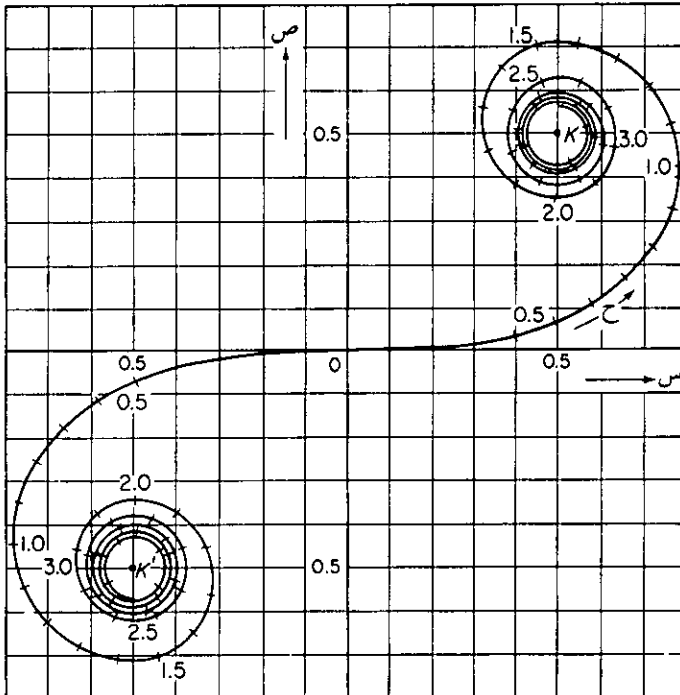
وَيَتَصَفَّ حَلَزُونُ كِرْتِيهِ بِأَنَّ زَاوِيَةَ σ الَّتِي يَعْمَلُهَا مَعَ الْمَحْوَرِّ السِّينِيَّ تَنَاسَبُ مَعَ مَرَبَعِ الْمَسَافَةِ ح كَمَا تَقَاسُ عَلَى الْمُنْحَنِ مِنْ نَقْطَةِ الْأَصْلِ. وَ بِصُورَةٍ عَامَةٍ فَزَاوِيَةُ δ فِي مُنْحَنِ اهْتِزَازٍ مَا تُسَاوِي الْفَارَقَ فِي زَاوِيَةِ الطَّوْرِ بَيْنَ أَيِّ شُعَاعَيْنِ مَقْيَاسِيَيْنِ Unit rays مُتَجَاوِرَيْنِ:

$$\delta = \frac{\text{ط}^2}{\lambda} = \Gamma \frac{\text{ط}(\text{أ} + \text{ف})}{\lambda \text{ أف}} = \frac{1}{\text{ط ح}^2} \dots\dots [13-4:2]$$

وَلِأَنَّ δ هِيَ أَيْضًا الزَّاوِيَةُ الَّتِي تَصَفَّ مِيلَ الْمُنْحَنِ عِنْدَ أَيَّةِ نَقْطَةٍ عَلَى الْحَلَزُونِ، فَإِنَّ التَّغْيِيرَ الَّذِي يَحْدُثُ لِلْإِحْدَائِيَّيْنِ عِنْدَ إِزَاحَةٍ صَغِيرَةٍ دَح عَلَى الْحَلَزُونِ يُعْطَى بِالمَعَادِلَتَيْنِ التَّالِيَتَيْنِ:-

$$\text{د س} = \text{د ح} \cdot \text{جتا} \delta = \text{جتا} \frac{1}{\text{ط ح}^2} \cdot \text{د ح} \dots\dots [14-4:2 \text{ أ}]$$

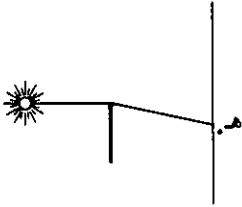
$$\text{د ص} = \text{د ح} \cdot \text{جا} \delta = \text{جا} \frac{1}{\text{ط ح}^2} \cdot \text{د ح} \dots\dots [14-4:2 \text{ ب}]$$



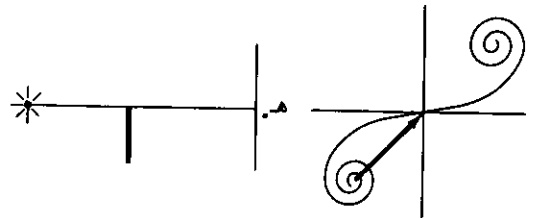
الشكل ٣: حلزون كيرتية

تطبيقات حلزون كيرنيه

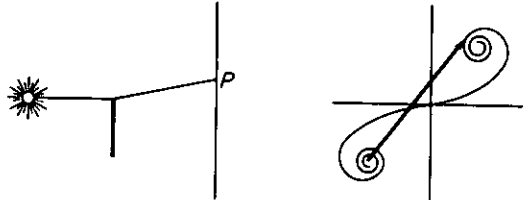
دَعْنَا نَتَنَاوَلْ أَوَّلًا مَثَالَ الْحَيُودِ عَنْ نِصْفِ مُسْتَوِيٍّ أَوْ حَاقَّةٍ سَكِينٍ؛ وَلِنَفْتَرِضْ أَنَّ النِّقْطَةَ هـ. تَقَعُ عَلَى امْتِدَادِ الْخَطِّ الْمُسْتَقِيمِ الْوَاصِلِ بَيْنَ الْمَصْدَرِ النَّقْطِيَّةِ وَطَرَفِ الْحَاقَّةِ أَيْ الْحَاجِزِ - الشَّكْلِ ٤. وَبِعِبَارَةٍ أُخْرَى فَالنِّقْطَةُ هـ. هِيَ الْحَدُّ الْهَنْدَسِيُّ لِلْظِّلِّ. وَيُمْكِنُ تَمَثُّلُ السَّعَةِ عِنْدَ هـ. بِمَتْجِهٍ ذَنْبُهُ الْعَيْنُ السَّالِبَةُ لِلْحَلْزُونِ K وَرَأْسُهُ النِّقْطَةُ (٠، ٠) كَمَا هُوَ مُوضَّحٌ فِي الشَّكْلِ ٤. فَعِنْدَمَا تَتَحَرَّكُ النِّقْطَةُ هـ. إِلَى مَنَاطِقَةِ الظِّلِّ الْهَنْدَسِيِّ يَنْكَمِشُ الْمَتْجَهُ فِي حَلْزُونِ كِيرْنِيهِ - الشَّكْلِ ٥، وَفِي الْحَقِيقَةِ يَنْكَمِشُ رَأْسُ الْمَتْجِهِ عَلَى مَسَارِ الْحَلْزُونِ، وَيَصْبِغُ بِاسْتِمْرَارٍ أَقْصَرَ. وَبِصُورَةٍ مِمَّاثِلَةٍ فَعِنْدَمَا تَتَحَرَّكُ النِّقْطَةُ هـ. خَارِجَ الظِّلِّ الْهَنْدَسِيِّ يَتَحَرَّكُ رَأْسُ مَتْجِهٍ السَّعَةِ أَكْثَرَ فَاكْثَرَ إِلَى الْجُزْءِ الْمَوْجِبِ مِنَ الْحَلْزُونِ - الشَّكْلِ ٦. وَكَمَا فِي الْحَالَةِ السَّابِقَةِ يَظَلُّ ذَنْبُ الْمَتْجِهِ مُثَبَّتًا عِنْدَ مَرْكَزِ الْعَيْنِ السَّالِبَةِ؛ وَلَكِنَّ طَوْلَ الْمَتْجِهِ يَتَغَيَّرُ الْآنَ تَغْيِيرًا دَوْرِيًّا لَا تَغْيِيرًا مَظَرْدًا كَمَا كَانَ الْحَالُ فِي الْجُزْءِ السَّالِبِ مِنَ الْحَلْزُونِ. وَيَعْنِي هَذَا أَنَّ النِّقْطَةَ هـ. عَلَى السَّيَّارَةِ تَتَحَرَّكُ عَبْرَ مُتَسَلْسِلَةٍ مِنَ النِّهَايَاتِ الْعَظْمَى وَالصَّغْرَى. وَتُضْبِحُ السَّعَةُ عِنْدَ بَعْضِ النِّقَاطِ أَكْبَرَ حَتَّى مِنَ السَّعَةِ الْحَاصِلَةِ مِنْ دُونِ حَاجِزٍ مُحَيَّدٍ يَفْتَرِضُ مَسَارَ الضَّوئية. غَيْرَ أَنَّ السَّعَةَ وَمِنْ ثَمَّ الشَّدَّةَ تَصِلَانِ فِي النِّهَايَةِ إِلَى قِيَمَةٍ مِمَّاثِلَةٍ تَمَامًا لِقِيَمَتَيْهِمَا مِنْ دُونِ حَاجِزٍ مُغْتَرِضٍ، وَعِنْدَ ذَلِكَ الْوَضْعِ أَيْ تِلْكَ النِّقْطَةِ تُمَثَّلُ السَّعَةُ بِطَوْلِ الْمَتْجِهِ الْمَمْتَدِّ مِنْ K إِلَى K.



الشَّكْلِ ٥: مَتْجِهُ السَّعَةِ لِحَيُودِ فَرْنِلٍ دَاخِلِ الظِّلِّ الْهَنْدَسِيِّ.



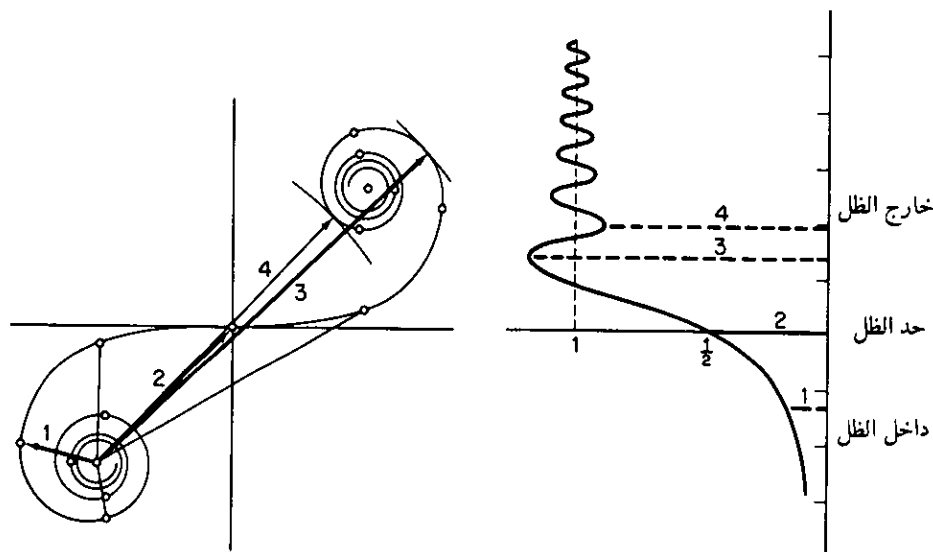
الشَّكْلِ ٤: حَيُودِ فَرْنِلٍ مِنْ نِصْفِ مُسْتَوِيٍّ وَسَّعَةُ الضَّوئية عِنْدَ النِّقْطَةِ هـ.



الشَّكْلِ ٦: الْحَيُودُ خَارِجَ مَنَاطِقَةِ الظِّلِّ الْهَنْدَسِيِّ.

لِنُعِد الآن ما قلناه من أنَّ التَّارَاجِحَاتِ تلك تُمَثِّلُ سَعَاتِ الضَّوْعِ خارجَ الظِّلِّ الهندسي .
وَنَقْدُمُ في الشَّكْل ٧ خلاصَةً لهذه العلاقة من خلال إظهار المواقع المختلفة لمتجهات السَّعة
التي يُشارُ إليها بالأرقام من ١ إلى ٤ في كُلِّ من حلزون كيرنيه وفي نَمِطِ الحيود خَلْفَ
نِصْفِ المُستوي . وَتُمَثِّلُ السَّعة عند الحدِّ الهندسي للظلِّ بِمُتَجِّهِ يَمْتَدُّ من النِّقْطَةِ K في الحَلَزُونِ
إلى النِّقْطَةِ $(0,0)$. وَلَمَّا كَانَ إِحْدَاثِيًّا كُلُّ من النِّقْطَتَيْنِ K ، $\bar{K}$ هُما $|0,5|$ ، $0,5$ ، فَإِنَّ
المَسَافَةَ من K إلى النِّقْطَةِ $(0,0)$ هي: $-\sqrt{0,5+0,5} = \sqrt{0,5+0,5}$ ، كَذَلِكَ تَكُونُ
الشَّدَّةُ عند حَدِّ الظِّلِّ $\frac{1}{4}$ الشَّدَّةُ التي تَكُونُ من دُونِ الحَافَّةِ أو الحَاجِزِ .

وَلَكِنِّي نَجِدُ قِيَمَ السَّعَاتِ الأُخْرَى من حلزون كيرنيه ، فلا يَلِزُنَا أَنْ نَقِيسَ طَوَلَ مَحْصَلَةِ
الْمُتَجْهَاتِ لِقِيَمِ حِ الْمَخْتَلِفَةِ التي تَحْدُدُ المَوَاقِعَ على الحَلَزُونِ - الجدول ١ . إِنَّ مَرِيعَ السَّعَةِ هي
الشَّدَّةُ . وَتَكُونُ شَدَّةُ النِّهَايَةِ العُظْمَى الأولى مثلاً ١,٣٥ ش. ، والنِّهَايَةُ الصَّغْرَى الأولى
٠,٧٧ ش. ، والنِّهَايَةُ العُظْمَى الثَّانِيَةُ ١,٢٠ ش. ، والنِّهَايَةُ الصَّغْرَى الثَّانِيَةُ ٠,٨٤ ش. ،
والنِّهَايَةُ العُظْمَى الثَّالِثَةُ ١,١٦ ش. ، والنِّهَايَةُ الصَّغْرَى الثَّالِثَةُ ٠,٨٧ ش. . وَهَكَذَا تَتَنَاقَصُ
شَدَّةُ النِّهَايَاتِ العُظْمَى وَتَزْدَادُ شَدَّةُ النِّهَايَاتِ الصَّغْرَى حَتَّى تُصْبِحَ قِيَمَةُ الشَّدَّةِ لِكُلِّ مَنَهِمَا
ش = ش. ، وَالتي هي شَدَّةُ الضَّوْعِ من دُونِ حَاجِزٍ .



الشَّكْل ٧ : أطوالُ المُتَجْهَاتِ في حلزون كيرنيه والسَّعَاتِ المُنَاطَرَةِ في نَمِطِ حَيُودِ فِرِنْلٍ . تَخِيلُ أَنْ نَصِفَ
المُسْتَوِي الَّذِي يُخْدِثُ الظِّلَّ بِوُجُودِ إِلَى يَسَارِ تَوَزِيعِ السَّعَةِ الَّذِي يَظْهَرُ إِلَى الِیْمِینِ وَفِي النِّصْفِ السُّفْلِ مِنْهُ
فَقَطْ .

تَذَكَّرْ أَنَّ هُنَاكَ دَاخِلَ الظِّلِّ الْهَنْدَسِيِّ تَنَاقُصًا تَدْرِيجِيًّا فِي الشَّدَّةِ، فِي حِينٍ يَكُونُ لِلشَّدَّةِ خَارِجَ الظِّلِّ نِهَايَاتٍ عَظْمَى وَصَغْرَى مُتَبَادِلَةً؛ إِلَّا أَنَّ هَذِهِ النِّهَايَاتِ الْمُتَبَادِلَةَ تَخْتَفِي تَدْرِيجًا كُلَّمَا ابْتَعَدْنَا عَنِ الْحَدِّ الْهَنْدَسِيِّ لِلظِّلِّ.

حِيودُ فِرْنَلٍ مِنْ شَقٍّ مُنْفَرِدٍ

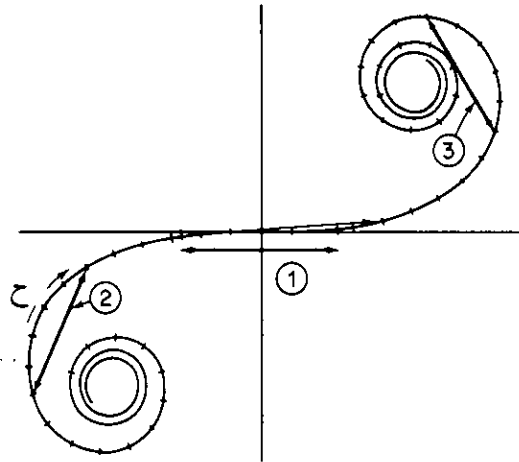
دَعْنَا نَتَنَاوَلْ بَعْدَ ذَلِكَ اسْتِخْدَامَ حُلُزُونٍ كِرْنِيهِ فِي حَالَةِ حِيودِ فِرْنَلٍ مِنْ شَقٍّ مُنْفَرِدٍ. لِنَفْتَرِضْ أَنَّ عَرْضَ الشَّقِّ هُوَ Δ ض. نُحَدِّدْ أَوَّلًا الطَّوْلَ ح عَلَى الْحُلُزُونِ الْمُنَاطِرِ لِلْعَرْضِ Δ ض الَّذِي نَحْصَلُ عَلَيْهِ مِنَ الْمَعَادِلَةِ التَّالِيَةِ :-

$$[١٥-٤:٢] \quad \Delta = \text{ح} \sqrt{\frac{(٢+أف)^2}{\lambda أف}} \dots\dots$$

حَيْثُ أ هِيَ الْمَسَافَةُ مِنَ الْمَصْدَرِ الضَّوئِيِّ إِلَى الشَّقِّ وَف الْمَسَافَةُ مِنَ الشَّقِّ إِلَى السَّتَارَةِ. فَعَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ فَعِنْدَمَا تَكُونُ $أ = ف = ٢ م$ ، $\lambda = ٥٠٠ \text{ ن.م}$ ، وَ $\Delta \text{ ض} = ٠,٢٥ \text{ م.م}$ ، نَجِدُ أَنَّ :-

$$\Delta = \text{ح} = ٣٦٠ \times ٠,٢٥ = \frac{(٢+٢)^2}{(٧٦٠ \times ٥) (٢) (٢)} = ٠,٥١$$

وَيَعْنِي هَذَا أَنَّ طَوْلَ الْقَوْسِ أَوْ الْجُزْءِ عَلَى الْحُلُزُونِ نَفْسِهِ هُوَ $٠,٥١$ وَحْدَةً، وَأَنَّ مَحْصَلَةَ السَّعَةِ هِيَ طَوْلُ وَتَرِ الْقَوْسِ ذَلِكَ. وَفِي وَسْطِ الْحُلُزُونِ يَمْتَدُّ جُزْءُ الْحُلُزُونِ الْمَشَارِ إِلَيْهِ بِالرَّقْمِ ١ فِي الشَّكْلِ ٨ مِنْ ح $٠,٢٥ -$ إِلَى ح $٠,٢٥ +$ ؛ وَتَكُونُ بِذَلِكَ مَحْصَلَةُ السَّعَةِ $٠,٥ =$ وَالشَّدَّةُ $ش = ع^٢ = ٠,٢٥$.



الشَّكْل ٨: تَطْبِيقُ حُلُزُونٍ كِرْنِيهِ عَلَى الْحِيودِ مِنْ شَقٍّ مُنْفَرِدٍ.

ولتحديد السعة والشدة عند أية نقطة أخرى على الستارة مثل هـ، يُستخدم جزء آخر من الحلزون، إلا أن هذا الجزء يظل ثابتاً في طوله. وكما هو واضح تتغير أطوال الأوتار المناظرة للأجزاء المختارة تبعاً لموقعها على الحلزون، وتتناسب أطوال الأوتار كما قيل سابقاً مع السعات عند النقاط المختلفة هـ.

ومن الممكن الحصول على دقة أعلى إذا ما استخدمت قيم تكاملية فيرنل مباشرة بدلاً استخدام حلزون كرنيه. فعلى سبيل المثال، فإمدى مقداره $\Delta = 0.5$ ، فإن قيمتي س اللتين تصفان حداثي ذلك المدى يمكن قراءتهما من الجدول ١ وطرحهما جبرياً للحصول على Δ س، وهي المكونة الأفقية للسعة. كذلك تُطرح قيمتا ص المناظران للحصول على Δ ص: المكونة الرأسية للسعة. ويُحصل على الشدة إذاً بجمع مربعتي هاتين الكميتين:-

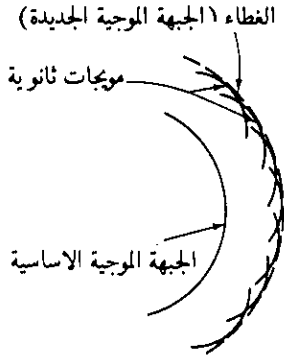
$$\text{ش} = \text{ع}^2 = (\Delta \text{س})^2 + (\Delta \text{ص})^2 \dots\dots [٢: ٤-١٦]$$

وتشبه حالة حيود فيرنل من سلك تماماً حالة الحيود من شق منفرد. ويُمثل قطر السلك بأطوال متساوية تقاس على الحلزون، كما تمثل السعات عند نقاط مختلفة على الستارة بأطوال الأوتار المناظرة. وبالاقتراب من عيني الحلزون تتغير السعة عادة مارة بسلسلة من النهايات العظمى والصغرى المتعاقبة.

وتسمى عملية إنقاص آثار الحيود أو على الأقل تكييفها - لتحسين أداء التلسكوبات الكبيرة مثلاً - بعملية إزالة الزوائد أو الأهداب apodization. وهذه العملية ممكنة من خلال توفير انتقال تدريجي بدلاً من الانتقال المفاجيء بين العدسة الشفافة وحاملها المعتم. وقد استخدمت لتحقيق هذا الغرض الأغلفة أو الطليات Coatings المتزايدة في اعتمادها من الوسط إلى المحيط، كما استخدمت الأطراف المُستتة والمُشبكات ذات الأسلاك الرفيعة fine wire meshes.

* يمكن الحصول على معالجة تامة لإزالة الزوائد من مقالة جاكينو P. Jacquinot وروازن - دوشيه B. Roizen-Dossier: «إزالة الزوائد» في كتاب: «التقدم في البصريات»، المجلد الثالث لمحرره ولف E. Wolf (امستردام - شركة نشر شمال هولندا، ١٩٦٤)، ص ٢٩ - ص ١٨٦.

مبدأ هيجنز Huygens' principle



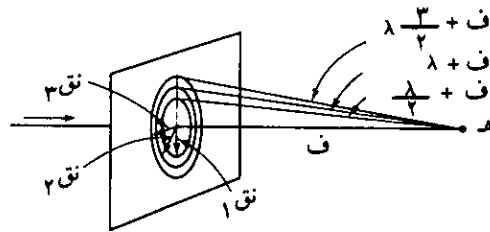
الشكل ٩: مبدأ هيجنز.

وَفَقْ مَبْدَأُ هَيْجَنْزٍ يُمَكِّنُ اعْتِبَارُ كُلِّ نَقْطَةٍ مِنَ الْجِهَةِ الْمَوْجِيَّةِ مَصْدَرًا لِمَوْجِيَّاتٍ ثَانَوِيَّةٍ Wavelet. وَيُشَكِّلُ غَطَاءُ هَذِهِ الْمَوْجِيَّاتِ الْجَبْهَةَ الْجَدِيدَةَ - الشَّكْلُ ٩. وَيُمْكِنُ بِهَذَا الْمَبْدَأُ تَصَوُّرُ كَيْفِيَّةِ انْحِنَاءِ الضَّوئِ وَحُيُودِهِ وَلَيْسَ مُجَرَّدَ انْتِشَارِهِ فِي خُطُوطٍ مُسْتَقِيمَةٍ. وَقَدْ بَرَهَانَ الصَّارِمَ لِمَبْدَأِ هَيْجَنْزٍ كِيرْتشوف، وَيُعْرَفُ هَذَا الْبَرَهَانُ بِنَظَرِيَّةِ كِيرْتشوف theory Kirchhoff's.

مَا الطُّولُ الَّذِي يَتَّبَعِي أَنْ يَكُونَ لِلْمَوْجِيَّةِ الثَّانَوِيَّةِ؟ يَتَوَقَّفُ ذَلِكَ عَلَى الْوَسْطِ: فَفِي وَسْطٍ مُتَجَانِسٍ، حَيْثُ سُرْعَةُ الضَّوئِ وَاحِدَةٌ فِي جَمِيعِ الْأَتَجَاهَاتِ، تَكُونُ الْمَوْجِيَّاتُ أَطْوَلًا. أَمَّا فِي الْوَسْطِ غَيْرِ الْمُتَجَانِسِ الْمَتَبَايِنِ الْخَصَائِصِ وَلَا سَيَّمَا عِنْدَ الْانْقِطَاعَاتِ discontinuities فَإِنَّ الْمَوْجِيَّاتِ يَتَّبَعِي أَنْ تَكُونَ طَوِيلَةً إِلَى الْحَدِّ الَّذِي يُمَكِّنُ مَعَهُ اعْتِبَارُ سُرْعَةِ الطَّوْرِ ثَابِتَةً دَاخِلَ كُلِّ مَوْجِيَّةٍ.

مناطق نصف - الدورة Half-Period Zones

خُذْ مَوْجَةً مُسْتَوِيَةً طَوَّلُهَا الْمَوْجِيُّ λ وَتَتَحَرَّكُ مِنَ الْيَسَارِ إِلَى الْيَمِينِ كَمَا فِي الشَّكْلِ ١٠. يُمَكِّنُ فِي أَيَّةِ لَحْظَةٍ زَمْنِيَّةٍ تَقْسِيمَ الْجَبْهَةِ الْمَوْجِيَّةِ إِلَى عَدَدٍ مِنَ الْمَنَاطِقِ مُتَّحِدَةِ الْمَرْكَزِ بِحَيْثُ يَكُونُ بُعْدُ كُلِّ مَنَاطِقَةٍ مِنَ النِّقْطَةِ هـ أَكْثَرَ مِنْ بُعْدِ الْمَنَاطِقَةِ السَّابِقَةِ لَهَا تَمَامًا بِمَقْدَارِ نِصْفِ طَوْلِ الْمَوْجَةِ. فَإِذَا كَانَتِ الْمَسَافَةُ بَيْنَ الْجَبْهَةِ الْمَوْجِيَّةِ وَالنِّقْطَةِ هـ هِيَ ف، فَإِنَّ الْمَسَافَاتِ مِنَ الْحُدُودِ الْمُتَعَادِلَةِ الْفَاصِلَةِ بَيْنَ الْمَنَاطِقِ تَكُونُ عَلَى النَّحْوِ التَّالِي:-



الشكل ١٠: مناطق نصف الدورة يُفْرِزُ عَلَى جَبْهَةٍ مَوْجِيَّةٍ مُسْتَوِيَةٍ.

+ كَرِسْتِيَانْ هَيْجَنْز (١٦٢٩-١٦٩٥): الْفِيْزِيَاثِي، الْفَلَكَي، وَالرِّيَاضِي الْهَوْلَنْدِي. فِي عَامِ ١٦٧٨ قَدَّمَ هَيْجَنْزُ الَّذِي أَطْلَعَ عَلَى مُشَاهَدَاتٍ جُرْعَالَدِي نَظَرِيَّتِهِ إِلَى الْاَكَادِمِيَّةِ الْعِلْمِيَّةِ الْفَرَنْسِيَّةِ.

$$[١٧-٤:٢] \quad \dots, \frac{\lambda n}{2} + f, \dots, \frac{\lambda^3}{2} + f, \frac{\lambda^2}{2} + f, \frac{\lambda}{2} + f$$

وَمِنْ نظرية فيثاغورس نجدُ أنَّ نصفَ قُطرِ الحدِّ الفاصلِ التَّوْنِي هو:-

$$[١٨-٤:٢] \quad \text{نق}_n = \sqrt{f^2 - \left(\frac{\lambda n}{2} + f\right)^2} \dots$$

وَتَبْلُغُ مساحةُ جميعِ المناطقِ التَّوْنِيَةِ الأولى:-

$$[١٩-٤:٢] \quad \text{م}_n = \text{ط}_n = \left[f^2 - \left(\frac{\lambda n}{2} + f\right)^2 \right] = \left[\left(\frac{\lambda^2 n^2}{4} + \lambda n + f\right) \right] \dots$$

وَيَتَّبِعُ من ذلك أن مساحةَ المناطقِ الأولى التي عَدُّها ن-١ هي:-

$$\text{م}_{1-n} = \left[\left(\frac{\lambda^2}{4}\right)^2 (1-n) + \lambda (1-n) + f \right]$$

وَتَكُونُ مساحةُ المنطقةِ الواحدةِ هي:-

$$[٢٠-٤:٢] \quad \text{م} = \text{ط} \text{ ف } \lambda [1 + (1-n) \frac{\lambda}{4}] \dots$$

وَلَمَّا كَانَتْ λ صغيرةً بالمقارنةِ معَ ف فيمكنُ إهمالُ الحدِّ $\frac{\lambda}{4}$. وتَصِبُحُ لذا المعادلةُ السابقةُ على النحوِ التالي:-

$$[٢١-٤:٢] \quad \text{م} \approx \text{ط} \text{ ف } \lambda \dots$$

وَتُظْهِرُ هذه المعادلةُ أنَّ المناطقَ المختلفةَ تَتَسَاوَى تقريباً في المساحة. وبصورةٍ أكثرَ دقةً تزدادُ المساحاتُ ببطءٍ كبيرٍ جداً كلما ابتعدتِ المناطقُ من المركز.

خُذْ بعَدَ ذلك الأمواجَ التي تمرُّ بتلكِ المناطقِ وتَصِلُ النقطةَ هـ. وَلَمَّا كَانَتْ كُلُّ منطقةٍ لاحقةً تزدادُ بُعْداً من هـ يَنْصِفُ طولَ موجيٍّ في المتوسطِ، فإنَّ الأمواجَ من المناطقِ المتعاقبةِ تَخْتَلِفُ في الطَّوْرِ بمقدارِ ط أو ١٨٠° . ولذلك تُساوِي محصلةُ السَّعَةِ ع عندَ النقطةِ هـ الناشئةُ عن الضوءِ المارِّ بجميعِ المناطقِ مَجْمُوعَ حُدُودِ مُتَسَلِّسَةٍ متبادلةٍ في إشاراتها:

$$ع = ع \Delta - ١ ع \Delta + ٢ ع \Delta - ٣ ع \Delta + ٤ ع \Delta + \dots$$

$$[٢٢-٤:٢] \quad \dots + (١-) \Delta^{١-٠} ع \dots$$

ولأننا نتناول السعات التي هي متجهات، فإن المجموع السابق هو حقيقة مجموع متجهي: كل متجه لاحق يُشير إلى اتجاه مضاد للمتجه السابق. وعلاوة على ذلك تصغر السعات كلما ابتعدت المناطق عن المحور أو المركز.

نعود الآن إلى الشكل ١٠، ونفترض أن حاجزاً بفتحة دائرية قد وُضع في مستوى الجبهة الموجية بمناطقها المختلفة، بحيث لا تسمح الفتحة إلا بمرور الضوء في المنطقة الداخلية الأولى. وتكون السعة الكلية هي إذا $ع \Delta$ وهي تساوي ضعف السعة أو أربعة أمثالي الشدة الحاصلة من دون الفتحة أو الثقب. وإذا ما وُسعت الفتحة أو قربت الستارة مسافة ما على المحور البصري بحيث يُسمح للضوء الآتي من المنطقتين الأولى والثانية بالمرور، فإنَّ مُحصلة السعة تكون $ع \Delta - ٢ ع \Delta$ أي عملياً صفراً. وبذلك فإنَّ أي زيادة في حجم الفتحة أو أي تغيير في موضع الستارة يُحدث بالتعاقب نهايات غُظى وصغرى على المحور البصري تبعاً لكون عدد المناطق المشمولة فردياً أم زوجياً. لاحظ أننا نحصل دائماً في الوضع المركزي هـ. على نهاية غُظى في حالة حيود فرونفور من فتحة دائرية. ومع أننا قد تناولنا حتى الآن مناطق فرينل المنشأة على جبهة موجية مستوية، إلا أنَّ النتائج نفسها تصح للجبهات الموجية الكُرَيَّة.

وبالاعتياض عن الفتحة الدائرية بقرص دائري، فإنَّ نظرية فرينل تقودنا إلى استنتاجات مدهشة: وهي أنَّه ينبغي أن يكون هنالك بقعة لامعة في مركز الظل أو وسطه. ففي حالة الحيود من قرص أو ثقب دائري فلا يوجد هنالك إلا شعاعان من نقطتين متقابلتين نظرياً يمكن أن يُحيدا إلى أية نقطة خارج المحور؛ بيد أنَّه يوجد هنالك عدد غير متناه من الأشعة من جميع نقاط المحيط تصل إلى أية نقطة على المحور. وتكون هذه الأشعة بقعة بواسون Poisson's spot التي دُكرت باختصار في الفصل السابق. وإذا ما أضيء

• سميت باسم سيمون دِينِس بواسون Simeon Denis Poisson (١٧٨١-١٨٤٠): الفيزيائي الفرنسي. وكعضو في اللجنة التي ناقشت أطروحة فرينل استنتج بواسون أنه إذا ما كان فرينل صحيحاً في رأيه فإنَّ بقعة مركزية مضيئة سوف تظهر في ظل حاجز دائري سواء أكان الحاجز موجوداً أم لا. وقدم بواسون =

حاجز دائري بمصدرين نقطيين فسوف تظهر بقعتان مثل بقعة بوازون، ويمكن اعتبار هاتين البقتين صورة للمصدرين. وبالاغتياض عن المصدرين النقطيين بشريحة فانوس توضع أمام صندوق الضوء تتكون صورة حقيقية للشريحة حتى إذا لم نستخدم كعدسة شيئية سوى كمرية معدنية مضمّنة. ونحصل على صورة ذات شدة أعلى إذا ما استخدمنا بدل الكرة سلسلة من الحلقات المتحدة المركز ذات الاقطار العشوائية كحاجز مَحَيّد.

لوحة مناطق فرنل Fresnel Zone plate

تَحَيّل الآن أن منطقة من كُلِّ منطقتين متعاقبتين جعلت معتمّة بحيث لا يُسمَح بِمُرور الضوء فيها. وَيَعْنِي هذا إزالة جميع الحدود الموجبة أو جميع الحدود السالبة من المعادلة [٢٢-٤:٢]. وفي كلا الحالتين تزداد قيمة السعة عند النقطة المركزية عدّة مرات قدر قيمتها كما لو كانت جميع المناطق مفتوحة. وَيُسَمَّى ذلك الشيء الذي يتألّف من مناطق متحدة المركز متعاقبة في إعتامها وشفافيتها **لوحة مناطق فرنل**، وتُسَمَّى أيضاً «عدسة المنطقة» بسبب خصيصتها في التركيز - الشكل ١١.

وتُعتبر لوحة المناطق العنصر الوحيد تقريباً المكوّن للصورة الذي لا يوجد له نظير معروف في الطبيعة. ويعود مفهومها إلى اللورد ريلي Rayleigh الذي أنشأ لأول مرة عام ١٨٧١ هذه اللوحة، وإلى سوريت Soret الذي نشر أول وصف لها عام ١٨٧٥+.

ويمكن صنع لوحات المناطق بالرسومات التي تُمثّل دوائر كبيرة، وذلك بسد منطقة من كُلِّ منطقتين متعاقبتين، ثم باختزالها فوتوغرافياً أو بوسائل بصرية*. وتتألّف لوحات

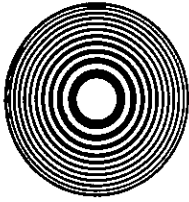
= استنتاجه هذا باستخدام البرهان غير المباشر (طريقة الاختزال الى الخطأ) كدليل على خطأ نظرية فرنل، ولم يعرف ان البقعة المضيئة قد اكتشفها مارالدي وديسليلي Maraldi and Dislisle قبل ما يزيد على ٥٠ سنة. وبعد الاعتراض الذي ابداه بوازون قام أراجو Arago مباشرة بتجربة استخدم فيها قرصاً قطره ٢ مم معيداً بذلك اكتشاف بقعة مارالدي. ومع ذلك بقي اسم بوازون خالداً رغم ذلك الاعتراض أو بسببه. وسميت الظاهرة من ذلك الوقت باسمه أي بقعة بوازون.

†J. L. Soret, "Die durch Kreisgitter erzeugten Diffractionsphaenomene," *Pogg. Ann. Physik* 156 (1875), 99.

*H. H. M. Chau, "Zone Plates Produced Optically," *Applied Optics* 8 (1969), 1209-11.

المناطق ذات النوعية العالية من بضعة آلاف من المناطق. وفي العادة تكون هذه المناطق معتمة أو شفاقة أي كَلَوَحاتٍ مناطقٍ فَرِيلٍ؛ غَيْرَ أَنَّهُ يُمْكِنُ أَيْضاً إِنْتَاجَ مناطقٍ ذاتِ توزيعٍ كَثَافِيٍّ جَيِّبِيٍّ وَلَهَا فَوَائِدُ مُعَيَّنَةٌ كَلَوَحاتٍ مناطقٍ جَابورٍ Gabor Zone plates. وتتناسب أنصاف أقطار الحدود الفاصلة بين المناطق مع الجذر التربيعي للأعداد الطبيعية:

$$نق_1 = \sqrt{ن}, \quad ن = 1, 2, 3, \dots \quad [٢٣-٤:٢]$$



الشكل ١١: الجزء المركزي من لوحة المناطق.

حيث $نق_1$ هو نصف قطر الحد النوني و $نق_2$ نصف قطر الحد الفاصل الأول. وَنَجِدُ من المعادلة [١٨-٤:٢] أنَّ:

$$ف^2 = (ف + ن \frac{\lambda}{2})^2 - نق_1^2$$

$$ن ف = \lambda نق_2$$

ولكن $ف$ هي أيضاً البعد البؤري $ب$ للوحة المناطق، وهكذا نحصلُ على :-

$$ب = \frac{نق_2}{ن \lambda} = \frac{نق_1}{\lambda} \dots \quad [٢٤-٤:٢]$$

وَتُظْهِرُ المعادلةُ الأخيرةُ أَنَّ البعدَ البؤريَّ $ب$ يتناسبُ عَكْسِيّاً مع الطولِ الموجيِّ خِلَافاً للعدسةِ الاعتياديةِ، حَيْثُ يَزْدَادُ البعدُ البؤريُّ مع الطولِ الموجيِّ. وَيتغيرُ البعدُ البؤريُّ لِلوَحَةِ بِشَكْلِ هَامٍ بِتَغْيِيرِ الطولِ الموجيِّ، وَهُوَ يَتَأَثَّرُ بِالزَوَاجِنِ اللَّوْنِيَّةِ الشَّدِيدِ. وَتَعْمَلُ «عَدْسَةُ المناطقِ» مِثْلَ عدسةٍ موجبةٍ وعدسةٍ سالبةٍ، إِذْ أَنَّ بُعْدَهَا البؤريَّ حَقِيقَةٌ هُوَ $\pm ب$. وَيَعُودُ سَبَبُ ذَلِكَ إِلَى أَنَّ الضَّوْءَ الْمُحَيَّدَ من الحدودِ الفاصلةِ لَا يُحَيَّدُ فَحَسَبُ فِي اتِّجَاهِ المحورِ البصريِّ وَإِنَّمَا كَذَلِكَ بَعِيداً عَنْهُ. وَعِلَاقَةٌ عَلَى ذَلِكَ وَخِلَافاً للعدسةِ العاديةِ، فَإِنَّ لعدسةِ المناطقِ عِدَّةَ بؤرٍ بَدَلِ البؤرةِ الواحدةِ، نظراً لِأَنَّ هُنَاكَ حَيُوداً مِنْ رُتَبٍ عَالِيَةٍ. وَحَتَّى الْآنَ فَقَدْ

أشَرْنَا فَقَطْ إِلَى الْبُورَةِ الْأَكْثَرِ سُطُوعاً أَيْ الْبُورَةِ الرَّئِيسَةِ الَّتِي هِيَ الْبُورَةُ الْأَبْعَدُ. وَتَوَجَّدَ هُنَاكَ بُورٌ أَقْلُ سُطُوعاً وَعَلَى أبعادٍ بُورِيَّةٍ تَبْلُغُ $\frac{1}{3}$ ، $\frac{1}{5}$ ، $\frac{1}{7}$ ، ... البعدُ البُورِي الرَّئِيسِي.

وَيَرْتَبِطُ الْبَعْدُ الْبُورِيُّ لَعَدْسَةِ الْمَنَاطِقِ بِمَسَافَتِي الْجِسْمِ وَالصُّورَةِ بِنَفْسِ الْكَيْفِيَّةِ كَمَا فِي الْعَدْسَةِ الْاَعْتِيَادِيَّةِ: $\frac{1}{b} = \frac{1}{f_v} + \frac{1}{f_r}$. وَعِنْدَ تَثْبِيتِ عَدَدِ الْمَنَاطِقِ تَعْتَمِدُ أَقْلُ مَسَافَةٍ (أَيْ ف الصغرى) يُمَكِّنُ تَبَيُّنَهَا بِلَوْحَةٍ الْمَنَاطِقِ عَلَى الْبَعْدِ الْبُورِيِّ ب وَالْقَطْرِ (ق): -

$$[25-4:2] \quad f_{\text{الصغرى}} \approx 1,22 \lambda \frac{b}{c} \dots\dots$$

وَتُمَثِّلُ هَذِهِ الْمَعَادَلَةُ مَعْيَارَ رَيْلي. وَبَوَضَّحَ الْمَعَادَلَةُ [24-4:2] فِي الْمَعَادَلَةِ [25-4:2]، نَحْصَلُ عَلَى: -

$$[26-4:2] \quad f_{\text{الصغرى}} \approx \frac{1,22 \lambda \text{ نق}^2}{c} \dots\dots$$

وَتُظْهِرُ الْمَعَادَلَةُ الْأَخِيرَةُ أَنَّهُ يُمْكِنُ تَبَيُّنُ التَّفَاصِيلِ الصَّغِيرَةِ عِنْدَمَا تُجْعَلُ لَوْحَةُ الْمَنَاطِقِ أَصْغَرَ حَجْماً. وَلِلْوَهْلَةِ الْأُولَى قَدْ يَظُنُّ الْمَرْءُ أَنَّ انْقِصَافَ ق يَزِيدُ فَقَطْ قِيَمَةَ ف الصغرى؛ وَلَكِنْ لَمَّا كَانَ الْبَعْدُ الْبُورِيُّ لَعَدْسَةِ الْمَنَاطِقِ يَقِلُّ تَبَعاً لِمَرْبِعِ نِصْفِ قَطْرِ الْحَدِّ الْفَاصِلِ، فَإِنَّ التَّأثيرَ الْإِجْمَالِيَّ هُوَ أَنَّ اللَّوْحَةَ الصَّغْرَى تُغْطِي تَبَيُّناً أَفْضَلَ. فَعَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ، فَقَدْ أُمْكِنَ صِنَاعَةُ عَدْسَةِ مَنَاطِقٍ لَهَا ٥٠ مَنَظِقَةً شَفَافَةً يَصِلُ قَطْرُهَا فِي صِغَرِهِ إِلَى ٥،٠ مِم، وَلِهَذِهِ الْعَدْسَةُ قُوَّةُ تَبَيُّنٍ تُسَاوِي ١،٣ × ١٠^{-٣} مِم أَيْ أَقْلَ بِأَرْبَعِ مَرَاتٍ فَقَطْ مِنْ قُوَّةِ تَبَيُّنِ شَيْئِيَّةِ مَيْكروسكوبٍ عَالِي الْقُوَّة. وَلَقَدْ اسْتُخْدِمَتِ لَوَحَاتُ الْمَنَاطِقِ الْفَلْزِيَّةِ الَّتِي تَحْتَوِي عَلَى فَجَوَاتٍ مَفْتُوحَةٍ مَا بَيْنَ الْمَنَاطِقِ فِي مَدَى الْأَشْعَةِ السَّيْنِيَّةِ + حَيْثُ يُعْتَبَرُ التَّرْكِيزُ مِنْ دُونِهَا مُشْكَلَةً.

وَيُبَدَّدُ نِصْفُ الضَّوءِ فِي لَوْحَةِ الْمَنَاطِقِ الْعَادِيَّةِ لِأَنَّهُ يُمْتَصَّصُ بِالْمَنَاطِقِ الْمَعْتَمَةِ. وَلَوْ كَانَ مُمَكِّناً الْاِسْتِفَادَةَ مِنْ نِصْفِ الضَّوءِ هَذَا، لِأَمْكَنَ الْحَصُولُ عَلَى شِدَّةٍ تَبْلُغُ ٤ أَمْثَالِ الشِدَّةِ الَّتِي يُحْصَلُ عَلَيْهَا فِعْلاً مِنْهَا. وَبِالْفِعْلِ فَقَدْ تَمَّ صِنْعُ لَوَحَاتِ الْمَنَاطِقِ الْعَاكِسَةِ لِلطَّوْرِ Zone plate

*C. von Fragstein and K. Weber, "Abbildungseigenschaften von Zonenlinsen," *Optik* 11 (1954), 270-81.

†A. V. Baez, "Fresnel Zone Plate for Optical Image Formation Using Extreme Ultraviolet and Soft X Radiation," *J. Opt. Soc. Am.* 51 (1961), 405-12.

Phase reversal † باقتراح من ريلي، وهي لا تحتوي إلا على مناطق شفافة: نصفها أكثر سُمْكاً مما يتسبب في إبطاء الضوء بنصف طول موجي $\frac{\lambda}{4}$. وعدسات فِرِنل هي عدسات مُبسطة إجمالاً تحوي أخاديد متحدة المركز ذات قِطْع سطحية تُشبه سطح العدسة الاعتيادية.

عامل الانفراج Obliquity Factor

لم يتناول مبدأ هيجنز ونظرية فِرِنل التي أتت بعده حقيقة أن الموجات الثانوية لا يمكن أن يكون لها سعات متساوية في جميع الاتجاهات. ولو كان الأمر كذلك لتحركت الموجات الثانوية بنفس القوة في الاتجاه الخلفي، لكن الأمر على خلاف ذلك كما هو واضح. ولقد بقي الأمر على حاله حتى وسّع كيرتشف Kirchoff نظريتي هيجنز وفِرِنل بإدخال عامل الانفراج.

ويتطلب عامل الانفراج أن تتغير السعة تبعاً للدالة $\frac{1}{r}$ (١+ جتا θ)، حيث θ هي الزاوية المعمولة مع الاتجاه الأمامي. وباستخدام المتطابقة جتا $\alpha = \frac{1}{4}$ (١+ جتا α)، يمكن كتابة السعة آخذين بعين الاعتبار عامل الانفراج في صيغتين متبادلتين:-

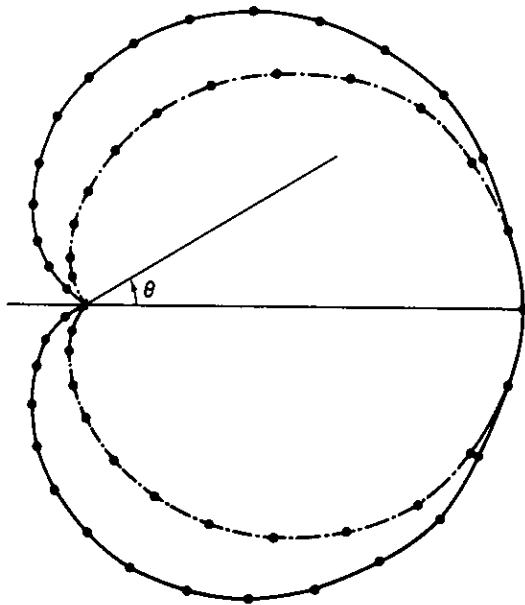
$$\bar{G} = \frac{1}{4} \bar{G} (1 + \cos \theta) = \frac{1}{4} \bar{G} [1 + \cos(\frac{\theta}{4})]$$

$$= \bar{G} \cos^2(\frac{\theta}{4}) \dots\dots [2: 4-27]$$

وفي الاتجاه الأمامي حيث $\theta = 0$ صفر يبلغ عامل الانفراج قيمته العليا وهي الواحد الواحدة. وعندما تبلغ $\theta = 90^\circ$ يُهبط عامل الانفراج إلى $\frac{1}{4}$ قيمته القصوى، بينما تهبط الشدة إلى $\frac{1}{16}$ قيمتها القصوى. أما في الاتجاه الخلفي فيكون كل من عامل الانفراج، السعة، والشدة صفراً. ويوضح الشكل ١٢ كيف تتغير كل من السعة والشدة مع عامل الانفراج، وفي الفراغ ذي الأبعاد الثلاثة يأخذ المنحنى شكل القلب Cardioid.

†R. W. Wood, *Phil. Mag.* 45 (1898), 511.

وتفترض نظرية كيرتشف أنه يمكن تمثيل الموجة الكهرومغناطيسية عند أية نقطة في الفراغ بتكامل فوق سطح مغلق محيط بالنقطة تلك . ومهما يكن الأمر، فإن نظرية كيرتشف فشلت في أن تأخذ بعين الاعتبار أن الضوء يحتوي فعلاً على كميات متجهة مُستعرضة. وسنتناول هذه الكميات بمزيد من التفصيل في فصل لاحق عن النظرية الكهرومغناطيسية. وإذا ما أُدخِلَت الخصائص الكهرومغناطيسية في أية نظرية صارمة للحيود، كما هو الحال في منحنى سَمرفيلد Sommerfeld على سبيل المثال فمن الممكن التنبؤ بأن ظواهر الحيود تختلف تبعاً لكون الضوء مُستقطباً في اتجاه مواز للحافة المُحيّدة أو عمودياً عليها؛ كذلك تحصل بعض الفوارق في الحيود تبعاً لكون الحافة موصلة للكهرباء أو عازلة.



الشكل ١٢: عامل الانفراج في مبدأ هيجنز: يمثل المنحنى الخارجي السعة، أما المنحنى الداخلي فيمثل توزيع الشدة.

اقتراحات لقراءات اضافية

- C. L. Andrews, *Optics of the Electromagnetic Spectrum* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1960).
- R. S. Longhurst, *Geometrical and Physical Optics*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967).
- J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1968).
- M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 4th ed. (Oxford, London, New York: Pergamon Press, Inc., 1970).
- A. Sommerfeld, "Optics," *Lectures on Theoretical Physics*, Vol. 4. (New York: Academic Press, Inc., 1954).

المسائل

- ١-٤:٢ يَمُرُّ شعاعٌ من الميكروويف تواتره ٢,٥ جيجا هرتز في ثُقْبٍ دائريٍّ قطره ٦٠ سم. جِدْ مدى المجالي القريب، وَجِدْ أيضاً مدى المجالي البعيد كما يُقاسان من الثقب.
- ٢-٤:٢ سُدِّدَ الضوءُ مِنْ مصدرٍ نُقْطِيٍّ بعدسةٍ بُعْدُهَا البُؤْرِيُّ ٤٠ سم، ثُمَّ سَقَطَ بَعْدَ ذَلِكَ عَلَى جِسْمٍ شَبِيهِ مُعْتَمٍ مَوْضُوعٍ عَلَى بُعْدِ ٦٠ سم مِنَ العدسةِ وَعَلَى نَفْسِ البعدِ مِنْ ستارةٍ يُشَاهَدُ عَلَيْهَا تَأْثِيرُ الحيودِ. هَلْ تَعْتَبِرُ الحَالَةُ هَذِهِ مِثَالاً عَلَى حَيُودِ فَرُونْهوفرٍ أَمْ حَيُودِ فِرِنلٍ؟ فَسِّرْ إجابَتَكَ بالاستعانةِ بِرِسْمٍ شُعاعيِّ.
- ٣-٤:٢ باستخدامِ حلزُونٍ كِرْنِيهِ، الرِّسْمِ البيانيِّ، وَنَظَرِيَةِ فيثاغورس، جِدِ السَّعَةَ وَالشَّدَّةَ: (أ) عِنْدَ النِّهَايَةِ العَظْمَى الكُبْرَى (ب) عِنْدَ النِّهَايَةِ الصَّغْرَى المَجاوِرَةِ لَهَا وَذَلِكَ فِي نَمِطِ الحَيُودِ المَكُونِ مِنْ حَافَةِ حَادَّةٍ. اسْتَخْدِمِ نَفْسَ الوَحْدَاتِ الَّتِي رُسِمَ بِهَا حلزُونُ كِرْنِيهِ فِي الشَّكْلِ ٢-٤:٣.
- [ملاحظة: لَمَّا كَانَ نِصْفُ الضوءِ يُرَدُّ بِالْحَافَةِ الحَادَّةِ، وَلَكِي تُشِيرَ إِلَى الْقِيَمَةِ الْأَصْلِيَّةِ مِنْ دُونِ حَاجِزٍ عَلَى أَنَّهَا وَحْدَةٌ وَاحِدَةٌ، فَيَنْبَغِي أَنْ تَقْسِمَ النَتَائِجَ عَلَى ٢ أَيْضاً].
- ٤-٤:٢ يَخْدُثُ حَيُودُ فِرِنلٍ مِنْ شَقٍّ مَزْدُوجٍ: شِقَّاهُ مُتساوِيَانِ فِي العَرْضِ وَمُنْفَصِلَانِ عَنِ بَعْضِهِمَا بِمَسَافَةٍ مِنْ مَرَكَزَيْهِمَا مُساوِيَةٍ لثَلَاثَةِ أَمْثَالِ عَرْضِ كُلِّ مِنْهُمَا. يَبِينُ كَيْفَ يُمَكِّنُ تَمَثُّلُ هَذِهِ الحَالَةِ بِمَسَافَاتٍ وَأَوْتَارٍ صَحِيحَةٍ تَخْتَارُ اعْتِبَاطاً عَلَى حَلَزُونِ كِرْنِيهِ.

- ٥-٤:٢ شوهّد حَيُودُ فِرْنَلْ خَلَفَ سِلْكُ سُمُكُهُ ١٥ مم موضوعَ عَلَى بُعْدِ ٢ م من المصدرِ الضوئِيِّ وَعَلَى بُعْدِ ٣ م من الستارة. فاذا اسْتُخْدِمَ ضوءٌ طَوْلُهُ الموجيُّ $\lambda = 630$ نم، فَمَا الطَوْلُ (ل) عَلَى حَلْزُونِ كِرْنِيهِ الَّذِي يُمَثِّلُ سَمَكَ السِّلْكِ.
- ٦-٤:٢ تُظْهَرُ الْحَبْرَةُ أَنَّ قُرْصاً فَلْزِيّاً يُعْطِي بِقَعَةً يُوازونَ بِنَفْسِ الْجَوْدَةِ الَّتِي تُعْطِيهَا كَرَّةٌ فَلْزِيَّةٌ مِنْ نَفْسِ الْقَطَرِ. بِافْتِرَاضٍ أَنَّ مَصْدَرَ الضَّوْءِ وَالسَّتَارَةَ يَتَبَعْدَانِ عَنَ بَعْضِهِمَا مَسَافَةً ٤ م، وَأَنَّ الْقُرْصَ الَّذِي قَطْرُهُ ١ سم قَدْ وُضِعَ فِي مُتَنَصِفِ الْمَسَافَةِ بَيْنَهُمَا، فَمَا الْفَارَقُ فِي الطُّورِ الَّذِي نَحْصُلُ عَلَيْهِ بَيْنَ نَقْطَتَيْنِ مُتَطَرِفَتَيْنِ فِي الْمَصْدَرِ الْمَسَافَةِ بَيْنَهُمَا ٥ مم؟
- ٧-٤:٢ قُطِرُ الْحَدِّ الْفَاصِلِ الثَّامِنِ فِي لَوْحَةِ الْمَنَاطِقِ ٥ مم. جِدْ بَعْدَهَا الْبُورِيَّ الرَّئِيسَ عِنْدَ اسْتِخْدَامِ ضَوْءِ طَوْلُهُ الموجيُّ $\lambda = 500$ نم. جِدْ أَيْضاً الْبَعْدَيْنِ الْبُورِيَّيْنِ التَّالِيَيْنِ.
- ٨-٤:٢ إِذَا كَانَ لِلَّوْحَةِ الْمَشَارِ إِلَيْهَا فِي الْمَسْأَلَةِ ٧-٤:٢ (٥٠) مَنطَقَةٌ مُعْتَمَةٌ أَوْ ١٠٠ حَدِّ فَاصِلٍ. فَجِدْ أَقْلَ مَسَافَةٍ يُمْكِنُ تَبَيُّنُهَا؟
- ٩-٤:٢ صُنِّعَتْ عَدْسَةٌ مَنَاطِقَ لَتُسْتَخْدَمَ لِلْأَشْعَةِ السَّيْنِيَّةِ الَّتِي طَوْلُهَا الموجيُّ $\lambda = 40$ أنْجَسْتروم. فَجِدِ الْقَطْرَ الْخَارِجِيَّ الَّذِي يَنْبَغِي أَنْ يَكُونَ لِلَّوْحَةِ إِذَا مَا احْتَوَتْ عَلَى ٢٥ مَنطَقَةً وَإِذَا مَا مُيَزَّ بِهَا تَفْصِيْلَاتٌ تَبْلُغُ فِي طَوْلِهَا ١٠×١٠-٣ مم. مَا الدَّوْرُ الَّذِي يَلْعَبُهُ الطَوْلُ الموجيُّ تَحْتَ هَذِهِ الظُّرُوفِ؟
- ١٠-٤:٢ جِدِ الزَّوْغَانَ الْكُرِّيَّ الطَوْلِيَّ لِلَّوْحَةِ الْمَنَاطِقِ الْمَوْصُوفَةِ فِي الْمَسْأَلَةِ ٩-٤:٢ لَطَوَيْنِ مُوجِيَيْنِ: ٤٥٠ نم، ٦٠٠ نم.
- ١١-٤:٢ جِهَةٌ مُوجِيَّةٌ سَعَتْهَا ع = وَحْدَةٌ وَاحِدَةٌ تَتَحَرَّكُ فِي اتِّجَاهِ الشَّرْقِ. فَبِاعْتِبَارِ عَامِلِ الْإِنْفِرَاجِ، جِدِ النِّسْبَةَ بَيْنَ سَعَاتِ مُوَيَّجَاتِ هَيْجِنَزِ الصَّادِرَةِ مِنْ نَقْطَةٍ عَلَى الْجِبْهَةِ الْمَوْجِيَّةِ وَتَتَحَرَّكُ نَحْوَ الْغَرْبِ، الشَّمَالِ الْغَرْبِيِّ، الشَّمَالِ، الشَّمَالِ الشَّرْقِيِّ، وَالشَّرْقِ.
- ١٢-٤:٢ جِدِ النِّسْبَةَ بَيْنَ شِدَّةِ الضَّوْءِ الْمُتَقَدِّمِ فِي اتِّجَاهِ الْغَرْبِ، الْغَرْبِ الشَّمَالِيِّ، الشَّمَالِ، الشَّمَالِ الشَّرْقِيِّ وَالشَّرْقِ كَمَا فِي الْمَسْأَلَةِ ١١-٤:٢. أَرَسِّمْ شَكْلاً مُتَجَهِّياً مُوضِحاً الْفَارَقَ بَيْنَ نِسْبِ السَّعَاتِ وَنِسْبِ الشَّدَاتِ. وَبِاعْتِبَارِ أَنَّ الضَّوْءَ يُمَكِّنُ كَشْفَهُ مِنْ شِدَّتِهِ فَقَطْ، فَهَلْ تُعْطِي هَذِهِ النَتِيجَةُ دَعْماً لِلنَّظَرِيَّةِ الَّتِي تَقُولُ بِإِمْكَانِ حَيُودِ الضَّوْءِ فِي الْإِتِّجَاهِ الْخَلْفِيِّ؟

الفصل ٢ : ٥

قياس التداخل التطبيقي

Applied Interferometry

نصف في هذا الفصل المزيد من مقاييس التداخل وتطبيقاتها، ونبحث النتائج التي يمكن الحصول عليها من قياس التداخل.

مقياس تداخل ميكلسون The Michelson Interferometer

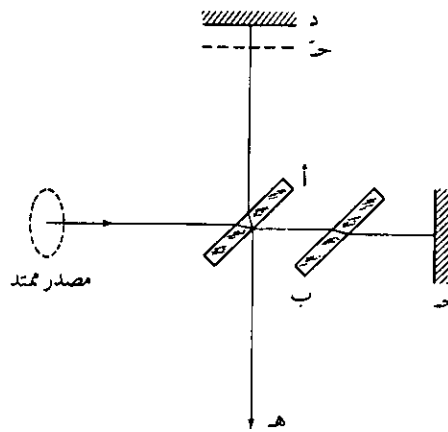
التركيب العام

لمقياس التداخل لميكلسون* استعمالات متعددة لا تُجاري. فهو لا يُمكن من تقريب مستويين بصريين إلى وضع الانطباق فحسب وإنما يتجاوز ذلك إلى تحريك أحدهما عملياً عبر الآخر. ويقوم مقياس التداخل لميكلسون على مبدأ قسمة السعات وهو يأخذ عادة الشكل المبين في الشكل ١. وفي ذلك الشكل تقع حزمة ضوئية صادرة من مصدر ضوئي ممتد (أو من مصدر نقطة ومُسَدَّدة) على شاطر للأشعة (أ) سَطْحُه الخلفي مطلي بطلاء عاكس؛ حيث يُقسَّم شاطر الأشعة الضوء إلى قَلَمَيْن شعاعيين: أحدهما يمر في شاطر الأشعة

* البرت ابراهام ميكلسون Albert Abraham Michelson (١٨٥٢-١٩٣١): المولود في شترلنو strelnو، أوروبا الشرقية. وصل إلى الولايات المتحدة وعمره عامان، وتخرّج من الأكاديمية البحرية الأمريكية وعلم فيها، وعمل بعد ذلك في مدرسة كيس Case للعلوم التطبيقية في كليفلند Cleveland، وجامعة كلارك Clark في وُرشستر Worchester، ماسشوستس، وفي جامعة شيكاغو؛ ومُنح عام ١٩٠٧ جائزة نوبل لاختراعه مقياس التداخل الذي يحمل اسمه، وكان أول عالم أمريكي يناهز هذا التقدير. وميكلسون معروف جيداً أيضاً بقياسه الدقيق لسرعة الضوء وبإسهاماته في علم القياس، مقياس التداخل، صلابة الأرض، تطوير آلة لصنع محزوزات الحيود، وتجربة حركة الأثير التي قادت إلى النظرية النسبية. انظر أ. أ. ميكلسون: «ظواهر التداخل في نوع جديد من الكاسرات» «المجلة الفلسفية Phil. Mag.» : ٥ (١٣)، ١٨٨٢، ص ٢٣٦-٢٤٢.

والآخر ينعكس عنه. وينعكس كلا القلمين الشعاعين عن مرآتين مُستويين: ح، د وَيرتدان إلى شاطر الأشعة فيتوحدان من جديد، ثم يسيران في الاتجاه هـ حيث يمكن ملاحظة تداخلهما. وتثبت إحدى المرآتين على عربة يمكن تحريكها إلى الأمام وإلى الخلف على منزلقات مضبوطة جداً، وذلك بواسطة بُرغي ميكرومتر مُسنّن بإتقان. وعندما يحدث الانعكاس عن السطح الخلفي لشاطر الأشعة (أ) يمر الشعاع المنعكس من المرآة د في شاطر الأشعة (أ) ثلاث مرّات؛ بينما يمر الشعاع المنعكس عن المرآة ح في شاطر الأشعة مرة واحدة؛ ولذا توضع لوحة أخرى ب مساوية في سُمكها لشاطر الأشعة (أ) وموازية لها في المسار الأفقي. ويمكن إمالة اللوحة ب لتغيير طول المسار البصري.

وعند النظر إلى مقياس التداخل من الجهة هـ يمكن رؤية المرآة د مباشرة. ويتراكب على صورة المرآة د صورة خيالية للمرآة ح (الصورة ح'). وإذا كان ذراعاً مقياس التداخل متساويتين في طوليهما، فإن القلمين الشعاعين يصلان شاطر الأشعة (أ) في طور واحد مُحدّثين بذلك مجالاً مُنتظماً. ولأنّ هنالك تغيراً في الطور قدره π يُصيب الشعاع الذي ينعكس عن شاطر الأشعة فإنّ مجال الرؤية يكون مظلماً تماماً؛ وفي المقابل، فإذا حرّكت إحدى المرآتين مسافة $\frac{\lambda}{4}$ ، يتغير طول المسار البصري بمقدار $\frac{\lambda}{2}$ ، ويكون القلمان الشعاعيان مُختلفي الطور بمقدار π ؛ الأمر الذي يُعوّض من التغير في الطور (ط) الحادث بسبب الانعكاس، ولذلك يكون مجال النظر مُضيئاً.



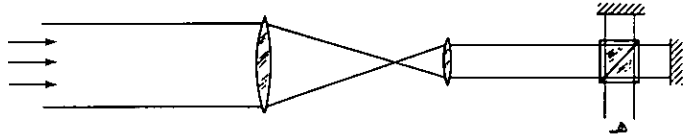
الشكل ١: مقياس تداخل ميكلسون

أنواع الاهداب Types of Fringes

تبعاً لِمَوْضَعِي المَرَاتِين، يُمكنُ رؤيةُ تأثيراتِ التداخلِ بهيئاتٍ مختلفةٍ. وعموماً تحدثُ نهاياتُ التداخلِ العظمى كلما كانَ:

$$[١-٥:٢] \quad \dots\dots ٣، ٢، ١، ٠ = ن، \lambda ن = \Gamma$$

وَلَكِنْ لَمَّا كَانَ الضَّوْءُ يَقْطَعُ مَرَّتَيْنِ الْمَسَافَةَ ف بَيْنَ حـ، د، وَنَظَرًا لِلتَّغْيِيرِ فِي الطُّورِ الذي يُصِيبُ الشَّعَاعَ الْمُنْعَكِسَ، فَإِنَّ شَرْطَ حَدُوثِ النِّهَايَاتِ الصَّغْرَى فِي نَمَطِ التَّداخلِ يَكُونُ:-
٢ ف = ن λ .

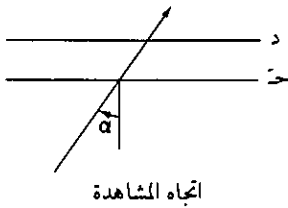


الشكل ٢: مقياس تداخل ميكلسون الذي يحتوي على شاطر شعاعي من نوع مكعب أبي Abbe حيثُ يمر فيه ضوء متوازٍ خارجٍ من تلسكوبٍ فلكي.

وَإِذَا كَانَ الضَّوْءُ مُتَوَازِيًا تَمَامًا أَوْ مَسْدَدًا تَمَامًا وَذَا طَوِيلٍ تَحَالُفِيَّ كَافٍ length Coherence [أنظر الفصل ٢:٦] كضوء الليزر، فإن المجال كُلَّهُ يَكُونُ مُعْتِمًا أَوْ مُضِيئًا يَقْطَعُ النَّظَرَ عَنِ الْفَارَقِ فِي طَوِيلِ الْمَسَارِ وَشَرِيطَةً أَنْ تَكُونَ الْمَرَاتَانِ مُتَعَامِدَتَيْنِ. وَتَحْدُثُ نَفْسُ الْوَضْعِ فِي عِلْمِ الْفَلَكِ عِنْدَ فَحْصِ الضَّوْءِ الْصَّادِرِ مِنْ نَجْمٍ مَا، وَهُوَ ضَوْءٌ مُتَوَازٍ، حَتَّى بَعْدَ مُرُورِهِ فِي تَلْسُكُوبٍ مَرَكِّزٍ عَلَى مَا لَانْهَيَاةٍ - الشكل ٢.

الاهداب الدائرية Circular Fringes

افترضِ الآنَ أَنَّ النَّاظِرَ يَنْظُرُ إِلَى الْمُسْتَوِيَيْنِ حـ، د بِمِيلَانٍ مَقْدَارُهُ α كَمَا فِي الشَّكْلِ ٣. وَتَظَلُّ الزَّاوِيَةُ α ثَابِتَةً عِنْدَ تَخْصِيصِ فَارَقِ الْمَسَارِ أَوْ تَثْبِيَتِ الرَّتْبَةِ؛ وَمَنْ ثَمَّ تَبْدُو الْأَهْدَابُ فِي شَكْلِ دَوَائِرٍ مَرَكُزُهَا الْمَحْوَرُ الْبَصَرِيُّ. وَلِذَا يَكُونُ الْحِجْمُ الزَّاوِيُّ لِلنِّهَايَاتِ الْعَظْمَى عَلَى النِّحْوِ الْمُبَيِّنِ أَذْنَاهُ:-



اتجاه الملاحظة

الشكل ٣: مخطط شعاعي يظهر فارق المسار لزاوية نظر مائلة.

$$[٢-٥:٢]$$

$$\dots\dots ٢ ف جتا \alpha = ن \lambda$$

وتُسمى الأهدابُ الحاصلةُ من هذا النوع بالأهدابِ ذاتِ الميلانِ الواحدِ أو المتساوي fringes of equal inclination؛ إذ أنَّ الأهدابَ من هذا النوع تحدثُ من تداخلِ ضوءٍ متوازٍ بفارقٍ في الطورِ تُحدِّدهُ زاويةُ الميلانِ α .

والآن، عندَ أبعادِ المرأتينِ بُبطءٍ عنَ بعضهما بعضاً أي بزيادةِ المسافةِ ف، نلاحظُ أنَّ اتساعَ حلقةٍ معينةٍ أي هدبٍ دائريٍّ من رتبةٍ معينةٍ ن يأخذُ بالازديادِ؛ وذلك لأنَّ حاصلَ الضربِ λ ف جتا α يجبُ أن يظلَّ ثابتاً. ولذا تتمدَّدُ الحلقاتُ، وتظهرُ في الوسطِ أو المركزِ حلقاتٌ جديدةٌ: وبصورةٍ أدقَّ تظهرُ حلقةٌ واحدةٌ في كلِّ مرةٍ تُزاحُ فيها المرآةُ مسافةً $\frac{\lambda}{2}$ طولٍ موجيٍّ - الشكل ٤. لاحظُ أيضاً عندَ زيادةِ المسافةِ ف أنَّ الحلقاتِ الخارجيةَ تختفي بسرعةٍ أبطأ من السرعةِ التي تظهرُ فيها حلقاتٌ جديدةٌ في الوسطِ؛ الأمرُ الذي ينشأ عنه ازدحامٌ مجالِ النظرِ بالحلقاتِ الصغيرةِ؛ وعلى العكسِ تماماً تبدو الأهدابُ أنَّها تتقلَّصُ وتختفي من الوسطِ بتضغيرِ المسافةِ ف.

الأهداب المستقيمة Straight fringes

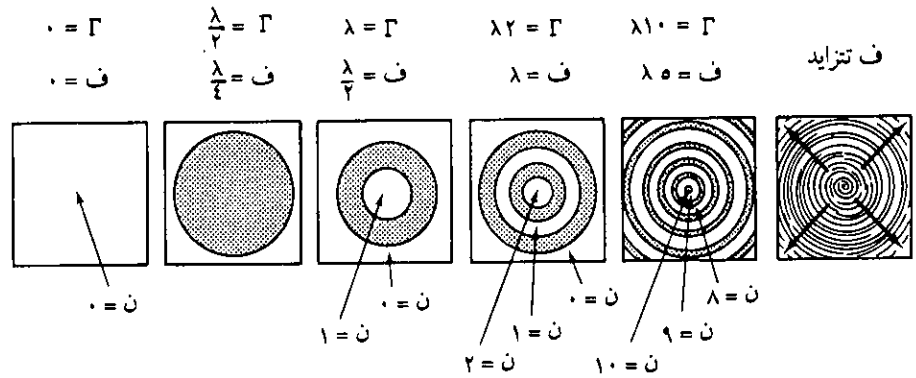
وإذا كانت المرأتان مائلتين قليلاً ولم تكونا متعامدتين تماماً تظهرُ الأهدابُ مستقيمةً. ويكونُ شكلُ الأهدابِ في الواقعِ شكلَ القطعِ الزائدِ hyperbolic. ولذا، فبتحريكِ إحدى المرأتينِ، تعبِّرُ الأهدابُ مجالَ النظرِ ممَّا يُمكنُ من عدِّها عندَ مرورِها بعلامةٍ مرجعية. ويمكنُ عدُّ الأهدابِ المستقيمةِ بسهولةٍ؛ ولعلَّه من الأنسبِ أن نعملَ فتحةً مستطيلةً ضيقةً في الستارةِ وأن يوضعَ كاشفٌ ضوئيٌّ خلفها.

ويَتغيَّرُ طولُ المسارِ البصريِّ بمقدارِ طولٍ موجيٍّ واحدٍ لكلِّ هُدبٍ يعبرُ العلامةَ المرجعيةَ؛ وعندها تكونُ إحدى المرأتينِ قد تحركتْ مسافةً $\frac{\lambda}{2}$ طولٍ موجيٍّ، ويكونُ: $\lambda = 2 \cdot \text{ف}$. ولذا يُمكنُ إيجادُ الطولِ الموجيِّ λ بعدَ عدِّ الأهدابِ المتعاقبةِ التي تعبِّرُ العلامةَ عندَ تحريكِ المرآةِ مسافةً ف وباستخدامِ المعادلةِ التالية:-

$$\lambda = \frac{2 \cdot \text{ف}}{\text{ع}} \quad \dots\dots [3-5]$$

وَيُمْكِنُ بَعْضُ الْحَرَصِ قِيَاسُ $\frac{1}{100}$ مِنْ غَرَضِ هُذِبِ أَوْ $\frac{1}{300}$ مِنْ الطَّوْلِ الْمَوْجِيِّ .

وَكَمَا رَأَيْنَا، تَنْشَأُ الْأَهْدَابُ الْمُسْتَقِيمَةُ مِنَ التَّدَاخُلِ عِنْدَمَا تَكُونُ الْمَرَاتِنُ غَيْرَ مُتَعَامِدَتَيْنِ
تَمَاماً؛ وَفِي هَذِهِ الْحَالَةِ يَكُونُ الْفَرَاغُ بَيْنَ د، حَ فِي شَكْلِ الْإِسْفِينِ Wedge، وَتُسَمَّى هَذِهِ
الْأَهْدَابُ بِالْأَهْدَابِ ذَاتِ السُّمُكِ الْوَاحِدِ أَوِ الْمَتَسَاوِي fringes of equal length .



الشكل ٤ : حركة الاهداب الدائرية الظاهرة عند تحريك المرآتين بعيداً من بعضهما بعضاً ؛ وتدل
الاسهم في الشكل إلى أقصى اليمين على حركة الاهداب .

تعديل المقياس لفارق المسار الصفري

في الوضع الاعتيادي وَقَبْلَ أي تعديل، يكونُ ذراعاً مقياسِ التَّدَاخُلِ أَحَدَ، أَد في
الشكل ١ مختلفين في الطول . وَبِتَحْرِيكِ إِحْدَى الْمَرَاتِنِ جَيِّئَةً وَذِهَاباً، يُمَكِّنُنَا تَغْيِيرُ الْفَارَقِ
فِي طَوَلَيِ الذَّرَاعَتَيْنِ وَإِنْقَاصُهُ إِلَى الصَّفْرِ . مِلَاحَظَةُ : يَقَلُّ فَارَقُ الْمَسَارِ بِتَحْرِيكِ الْأَهْدَابِ إِلَى
الدَّخْلِ أَيْ نَحْوَ مَرْكَزِهَا ؛ وَإِذَا كَانَ مَجَالُ النَّظَرِ مُعْتَمِلاً تَمَاماً، فَيَكُونُ قَدْ تَمَّ الْحَصُولُ عَلَى
التَّدَاخُلِ الْأَصْغَرِ الْكَامِلِ ؛ غَيْرَ أَنَّ الْاهْتِرَازَاتِ الطَّفِيفَةَ وَاضْطِرَابَاتِ الْهَوَاءِ تَجْعَلُنَا بُلُوغَ ذَلِكَ
صَعْباً .

تَهْيِئَةُ مَقْيَاسِ التَّدَاخُلِ لِمَيْكَلْسُون

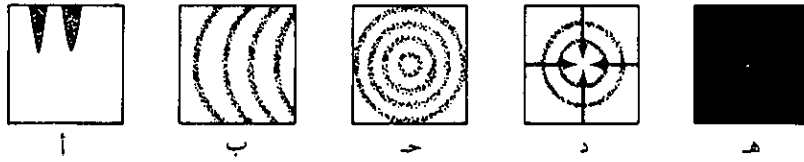
١ . ثَبَّتْ عَلَامَةً سَوْدَاءَ عَلَى قِطْعَةٍ مِنَ الزَّجَاجِ بَيْنَ الْمَصْدَرِ الضَّوئِيِّ وَشَاطِرِ الشَّعَاعِ، وَرَتَّبَتْ
مَوْضِعَ الْعَلَامَةِ بِحَيْثُ تَتَطَابَقُ مَعَ صُورِهَا ؛ ثُمَّ انْظُرْ إِلَى مَقْيَاسِ الطَّيْفِ مِنَ الْجِهَةِ هـ؛
فَسَتَظْهَرُ لَكَ بِالْإِنْعِكَاسِ ثَلَاثُ صُورٍ لِلْعَلَامَةِ - الشَّكْل ٥ . وَسَيُظْهِرُ لَكَ أَيُّ تَعْدِيلٍ بَسِيطٍ

في ضوابط إمالة المرآة - أي صورة من الصور الثلاث يُمكنك تحريكها . رتّب وضعي المرآتين بحيث تتراكب الصورة القابلة للتحريك على الصورة الثابتة من الصورتين الثابَتَتين .

٣ و ٢ . أَمِلِ المرآة - لِتَحَرِّكَ مركزَ الأهداب إلى مركزِ مجالِ النظر .

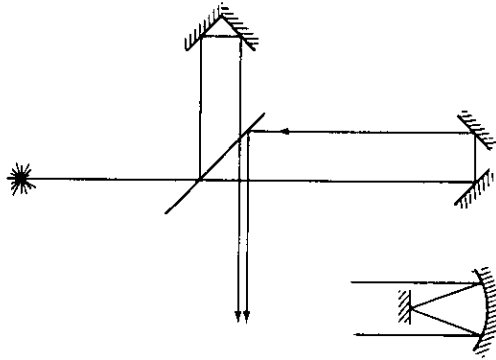
٤ . حَرِّكِ المرآة د لِتَحَرِّكَ الأهدابَ نَحْوَ مركزِها .

٥ . يَكُونُ المجالُ كُلُّهُ معتماً عند النهاية الصغرى الصُّفْرِيَّة .



الشكل ٥: تهيئة مقياس التداخل لميكلسون.

و يُمكنُ أَنْ يُجَهَّزَ مقياسُ التداخلِ لِمِيكِلْسُون بِقُرْنِ مكعبيةٍ أو بعاكسات خلفية retroreflectors عوضاً من المرايا - الشكل ٦؛ فَمِثْلُ هذا التجهيزِ يُعْطِي استقراراً أفضلَ، وَ يَتَطَلَّبُ تهيئةً أَقَلَّ، كَذَلِكَ يُزِيلُ أيَّ تأثيرٍ راجعٍ مُمكنٍ .



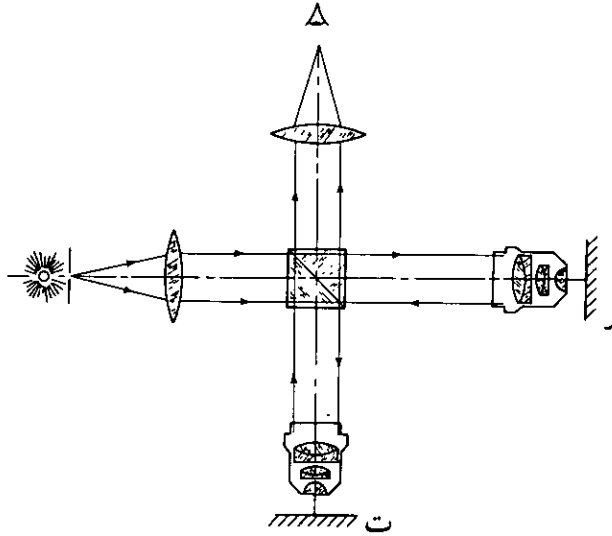
الشكل ٦: مقياس التداخل لميكلسون بعاكسات زاوية مكعبية: الرسم السفلي إلى اليمين هو عاكس عين القط الخلفي .

استخدام مقياس التداخل لميكلسون

ان مقياس التداخل لميكلسون آلة متفرّدة من حيث تعدّد أغراضها؛ ولذا فله تطبيقات لا تُحصى. ومن هذه التطبيقات قياس معامل انكسار لوحة زجاجية وذلك من خلال وضع اللوحة في أحد ذراعي المقياس وإمايتها؛ فالتغير في السمك الفعال الذي تدلّ عليه الإزاحة الهدبية يرتبط إيجابياً بمعامل الانكسار. ويُمكن الحصول على التفاصيل واشتقاقات المعادلات من مراجع أخرى.*

قياس تداخل السطوح Surface interferometry

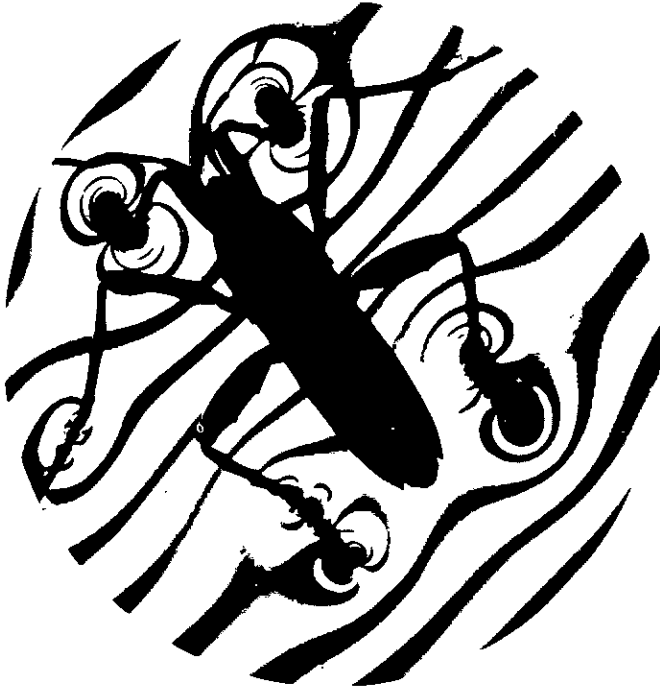
يمكن بسهولة تكييف مقياس التداخل لميكلسون لفحص السطوح+؛ إذ كل ما يتطلبه الأمر هو الاعتياض عن إحدى المرآتين بالسطح العاكس الذي يراود فحصه واستخدام المرآة الأخرى للمقارنة - الشكل ٧. ويسقط ضوء المصدر - إلى اليسار - على شاطر شعاعي حيث يقسم إلى قلمتين: أحدهما يسقط على السطح المفحوص (ت) و ينعكس عنه، والآخر ينعكس عن السطح المرجعي ر. ويمكن مشاهدة أهداب التداخل بالعينية هـ. وتتسبب أية عيوب أو تشوهات في السطح المفحوص في ظهور تشوهات مميزة في الأهداب - الشكل ٨.



الشكل ٧: ميكروسكوب مقياس التداخل السطحي

*For instance in C. H. Palmer, *Optics Experiments and Demonstrations* (Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1962), 147-57.

†W. Linnik, "Apparatus for Microscopic Interferometric Investigations of Reflecting Objects (Microinterferometer)," *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 1 (1933), 21-33; and K. Rantsch, *Interference Microscope for Examination of the Surface Quality of Solid Bodies*, U. S. Patent 2,732,760, Jan 31, 1956.



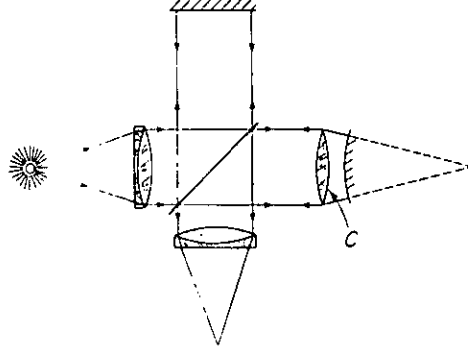
الشكل ٨: تأثيرات التداخل الناشئة على سطح الماء من وزن حشرة. [استنسخت باذن من :-

Cagnet, Françon, Thrierr, *Atlas of Optical Phenomena* (Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1962), p. 44.]

مقياس تداخل تويمان — جرين Twyman - Green interferometer

إنَّ مقياسَ تداخلِ تويمان - جرين * وثيقُ الصلةِ بمقياسِ تداخلِ ميكلسون؛ فهو مفيدٌ بشكلٍ خاصٍ لفحصِ العدساتِ، المواشيرِ، وجميعِ المنظوماتِ البصرية. ويوضعُ الجسمُ المَفحوصُ في إحدى الذراعين - الشكل ٩. وإذا كانت العدسةُ أو الموشورُ المَفحوصُ مُتقناً من ناحيةٍ بصريةٍ، تكونُ الجبهاتُ الموجيةُ المرتدةُ مستويةً كما يبدو مجالُ النظرِ منتظماً. وتُحدِثُ أيُّ تغييراتٍ موضعيةٍ في السمكِ البصريِّ أهداباً في الجزءِ المناظرِ من مجالِ النظرِ، وتشيرُ هذه الأهدابُ إلى المناطقِ المتساويةِ في الارتفاعِ على السطحِ المَفحوصِ أو داخلَ مناطقِ عَدَمِ التجانسِ مكونةً بذلكَ خطوطاً كُنتورية Contour مثلَ خطوطِ الخريطة.

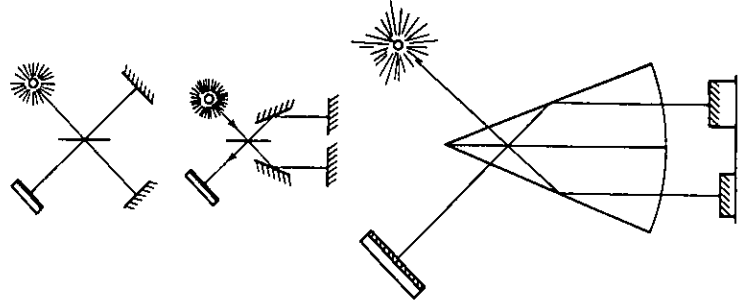
* ف. تويمان وأ. جرين، براءة الاختراع البريطانية رقم ١٠٣٨٣٢، عام ١٩١٦.



الشكل ٩: مقياس تداخل تومبان - جرين المعد لفحص العدسة حـ

موشور كوسترز Kusters prism

يُعتبر مقياسُ تداخلِ كوسترز† على نحوٍ مماثلٍ ثمرةً من ثمار مقياسِ تداخلِ ميكلسون؛ فهو يُنشأ من ظيِّ المساراتِ في مقياسِ ميكلسون. وكما يتضح من الشكل ١٠ يسقط الضوء على موشور مزدوج، ويُقسَّم هناك على السطحِ نصفِ المُقْفَضِ داخلَ الموشور، وتُخرجُ حزمَتَا الضوءِ من الجهةِ اليمنى للموشور وتنعكسان عن مرآة ذات سطحٍ مُمتازٍ. ويمتازُ موشورُ كوسترز بكونه مقياساً مُلتزماً مُتضاماً ومستقراً من وجهةٍ ميكانيكيةٍ.

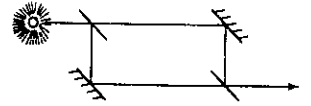


الشكل ١٠: ظيِّ المساراتِ في مقياسِ تداخلِ ميكلسون (الى اليسار) يؤدي الى مقياسِ تداخلِ موشور كوسترز (الى اليمين).

†W. Kösters, *Interferenzdoppelprisma für Messzwecke*, German Patent 595,211 (1931). J. B. Saunders, "An Interferometer for Measuring Gradients in Both Refractive Index and Thickness of Large or Small Objects" *J. Res. Natl. Bur. Standards* 73 C (1969), 1-4.

مقياس تداخل ماخ - زندر Mach-Zehnder

يتألف مقياس تداخل ماخ-زندر* الذي يُظهر في الشكل ١١ من مرآتين وشاطرين شعاعيتين لقسمة الحزمة الضوئية وتوحيدها بعد ذلك، ويظهر الشاطران في الأعلى إلى اليسار وفي الأسفل إلى اليمين. وتكمن الفائدة الأساسية لهذا المقياس في أنه يوفر فصلاً واسعاً بين المسارين الضوئيتين مما يَسْمَحُ بفحص مجالات عريضة من الظواهر الديناميكية الهوائية الحادثة في نفق هوائي. وتسهل تهيئة المقياس كثيراً عند الاستعاضة عن المرايا بموشورات خماسية†.



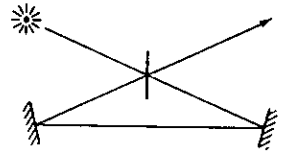
الشكل ١١ : مقياس تداخل ماخ - زندر

مقياس تداخل جامن Jamin interferometer

يشبه مقياس تداخل جامن‡ من ناحية أساسية مقياس تداخل ماخ-زندر مع وجود فارق واحد: وهو أن كلاً من شاطر الأشعة والمرآة في الجهة اليسرى وشاطر الأشعة والمرآة في الجهة اليمنى قد ضُما معاً في شكل شريحة زجاجية سمكية مُتوازية الوجهين المستويين.

مقاييس تداخل أخرى

في مقياس تداخل المسار المثلثي أو الدائري§ triangular path or cyclic، ينقسم الضوء كما في الشكل ١٢ بشاطر شعاعيين إلى حزمتين ضوئيتين تَسِيرَانِ في مسارين متماثلين تقريباً، ولكن في اتجاهين مُتضادين - الشكل ١٢؛ ثم تتوحدان من جديد بالشاطر الشعاعي نفسه حيث يصلان ستارة يمكن مشاهدة أهداب التداخل عليها.



الشكل ١٢ : مقياس تداخل المسار المثلثي.

وتشبه مقاييس التداخل المجهرية (الميكروسكوبية) من ناحية مقاييس التداخل الميكروسكوبية؛ إلا أنها تُكَيَّفُ فقط لتلبية المتطلبات الخاصة للرؤية المجهرية¶. وتبعاً لكيفية مرور الحزمتين الضوئيتين المَقْصُولَتَيْنِ في مجال المعاينة Sampling field، يُمكن تمييز

*L. Mach, "Modifikation und Anwendung des Jamin Interferenz-Refraktometers," *Anz. Akad. Wiss. Wien, math.-naturwiss. Kl.* 28 (1891), 223-24. L. Zehnder, "Ein neuer Interferenzrefraktor," *Z. Instrumentenkunde* 11 (1891), 275-85.

†P. Hariharan, "Modified Mach-Zehnder Interferometer," *Applied Optics* 8 (1969), 1925-26.

‡Jules Celestin Jamin, 1818-1886; *Anni. Chim. Phys.* 52 (1858), 163, 171.

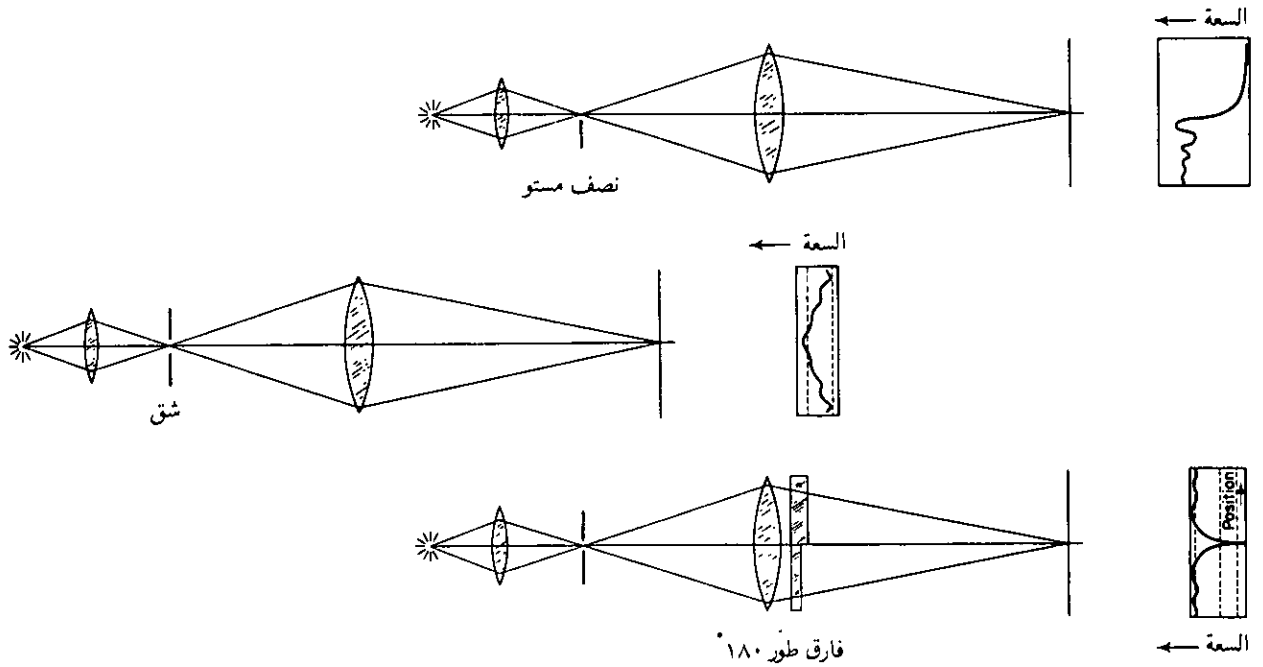
§J. St. L. Philpot, British Patent 645,464 (1950). P. Hariharan and D. Sen, "Triangular Path Macro-Interferometer," *J. Opt. Soc. Am.* 49 (1959), 1105-1106.

¶W. Krug, J. Rienitz, and G. Schulz, *Contributions to Interference Microscopy* (London: Hilger & Watts, Ltd., 1964).

المنظومات القاصّة shearing من الأدوات ذات التركيز المزدوج: ففي المنظومات القاصّة تسير الحزمتان في المجال جُنباً إلى جُنب؛ أمّا في الأدوات ذات التركيز المزدوج فهما تُزاحان في اتجاهٍ طولّيٍّ على المحورِ البصريّ.

وفي شريحة لَمَر - جيرك lummer-Gehrcke +، يدخلُ الضوءُ شريحةً سميكةً متوازيةً الوجهينِ المستويين على زاوية الكَشْط grazing incidence، ويُعاني عدّة انعكاساتٍ داخلِ الشريحة، ثم يخرجُ متوازيّاً تقريباً من الوجهين.

وَيُستخدَمُ مفهومُ تَغْرِيفِ «الشعاع الأصغر» في تهيئةِ صورٍ خطيّةٍ رفيعةٍ متميزةٍ كما هو الحالُ في الأدواتِ الكاشفة. إذ لا يستطيعُ عادةً الحصولُ على صورةٍ خطيّةٍ بسببِ الحيود - الشكل ١٣ - الرسم العلوي. فالاعتياضُ عَنِ الشَقِّ بحافّةٍ حادة لا يُعِينُ كثيراً في هذا الصدد - الرسم في الوسط. كذلك لا يُحدثُ استبدالُ سِلْكٍ بالشَقِّ أيَّ فارقٍ يُذكر؛ غَيْرَ أَنَّهُ



الشكل ١٣: توزيع الضوء باستخدام حافّةٍ حادة (الرسم العلوي)، شَقٍّ (الرسم في الوسط)، وتَغْرِيفِ الشعاع الأصغر (الرسم السفلي).

†O. Lummer and E. Gehrcke, "Über die Anwendung der Interferenzen an plan-
parallelen Platten zur Analyse feinsten Spektrallinien," *Ann. Physik* (4) 10 (1903),
457-77.

من الممكن الحصول بالتدخل على خطٍ معتمٍ رفيع جداً - الرسم السفلي - وذلك بوضع شريحة زجاجية في مسار الحزمة: نصفها مطلي بطبقة تُبطيء الطور ١٨٠°*.

علم القياس Metrology

يُغنى علمُ القياسِ بوضع معايير القياس. وأفضلُ مثالٍ معروفٍ عليها هو معيارُ الطول؛ وما زالَ مقياسُ الطولِ المعياريُّ منذُ القرنِ التاسعِ عشرٍ وَحَتَّى هذا الوقتِ هو قضيبُ البلاتين - الأيريديوم الذي توجَدُ عليه علامتان تَبْعَدان عَنْ بعضِهما بعضاً مثراً واحداً والذي يُحْتَفَظُ به في سِفْرِسِ Sevres قربَ باريس. ولقد اقترحَ جاكُ بابِنِت Babinet Jacques منذُ وقتٍ مبكرٍ يعودُ إلى عامِ ١٨٢٧ تعريفَ الطولِ بدلالةِ الأطوالِ الموجيةِ للضوء؛ غَيْرَ أنَّ ذلكَ الاقتراحَ لم يتحققْ إلَّا بعدَ مدةٍ طويلةٍ، وبالتحديدِ عامَ ١٩٦٠، إذ تمَّ الاتفاقُ على اعتبارِ المترِ مساوياً ١٦٥٠٧٦٣,٧٣ طولاً موجياً من الطولِ الموجيِّ للخطِّ الأحمرِ البرتقاليِّ من طيفِ الكريبتون ^{86}Kr والذي يبلغُ ٦٠٥,٧٨٠٢١ ن.م. ويربطُ هذا التعريفُ المترَ بظاهرةٍ طبيعيةٍ تعتبرُ ثابتةً ويمكنُ تكرارها في المختبرِ إلى دقةٍ تبلغُ جزءاً واحداً من مليون. وبكُلِّ تأكيدٍ، بدتْ درجةُ الدقةِ هذه غيرَ معقولةٍ عندما وُضِعَتْ مقاييسُ الطولِ المعياريةُ أوَّلَ مرةٍ. فكَّما يظهرُ في رَؤْسِمِ خشبيِ wood-cut من القرنِ السادسِ عشر - الشكل ١٤، فإنَّ طولَ القصبةِ الألمانية - التي هي شكلٌ مختلفٌ عن القصبةِ الانجليزيةِ القديمة - كانَ يُعرَّفُ بِصَفِّ أقدامِ ستَّةِ عشرَ رجلاً يُختارونَ عشوائياً عندَ خُرُوجِهِم من الكنيسة؛ ولقد اعتُبرَ الطولُ الحاصلُ هو القصبة، وكانَ القَدَمُ $\frac{1}{12}$ من طولها. وفي عامِ ١٧٨٩ عُرِّفَ المترُ الأصليُّ بأنَّه $\frac{1}{40,000,000}$ من طولِ خطِ الطولِ المارِّ بباريس.

*H. Wolter, *Verfahren zur genauen Kennzeichnung einer Fläche oder Kurve im Raum mittels interferierender Lichtwellen*, German Patent 819,728, 12 April 1949; "Untersuchungen zur Strahlversetzung bei Totalreflexion des Lichts mit der Methode der Minimumstrahlkennzeichnung," *Z. Naturforsch.* 5a (1950), 143.

هـ. د. كوك ول. أ. مارزيتا: «مقياس تدخل يُعَدُّ الأهداب أوتوماتيكياً لأجل استخدامه في

معايرة المقاييس الخطية»، مجلة Natl. Bur. Standards J. Res.، ٦٥ - (١٩٦١)،

١٢٩-١٤٠. ك. د. ميلنز، هـ. د. كوك، ك. جيليلاند ور. ب. ستفنز: «قياس الطول

الدقيق للقضيب المتري بليزر الهيليوم-النيون»، مجلة Science، ١٤٦ (١٩٦٤)،

١٦٧٢-١٦٧٣.



الشكل ١٤ : كيف تبني معياراً للطول وفق اسلوب القرن السادس عشر [من كتاب :-

Jacob Köbel, Von Ursprung der Teilung, Oppenheim 1522. Courtesy Klaus D. Mielenz, National Bureau of Standards.]

وقاس ميكلسون المتر بدلالة الأطوال الموجية لضوء الصوديوم، ثم استخدم خط الزئبق الأخضر. وبعد ذلك خط الكاديوم الأحمر؛ ولما كان من غير الممكن الحصول على تداخل من مثل هذه المصادر الضوئية بمسار ضوئي يبلغ متراً واحداً، كان على ميكلسون أن يعد أهداب التداخل التي تُناظر طول أصغر شريحة يمكن قياسها آنذاك والتي تُسمى الأتalon. وفي يومنا الحاضر تستخدم مقاييس التداخل ذات العدادات الأوتوماتيكية، وهي تسمح بالعد بمعدل يزيد على ١٢٠٠ هذب/الثانية؛ كذلك توفر « الليزرز » طولاً تحالفياً أكبر بكثير من الذي أمكن الحصول عليه سابقاً.

*H. D. Cook and L. A. Marzetta, "An Automatic Fringe Counting Interferometer for use in the Calibration of Line Scales," *Natl. Bur. Standards J. Res.* **65 C** (1961), 129-40. K. D. Mielenz, H. D. Cook, K. E. Gilliland, R. B. Stephens, "Accurate Length Measurement of Meter Bar with Helium-Neon Laser," *Science* **146** (1964), 1672-73.

تَقْوِيمُ أَنْمَاطِ أَوْ رَسُومَاتِ التَّدَاخُلِ Evaluation of Interferograms

هندسة الأهداب

يَمَكُنُ الحُصُولُ عَلَى نَتَائِجِ قِيَاسِ التَّدَاخُلِ وَكَذَلِكَ تَقْوِيمُهَا مِنْ حَيْثُ أَغْرَاضُهَا المَخْتَلِفَةُ، وَيَحْتَوِي الجَدُولُ رَقْمَ ١ عَلَى بَعْضِ هَذِهِ الأَغْرَاضِ .

لَقَدْ رَأَيْنَا سَابِقاً أَنَّ كُلَّ مَقاييسِ التَّدَاخُلِ تَقْيَسُ بِصُورَةٍ أَساسِيَةٍ الفَارِقِ فِي طَوْلِ المَسَارِ البَصَرِيِّ الَّذِي يُعَرَّفُ بِـ:

$$[٤-٥:٢] \quad \Gamma = m(2l - l_1), \text{ أو } \Gamma = l(m - 2l_1) \dots\dots$$

وَلَا كَانَ $\Gamma = n\lambda$ لِلأهدابِ المتعاقبة، فَانِ الوَحْدَةُ الواحِدَةُ مِنْ فَارِقِ المَسَارِ البَصَرِيِّ Γ تَتَسَبَّبُ فِي جَعْلِ ع مِنْ الأطْوَالِ الموجيةِ تَوَجُّدُ فِي الوَسْطِ الأَكثَفِ وَفِي إِزَاحَةٍ المَنْظُومَةِ الهَدْيَةِ مَسَافَةً تَسَاوِي فِي مَقْدَارِهَا ع هَدَباً أَيضاً، بِحَيْثُ ع تَسَاوِي :-

$$[٥-٥:٢] \quad e = \frac{1}{\lambda} m(2l - l_1) \text{ أو } e = \frac{1}{\lambda} l(m - 2l_1) \dots\dots$$

وَلَا وُسَاطِ ذَاتِ مَعَامِلِ انكسارٍ يَتَغَيَّرُ بِصُورَةٍ غَيْرِ مُنْتَظِمَةٍ، يَكُونُ عَدْدُ الأهدابِ ع:

$$[٦-٥:٢] \quad e = \frac{1}{\lambda} \left[\Delta^B m + d \right] \dots\dots$$

حَيْثُ يُحَسَّبُ التَّكَامُلُ عَلَى طَوْلِ المَسَارِ الهندسي l . وَبَقِيَاسِ ع، l ، وَ λ يُمَكِّنُ تَعْيِينَ الفَارِقِ بَيْنَ مَعَامِلِي انكسارِ الوَسْطَيْنِ؛ وَتَمَّ ذَٰلِكَ فَالصَّعُوبَةُ تَكْمُنُ فِي حَقِيقَةِ أَنَّ الإِزَاحَاتِ الهَدْيَةَ تَكُونُ أحياناً غَيْرَ مُتَّصِلَةٍ أَيْ مُنْقَطِعَةً مِمَّا لَا يَمَكُنُ مَعَهَا عَدُّ الأهدابِ (ع). بَيِّنْ أَنَّ المَوْقِفَ يَكُونُ أبْسَطَ مِنْ ذَٰلِكَ فِي حَالَةِ التَّغْيِيرَاتِ التَّدْرِيجِيَّةِ فِي الإِزَاحَاتِ الهَدْيَةِ وَخُصُوصاً إِذَا امْكُنَ إِحْدَاثُ التَّغْيِيرِ ببطءٍ تَتَبَعاً لِدَالَّةٍ زَمْنِيَّةٍ، مِمَّا يَسْمَحُ بِعَبُورِ الأهدابِ عِلَامَةً مُرْجِعِيَّةً مُعَيَّنَةً وَبِالتَّالِي بَعْدَهَا.

الجدول ١ : تطبيقات نموذجية على قياس التداخل

القياس	البارامتر المقياس	التطبيقات
هندسة الأهداب	فارق الطور	بناء المقاييس المعيارية Metrology قياس الانكسار Refractometry التخطيط الطبولوجي للسطوح Surface topology
مغايرة الاهداب وتنوع المغايرة	الخصائص الهندسية للمصدر الضوئي	أقطار النجوم النجوم الثنائية
Fringe Contrast and Contrast Variation	خصائص التواتر للمصدر	التركيب الدقيق للخطوط الطيفية مطيافية فورييه Fourier Spectroscopy
	تأثيرات الوسط	الاضطرابات الهوائية البلازما الاحيائية

الخصائص الهندسية للمصدر

والبارامتر الثاني إلى جانب هندسة الأطياف هو مغايرة الأهداب Contrast ؛ ويمكن من هذا البارامتر استخلاص استنتاجات عن الخصائص الهندسية للمصدر. ونفترض في المعالجة التمهيديّة لتجربة الشقّ المزدوج ليوننغ أنّ الشقوق تكون رفيعة متناهية في رفيعها ؛ وإذا كان الأمر كذلك ، فاننا نحصل على أهداب متساوية في شدة استضاءتها - الشكل ١٥ ، غير أنه - كما هو واضح - لا يمكن الحصول على شقوق متناهية في رفيعها ؛ ولذا لا تكون شدة الأهداب منتظمة أو متماثلة ، إذ أنّها تتحدّد بتميط الحيود الذي يُحصل عليه من شقوق ذات عرض محدود ، وكما في الشكل ١٦ يتركب إسهام الحيود هذا على إسهام التداخل .

و يُعطى إسهامُ التداخلِ أيَّ نمطِ التداخلِ من شقٍّ رفيعٍ متناهٍ في الرفعِ بالمعادلةِ التالية:

$$[٧-٥:٢] \quad \text{ش} = \text{ش} \cdot \beta^2 \text{ جتا } \beta, \text{ حيث } \beta = \frac{\text{ط} \cdot \text{ل} \cdot \text{جا } \theta}{\lambda} \dots\dots$$

وحيثُ ل هي المسافة بين الشقين؛ أمّا إسهامُ الحيودِ أي التأثيرُ الناتجُ من كونِ الشقِّ ذا عرضٍ معيّنٍ فيُعطى بالمعادلةِ التالية:-

$$[٨-٥:٢] \quad \text{ش} = \frac{\text{ش} \cdot \alpha^2 \text{ جا } \alpha}{\alpha^2}, \text{ حيث } \alpha = \frac{\text{ط} \cdot \text{ق} \cdot \text{جا } \theta}{\lambda} \dots\dots$$

وحيثُ ق هو عرضُ الشقِّ؛ وفي كلا المعادلتين ش. هي شدةُ الضوءِ الساقطِ و λ هو الطولُ الموجي. إن كلا المعادلتين تُظهِرُ أنَّ زاويةَ الحيودِ θ تكبُرُ بزيادةِ الطولِ الموجيِّ؛ ولذا يظهرُ الأحمرُّ على خارجِ نمطِ حيودِ الضوءِ الأبيض. وتوجدُ النتيجةُ المتضامّةُ من إسهامِ كلّ من الحيودِ والتداخلِ باعتبارِ ش. في معادلةِ الحيودِ متغيراً تُحدّدُ قيمُهُ من معادلةِ التداخلِ بقيمِ ش؛ أيُّ أنَّ:-

$$[٩-٥:٢] \quad \text{ش} = \frac{\text{ش} \cdot \alpha^2 \text{ جتا } \beta}{\alpha^2} \dots\dots$$

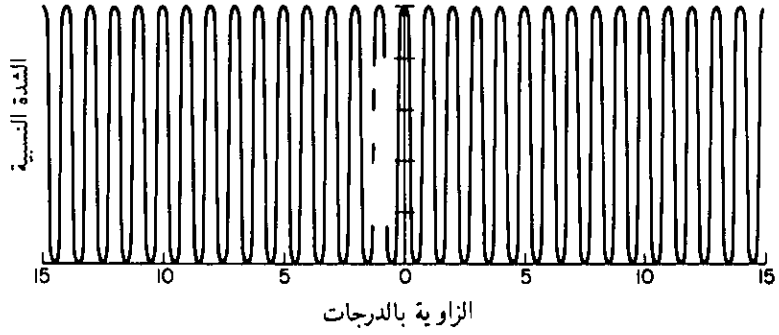
وباختصارٍ، فالنمطُ الناتجُ هو حاصلُ ضربِ دالتّين: دالةِ الحيودِ $(\frac{\alpha^2}{\alpha^2})$ ودالةِ التداخلِ $(\text{جتا } \beta)$ ؛ وتكوّنُ ش صفراً عندما تكونُ إحدى الدالتّين صفراً؛ ويحدّثُ هذا كلّما كانت:

$$\alpha = \text{ط} \cdot ٢, \text{ط} \cdot ٣, \dots, \text{أو كانت } \beta = \frac{\text{ط}}{٢}, \frac{\text{ط} \cdot ٣}{٢}, \frac{\text{ط} \cdot ٥}{٢}, \dots$$

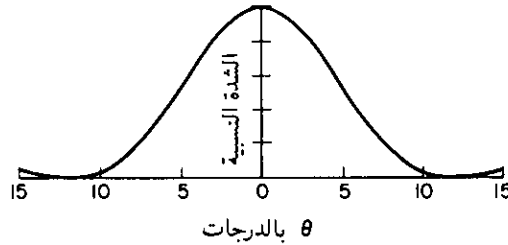
ومعَ أنَّ مواقعَ نهاياتِ التداخلِ العظمى لا يمكنُ تحديدها تماماً بأيةِ عبارةٍ جبريةٍ بسيطةٍ، إلا أنه يمكنُ الحصولُ عليها تقريباً باهمالِ التغيراتِ في المقدارِ $\frac{\alpha^2}{\alpha^2}$ ؛ فمثلُ هذا الافتراضِ مُبرَّرٌ للشقوقِ الرفيعةِ وقُرْبِ مركزِ النمطِ. وعندها تكونُ مواقعُ النهاياتِ العظمى هي:-

$$\beta = ٠, \text{ط} \cdot ٢, \dots, \text{أو: ل} \cdot \text{جا } \theta = \text{ن} \cdot \lambda, \text{ن} = ٠, ١, ٢, \dots, [١٠-٥:٢]$$

وهي معادلةٌ مماثلةٌ لمعادلةِ التداخلِ للشقِّ المزدوجِ التي قد اشتُتْ من قبل.



الشكل ١٥: إسهام التداخل في تجربة الشق المزدوج لـ يونغ، ويعزى هذا الإسهام إلى وجود شقين يمكن التفاضل عن عرضيهما الفعليين.



الشكل ١٦: إسهام الحيود الذي ينسب إلى العرض المحدود للشق

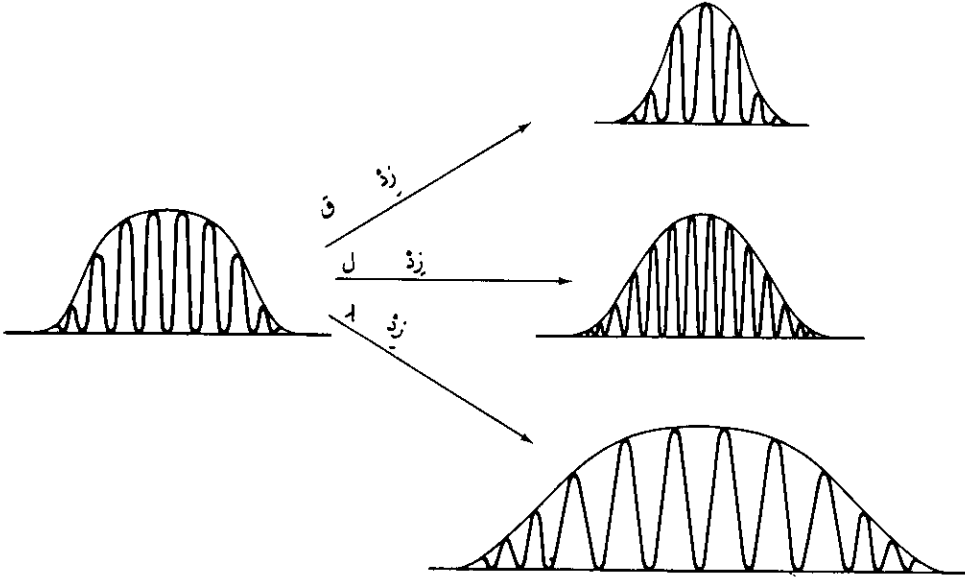
مثال: ما تأثير زيادة كل من: (١) عرض الشق (٢) المسافة بين الشقين (٣) الطول الموجي؟

الحل:

(١) عند زيادة عرض الشق فإن غطاء الأهداب يتغير ويصبح أكثر رفعا - الشكل ١٧. أما المسافة بين الهدبين فلا تتغير لأنها تعتمد على $\frac{L}{\lambda}$.

(٢) إذا زادت المسافة بين الشقين (L)، اقتربت الأهداب من بعضها بعضاً؛ لكن غطاء الأهداب يظل على حاله قبل الزيادة.

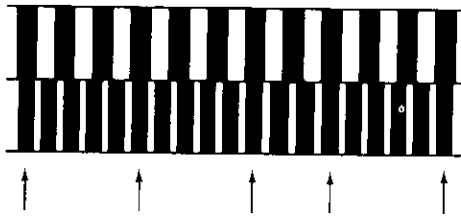
(٣) وبزيادة الطول الموجي يصبح الغطاء أعرض، وتبتعد الأهداب عن بعضها بعضاً كذلك. إن زيادة λ مكافئة لانقاص كل من النسبتين $\frac{L}{\lambda}$ و $\frac{Q}{\lambda}$ ؛ ولذا لا يتغير عدد الأهداب الذي يعتمد على $\frac{L}{Q}$ داخل الغطاء.



الشكل ١٧: نمط التداخل من شق مزدوج مع التغيرات المتسببة عن تغير عرض الشق، المسافة بين الشقين، والطول الموجي.

خصائص تواتر المصدر

عندما يكون الضوء أحادي اللون تكون الأهداب الحاصلة واضحة وذات مغايرة عالية. ولكن افترض الآن أن ضوء الصوديوم الأصفر يدخل مقياس التداخل؛ فستجد عند أطوال مسارات معينة أن الأهداب تكون واضحة، كما تجد عند أطوال مسارات أخرى أنها لا تكون واضحة؛ ويعزى سبب ذلك إلى أن ضوء الصوديوم الأصفر أي الخط D هو ثنائي اللون، أي أنه يتألف من طولين موجيين متقاربين. ولذا يلحظ المرء وجود مجموعتين من الأهداب؛ ففي بعض المواضع تكون المجموعتان متمايزتين وواضحتين بمغايرة عالية، بينما في مواضع أخرى تظهران متداخلتين بلا مغايرة - الشكل ١٨.



الشكل ١٨: ضوء ذو طولين موجيين متقاربين يُنتج بالتعاقب أهداباً واضحة وغير واضحة؛ وتشير الأسهم إلى المناطق التي تكون فيها المغايرة عالية.

لقد تَمَّ تَعَرُّفُ العلاقة بين مغايرة الأهداب وتركيب الخط الطيفي أو بنيته في وقت مبكر عام ١٨٦٢ عندما تمكَّن فيزو Fizeau بالطريقة السابقة من فصل خطي الصوديوم المعروفين D1، D2. وقد وجد فيزو أنَّ أهداب ضوء الصوديوم ذات الرتب العالية تفقد مغايرتها، إلا أنَّها جميعاً تستعيد تلك المغايرة قرب النهاية العظمى ذات الرتبة ٩٨٠. وقد استطاع أيضاً ان يتتبع هذا التغير الدوري في ٥٤ دورة: كلُّ منها تتألف من ٩٨٠ رتبة، واستدكَّ من ذلك أنَّ الطولين الموجيين مختلفان بجزء واحد من كلِّ ٩٨٠ جزءاً. ولما كان الطول الموجي لضوء الصوديوم حوالي ٦٠٠ نـم، فإنَّ الخطَّين ينبغي أن يفصلا بمسافة تبلغ $\frac{600}{980}$ نـم = ٠,٦ نـم = ٦ أنجستروم. وتتفقُ نتيجته تلك مع الحقائق المعروفة اليوم؛ فالضوء D1 له طول موجي يبلغ ٥٨٨,٩٩٥ نـم، بينما يتلَّغ الطول الموجي للخط D2 ٥٨٩,٥٩٢ نـم.

وتعتبر ملاحظة فيزو العلمية هذه ذات أهمية تاريخية: فهي تُشكِّل المحاولة الأولى التي قدَّ تَمَّ فيها استخدام قياس التداخل للكشف عن التركيب الثنائي لخط طيفي كان يُظنُّ قبل ذلك أنَّه أحادي اللون. وفي أيامنا هذه أصبح التحليل الطيفي بقياس التداخل مجالاً هاماً يحدِّ ذاته في البصريات الحديثة يُعرَف بـ: «مطيافية مُحوَّلة فورييه» Fourier transform Spectroscopy، وهو ما سنبحثه بمزيد من التفصيل في فصل آخر.

تأثير الوسط

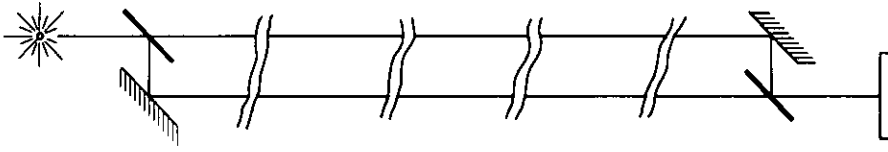
وعلاوة على عرض المصدر الضوئي المحدود وتركيب خطوط الطيف، يَعمَل وجود تشوهات في الجبهة الموجية على خَفْضِ مُغايرة نمط التداخل الحاصل؛ وتحدُّث مثل هذه التشوهات عندما يمرُّ الضوء في وسط غير متجانس.

إن تشوهات الجبهة الموجية يحدِّ ذاتها لا تؤثر في المغايرة: فإذا قُسمت الجبهة الموجية، مَهْمَا كانت مشوهة، أولاً في سَعَتِها ثُمَّ أعيدَ تجميعها في توافقٍ كما كانت عليه، فلا يَتَشَأ من ذلك أيُّ خسارة في المغايرة. ولكن إذا جُمِعت الجبهات الموجية المشوهة مع جبهات موجية مستوية مرجعية فإنَّ المغايرة تَقَلُّ، وعلى نحوٍ مماثل تَقَلُّ المغايرة إذا تعرضت الجبهات الموجية بعد قِسْمِها لتشوهات بصورة عشوائية ثُمَّ جُمِعت - الشكل ١٩، أو إذا عكست أجزاء من

*Y. V. Kolomiitsov, "The Contrast of Interference Fringes of Equal Inclination in the Presence of Wave Front Deformations," *Optics and Spectroscopy* 14 (1963), 373-76.

الجبّهات الموجية المشوهة تُمَّ جُعِلَتْ تنطبقُ على بَعْضِها بعضاً . ومن أمثلة ذلك ما يحدث للضوء عند مروره في هواء مضطرب أو عَنبر سَيْتوبلازم الأنسجة الحيائية Cytoplasma أي مادّتها الحية .

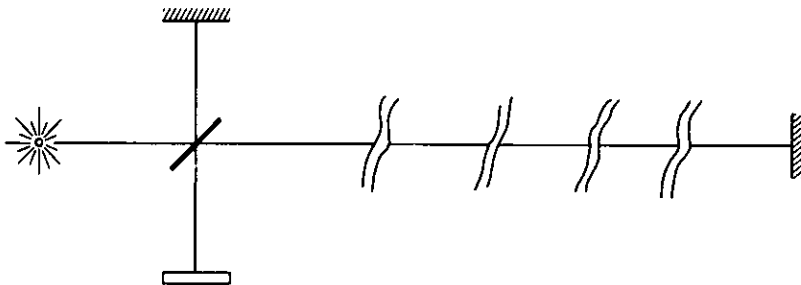
ومن المحتمل أن تتناسب درجة المغايرة مع درجة تَجانسِ الوسط ؛ وفي الواقع إذا لوحظَ التداخلُ عَنبرَ فَوَارقٍ مساراتٍ طويلةٍ جدّاً فإنّ الذي يتغيّرُ بصورةٍ هامّةٍ هو المغايرة وليس هندسة الأهداب ؛ كذلك فإنّ هذه التغيرات في المغايرة هي التي تكشفُ عن التغيرات في اضطراباتِ الهواءِ عَنبرَ المسارِ .



الشكل ١٩ : الضوء المار عَنبر هواء مضطرب في مقياس تداخل ماخ - زندر .

وقد تمّ الحصولُ على أهدابِ التداخلِ كما قد تمّت ملاحظة التغيرات في المغايرة في مقياسِ تداخلِ ميكلسون لفارقٍ في المسارِ البصريّ يصلُ إلى ٥٠٠ م؛ وتشتملُ الأدواتُ بصورةٍ أساسيةٍ على مقياسِ تداخلٍ ذي ذراعين غير متساوٍ يتّين وعلى ليزر الهيليوم-النيون كمصدرٍ ضوئيّ . أمّا أهدابُ التداخلِ التي شوهدت فهي تتغيّرُ بالزمن وتتحركُ أحياناً بسرعةٍ عَنبرَ مجالِ النظرِ ؛ وتعزى مثلُ هذه التغيراتِ على الأرجح إلى التغيراتِ في مُتوسّطِ مُعاملِ الانكسارِ على طولِ المسارِ .

والاضطراباتُ الجوية هي العاملُ الرئيسُ الذي يُحدّدُ الفارقَ في المسارِ البصريّ الذي يمكنُ معه مشاهدةُ التداخلِ ؛ ولذا فإنّ تجاربَ التداخلِ ذاتِ الفوارقِ الطويلةِ في المسارِ البصريّ تُجرى غالباً في الفراغ أو على الأقلّ في جوٍّ معزولٍ عن الاضطراباتِ الهوائيةِ ، وهذا مُتطلّبٌ أساسيٌّ لاستخدامِ المطيافية لأغراضٍ تغييرِ المقاييسِ .



الشكل ٢٠ : الحصول على أهداب التداخل في جوٍّ مضطرب باستخدام مقياس تداخل ميكلسون .

اقتراحات لقراءات اضافية

- K. M. Baird and G. R. Hanes, "Interferometers," *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. IV, ed. R. Kingslake (New York: Academic Press, Inc., 1967), Part I, 309-61.
- W. H. Steel, *Interferometry* (Cambridge: University Press, 1967).
- M. Françon, *Optical Interferometry* (New York: Academic Press, Inc., 1966).
- A. J. Hale, *The Interference Microscope in Biological Research* (Baltimore: The Williams & Wilkins Co., 1958).
- S. Tolansky, *Surface Microtopography* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1962).
- M. Cagnet, M. Françon, J. C. Thrierr, *Atlas of optical phenomena*. (Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, Inc., 1962).

المسائل

- ١-٥:٢ باستخدام ضوء الكاديوم الأحمر $\lambda = 643,8$ نم، ظلّ ميكلسون في تجربته الأصلية قادراً على مشاهدة أهداب التداخل عند تحريك إحدى المرآتين عن وضع الانطباق مسافة ٢٥ سم. جدّ عدد الأهداب التي غيّرت العلامة المرجعية.
- ٢-٥:٢ إلى أية مسافة ينبغي إزاحة المرآة المتحركة في مقياس تداخل ميكلسون حتى نتمكن من مشاهدة ٤٠٠ هدب من الضوء الأخضر الذي طوله الموجي ٥٠٠ نم تخترق مركز مجال النظر؟
- ٣-٥:٢ استخدم مقياس تداخل ميكلسون لقياس المسافة بين جزئي خط ثنائي من طيف انبعاث ذريّ مُعَيَّن؛ فإذا كان الطول الموجي للخط الثنائي ٦٧٦ نم، وكانت التغيرات الدورية في مغايرة الأهداب تُلاحَظ عند تحريك إحدى المرآتين مسافة ٤٤,٤ مم، فجد الطولين الموجيين لجزئي الخط الثنائي.
- ٤-٥:٢ استخدم مقياس تداخل ميكلسون مع ضوء أزرق أحادي الموجة: طوله الموجي $\lambda = 449,4$ نم، وهيء للاستخدام لفارق مسار مقداره $10 \times 5 - 3$ مم؛ (أ) ما نصف القطر الزاوي للرتبة العاشرة؟ (ب) ما نصف القطر الزاوي للرتبة المئة؟

٥-٥:٢ شِقٌّ مزدوجٌ: عرضُ كُلِّ من شَقَّيْهِ ٠,١٥ مم، والمسافةُ الفاصلةُ بينهما ٠,٦ مم؛ أيُّ النهاياتِ العُظمى من الرتبةِ العاليةِ هي ناقِصةٌ أي لا يُمكنُ مُشاهدتها؟

٦-٥:٢ شِقَّان: عَرْضُ كُلِّ منهما ٠,٠٥ مم. أبعدا عن بعضهما حتى انطبقت النهايتُ العظمى الثالثةُ في نَمَطٍ تَدَاخَلَ الشِقَّينِ مَعَ النهايتِ الصغرى الأولى في نَمَطِ الحُيُودِ لِوَاحِدٍ من الشِقَّينِ وذلك على سِتَارَةٍ تَبْعُدُ ٢ م؛ فإذا كَانَ خَطَا الانطباقِ على مسافةِ ٨,١ سم من النهايتِ الصغرى الصغرى في كُلِّ جانِبٍ، فَبَدَّ الطولَ الموجيَّ للضوءِ المُستخدَمِ والمسافةُ بَيْنَ الشِقَّينِ.

٧-٥:٢ عندما قاسَ ميكلسون وَبيس Pease قَطَرَ نَجْمِ X من كوكبيةِ الجَبَّارِ لَاحَظَا أَوَّلَ اختفاءٍ لِأَهْدَابِ التَدَاخُلِ عِنْدَ مسافةٍ فاصلةٍ بَيْنَ المَرَاتِينِ تَبْلُغُ ٣,٠٦٥ م؛ فإذا كَانَ الطولُ الموجيُّ الفَعَالُ لضوءِ النَجْمِ ٥٧٥ نَم، فَبَدَّ القَطَرَ الزاويُّ بالتقديرِ الدائريِّ والدرجاتِ لِقَرَصِ النَجْمِ. لَاحِظْ أَنَّ شَيْئَةً التَلَسُّكُوبِ دائريةً، وَمِنْ ثَمَّ اسْتَخْدِمَ عاملَ دَالَّةِ بِسِلِّ الصَّحِيحِ.

٨-٥:٢ عِنْدَ تَجهِيزِ التَجرِبَةِ السَّابِقَةِ مَخرِباً، يَمَكُنُ أَخْذَ فِتِيلَةٍ مُصْبَاحٍ مُنفَرَدَةٍ يُسَدِّدُ الضَّوئُ الصَّادِرُ مِنْهَا بَعْدَسَةً بَعْدَهَا البُورِيَّ ٥٠ سم، فإذا وُضِعَ خَلْفَ العَدْسَةِ وَقَرِيباً مِنْهَا شِقٌّ مزدوجٌ مُتَغَيِّرٌ بِحَيْثُ يَكُونُ شِقَّاهُ مُوازِينِ لِلْفِتِيلَةِ؛ وَلَوْحِظَ اختفاءُ الأَهْدَابِ عِنْدَ مسافةٍ فاصلةٍ بَيْنَ الشِقَّينِ تَبْلُغُ ١٢ مم؛ فَبَدَّ قَطَرَ الفِتِيلَةِ إذا كَانَ الطولُ الموجيُّ ٦٠٠ نَم.

٩-٥:٢ عِنْدَ فَحْصِ سَطْحٍ بِمِقياسِ تَدَاخُلٍ بِاسْتِخْدَامِ ضَوْءِ الثَّالِيومِ الَّذِي طَوْلُهُ الموجيُّ ٥٣٥ نَم، وَجَدَ فِي مَنطِقَةٍ مَعْيَنَةٍ مِنَ السَّطْحِ أَنَّ الأَهْدَابَ شَوَّهَتْ بِمِقدَارِ ٠,٤ من المِساوَةِ بَيْنَ نَقْطَتَيْنِ مُتَكَافِئَتَيْنِ عَلَى هُذُبَيْنِ مُتَعَاكِسَيْنِ؛ فَمَا عُمُقُ أَوْ ارْتِفَاعُ القَعْبِ فِي السَّطْحِ؟

١٠-٥:٢ تَصَوَّرْ أَنَّ لَدَيْكَ مِقياسَ تَدَاخُلٍ جَامِئٌ مُصنوعاً مِنْ شَرِيحَتَيْنِ مُوشورِيَّتَيْنِ قَلِيلًا وَبِزاوِيَّتَيْنِ اسفِينِيَّتَيْنِ Wedge angle مُتَمَاثِلَتَيْنِ بَدَلِ الشَرِيحَتَيْنِ مُتَوَازِيَّتَيْنِ الِوَجْهَيْنِ المُستَوِيَيْنِ تَمَاماً؛ بَيِّنْ بِالاستِعايَةِ بِشَكْلِ شِعايٍ فِيمَا إذا كَانَ مِنَ المُمكِنِ الحِصُولُ عَلَى التَدَاخُلِ بِهَاتَيْنِ الشَرِيحَتَيْنِ الجَدِيدَتَيْنِ.

١١-٥:٢ فُحِصَتْ عَيْنُهُ فَحِصَ شَفَافَةُ سُمْكُهَا ٥ سم بالتدَاخُلِ باستخدام ضوءٍ أَخْضَرَ طَوْلُهُ المَوْجِيَّ ٥٥٠ نم؛ فإذا رُغِبَ في الحصول على دِقَّةٍ ١ في المليونَيْنِ، فَلَا تَبْغِي عَرَضٍ يَنْبَغِي قِيَاسُ أَيِّ تَشَوُّهِ فِيهَا، عَبَّرَ عَنِ الْعَرَضِ بِكُسْرٍ مِنْ عَرَضِ الْهُدْبِ (أَيُّ عَرَضِ الْهُدْبِ وَالْمَسَافَةِ الْفَاصِلَةِ بَيْنَ هُدْبَيْنِ مُتَعَايِنَيْنِ)؟ وَهَلْ يُمْكِنُ الْحُصُولُ عَلَى دَرَجَةِ الدِقَّةِ هَذِهِ؟

١٢-٥:٢ باستخدام خَطِّ الكَرْبَتُونِ الْبَرْتَقَالِيِّ حَيْثُ $\lambda = 605,78021$ نم يُنْكَسِرُ إِعَادَةً قِيَاسَ الْمِتْرِ الْمَعْيَارِيِّ بِدِقَّةٍ مَقْدَارُهَا جُزْءٌ وَاحِدٌ لِكُلِّ مِئَةِ مِليونٍ؛ فَمَاذَا تَعْنِي هَذِهِ الدِقَّةُ بِدَلَالَةِ الطَّوْلِ المَوْجِيَّ وَزَاوِيَةِ الظُّورِ؟

١٣-٥:٢ تُرِكَ مَحْلُوكٌ مَلْحِيٌّ مَوْضُوعٌ فِي أَنْبُوبٍ شَفَافٍ قَطْرُهُ مِنَ الدَّاخِلِ ٤ مم مَدَّةً مِنَ الزَّمَنِ لِيَسْتَقَرَّ؛ وَعِنْدَ فَحِصِهِ بِضَوْءِ طَوْلِهِ المَوْجِيَّ ٥٠٠ نم بِمَقْيَاسِ تَدَاخُلٍ، وَجَدَ أَنَّ نَمَطَ الْأَهْدَابِ، مُعَدَّلًا لِلْأَهْدَابِ الرَّاسِيَةِ، يُظْهَرُ إِزَاحَةً مَقْدَارُهَا «١٦» هُدْبًا لِلْجُزْءِ السُّفْلِيِّ مِنَ السَّائِلِ مُقَارَنَةً بِجُزْئِهِ الْعُلَوِيِّ. فإذا كَانَ مُتَوَسِّطُ مُعَامِلِ الْانْكَسَارِ لِلْمَحْلُولِ ١,٤٦٢، وَكَانَ التَّغْيِيرُ فِيهِ خَطِيئًا قَجْدَ: (أ) مُعَامِلِي الْانْكَسَارِ لِلسُّطْحِ وَالْقَاعِ (ب) النِّسْبَةُ بَيْنَ كَثَافَتَيْ الْمَحْلُولِ عَلَى السُّطْحِ وَالْقَاعِ.

١٤-٥:٢ يَبْلُغُ مُعَامِلُ انْكَسَارِ عَدْسَةِ عَيْنِ الْإِنْسَانِ قَرَبَ وَشَطِئِهَا ١,٤١، وَعِنْدَ حَوَاقِفِهَا ١,٣٨؛ فإذا قُطِعَتْ مِنَ الْعَيْنِ شَرِيعَةٌ سُمْكُهَا $\frac{1}{4}$ مم وَفُحِصَتْ فِي الضَّوِّ الْأَخْضَرِ ($\lambda = 600$ نم) بِمَقْيَاسِ تَدَاخُلٍ، فَجَدَ التَّشَوُّهُ الْحَاصِلَ فِي أَهْدَابِ التَّدَاخُلِ؟

١٥-٥:٢ وُضِعَ مَوْشُورُ فَرِنَلِ الثَّنَائِيَّ فِي مَقْيَاسِ تَدَاخُلٍ، وَشَوَّهَتْ الْأَهْدَابُ عَلَى جَانِبِي الْحِطِّ الْوَاصِلِ بَيْنَهُمَا؛ فإذا انْزَاحَتْ الْأَهْدَابُ عَلَى بَعْدِ ٥ مم مِنْ ذَلِكَ الْحِطِّ مَسَافَةً تَبْلُغُ طَوْلَ عَرَضِ «٢٤» هُدْبًا كَامِلًا، فَجَدَ التَّحْدَرُ gradiant فِي سُمْكِ المَوْشُورِ. افْتَرَضْ أَنَّ مُعَامِلَ الْانْكَسَارِ يَبْلُغُ ١,٥٢، وَالطَّوْلَ المَوْجِيَّ لِلضَّوِّ الْأَزْرَقِ ٤٥٠ نم.

١٦-٥:٢ أُرْسِمَ رَسْمًا يَبِينُ تَغْيِيرَ شِدَّةِ الْأَهْدَابِ فِي تَدَاخُلِ الشَّقِّ الْمَزْدُوجِ لِلْحَالَاتِ التَّالِيَةِ:-

- (أ) شَقْوَى ذَاتُ عَرَضٍ مُتَنَاهٍ فِي الصَّغَرِ.
- (ب) شَقْوَى ذَاتُ عَرَضٍ مُحْدُودٍ وَالْمَسَافَةُ الْفَاصِلَةُ بَيْنَهُمَا ثَابِتَةٌ.
- (ج) نَقْسُ ظُرُوفِ (ب) إِلَّا أَنَّ الْمَسَافَةَ الْفَاصِلَةَ بَيْنَ الشَّقَيْنِ أَقْلٌ.

الفصل ٢ : ٦

التحالف Coherence

يُعرَّف التحالف باستقرار طور الموجة مكانيًا وزمانيًا؛ ويُقصد بالاستقرار المكاني وجود علاقة طورية ثابتة بين موجتين منفصلتين، ويُقصد بالاستقرار الزمني ثبات الطور داخل الموجة الواحدة. والتحالف والتحالف الجزئي لفظان يَدْخُلانِ فعلاً، كما سَتَرى، في كُلِّ ظواهر الحيود والتداخل.

التحالف المكاني والتحالف الزمني

لَعَلَّكَ تَذَكَّرُ من عَرْضنا للحركة الموجية أَنَّهُ يُمْكِنُ تمثيلُ الحركةِ التوافقيةِ البسيطةِ بالمعادلةِ التاليةِ:

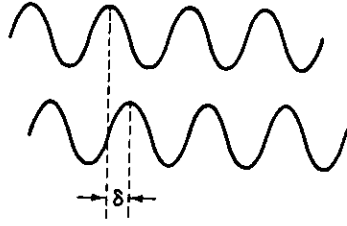
$$\text{ص} = \text{ع جا} \left[\frac{\text{ط}}{\lambda} (\text{س} - \text{رز}) \right] \dots\dots [١-٦:٢]$$

تَحَيَّلُ الآنَ موجتين من النوع الذي تمثله المعادلةُ السابقةُ مُتساويتين في السَّعةِ والطولِ الموجيِّ، وتَحَيَّلُ أَنَّ هاتين الموجتين تتراكبان مُتَّحِدَتَيْنِ تماماً في الطور؛ فَإِنَّ التداخلَ الحاصلَ يَكُونُ أَوْضَحَ ما يُمَكِنُ، كَذَلِكَ يَكُونُ للأهدابِ أعلى مغايرةٍ. وَإِذَا ما مَسَّخْنَا الأهدابَ نَجَدُ أَنَّ شِدَّتَهَا تَكُونُ عِنْدَ النِهايَاتِ العظمى أَكْبَرَ ما يُمْكِنُ في حينٍ تَكُونُ صَفْراً عِنْدَ النِهايَاتِ الصغرى؛ وَلِذَا فقيمتُهُ كُلُّ من الوضوحِ Visibility «و» والمغايرةِ Contrast «غ» اللَّذَيْنِ يُعْطِيَانِ بِالْمَعَادَلَةِ التاليةِ تَكُونُ وَحْدَةً وَاحِدَةً:

$$\text{و} = \text{غ} = \frac{\text{شع} - \text{شص}}{\text{شع} + \text{شص}} \dots\dots [٢-٦:٢]$$

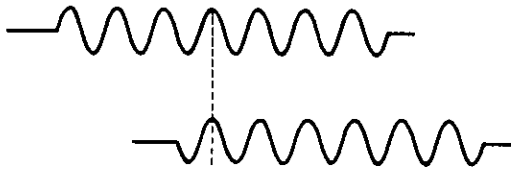
حيث شع، شص هما شِدَّتَا النِهايَتَيْنِ العظمى والصغرى على الترتيب. هذا وَتَقِلُّ مُغايرةُ نَمِطِ الأهدابِ عَنِ الْقِيَمَةِ (١) بِسَبَبِ الظُّرُوفِ الثَّلَاثَةِ التاليةِ:-

١ . أولاً قد تكون الموجتان ممتدتين دونَ نهايةٍ ومُتساويتين في السعة والطول الموجي، إلا أنَّ بينهما فارقاً محددًا في زاوية الطور - الشكل ١ . ولموجتين من هذا النوع لا يتغيّر فارقُ الطورِ بينهما زمنياً؛ ومن ثم فإن مغايرة الاهتدَابِ (غ) ترتبطُ بعلاقةٍ بسيطةٍ مع فارقِ الطورِ δ ، فمثلاً تكونُ غ = ١ عندما δ = صفر، و غ = صفر عندما $\delta = ١٨٠^\circ$ = ط زاوية نصف قطرية، كذلك فإنَّ قيمَ غ تتردّدُ بين الصفر والواحد عندما تأخذُ δ أية قيمة بين صفر و ط .



الشكل ١: تراكب موجتين متماثلتين بينهما فارق طور ثابت (δ) .

٢ . لكنّ الضوء لا يمكنُ تمثيلُهُ بأَموّاجٍ غيرٍ متناهيةٍ: والواقعُ أنَّ طولَ أيّ رَتْلٍ موجيّ هو طولُ متناهٍ؛ إذ يعتمدُ الطولُ على نوعِ المصدرِ الذي ينبعثُ منه الضوءُ، كذلك فلا يوجدُ هنالكُ فارقُ طورٍ ثابتٌ بين الأمواجِ المتعاقبةِ، ويعني ذلك أنَّ الضوءَ المارَّ بمقياسِ التداخلِ والذي يُعاني فارقاً في المسارِ أطولَ من طولِ أيّ من الارتدالِ الموجية لا تتراكبُ أَمَواجُهُ ولا يحدثُ بسبب ذلك أيُّ «تداخلٍ». ومن الواضح أنَّ التداخلَ التامَّ والمغايرةَ القصوى يَحْدُثان إذا ما تراكبتِ الموجتان المُتَعاقبتان تراكباً تامّاً؛ أما إذا تراكبتِ الموجتان (الرتلان) على مدى نصف طوليهما - الشكل ٢ فإنَّ التداخلَ يَحْدُثُ، لكنّ المغايرةَ تنقُصُ إلى نصفِ قيمَتِها القُصوى؛ وبعبارةٍ أخرى يُنشأُ نقصانُ المغايرةِ إمّا عن فارقٍ في الطورِ المكانيِّ وإمّا عن الطولِ المحدودِ لأَرتالِ الأمواجِ . وهذان الشرطانِ اللذان تمَّ بحثُهُما إلى الآن يتصلان بتراكبِ الأَرتالِ الموجية مكانياً أي بالتخالِفِ المكانيِّ (الطوليِّ) .



الشكل ٢: تراكب جُزئيّ لرتلين موجيين .

٣ . وأخيراً فلا يمكن بلوغ المغايرة القصوى التي قيمتها واحد، لأنه لا يوجد هنالك ضوء أحادي اللون تماماً؛ فحتى في أفضل المصادر المعروفة للحصول على ضوء أحادي بما في ذلك مصادر الليزر يوجد دائماً قدر محدود من التشتت في الطول الموجي ($\Delta \lambda$) حول القيمة المتوسطة للطول الموجي λ . ففي أثناء انبعاث الضوء من مصدره تكون ذراته أي ذرات المصدر في حركة عشوائية بالنسبة إلى المشاهد، كذلك تخضع الأطوال الموجية الحاصلة لتأثير ظاهرة دوبلر Doppler التي سنتعرض لها لاحقاً؛ وعلاوة على ذلك تتأثر بعض الذرات التي تُشع الضوء بالذرات المجاورة مما يُشأ عن ذلك تغير في تواتر اهتزازها.

وكلما زاد عدد الأمواج (ح) في رزمة موجية قلّ التشتت في الطول الموجي؛ وفي الواقع، فإن النظرية ذات العلاقة تُظهر أن:-

$$[٣-٦:٢] \quad \frac{1}{\Delta \lambda} \approx \frac{\lambda}{\Delta \lambda} \dots\dots$$

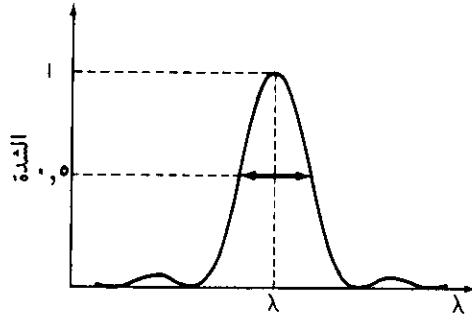
ولذا يكون أرفع الخطوط الطيفية ذا عرض محدود؛ ويُشار إلى هذه الخاصية بالتحالف الزمني.

الطول التحالفي والزمن التحالفي length and Coherence Time

Coherence

يُعرف عرض الخط الطيفي بعرض مُنحناه عند نصف شدته القصوى، ويُسمى كذلك بالعرض النصف halfwidth - الشكل ٣؛ أما عرض النطاق الموجي الفعال width Effective band $\Delta \lambda$ والعرض الفعال المعبر عنه بدلالة التواتر أي $\Delta \nu$ فهما مرتبطان بطول الرتل الموجي، أي بالطول التحالفي $\Delta \tau$ بالمعادلة التالية:-

$$[٤-٦:٢] \quad \Delta \tau \approx \frac{c}{\Delta \nu} = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \dots\dots$$



الشكل ٣: العرض النصفى لخط طيفي.

حيث c هي سرعة الضوء. وتُظهر المعادلة السابقة أن الأرتال الموجية ذات الأطوال غير المتناهية لا يمكن أن تأتي إلا من خط طيفي عرضة صفر؛ وهو أمر لا يمكن حدوثه بالطبع. ولما كانت السرعة تساوي المسافة على الزمن أي أن $c = \frac{\Delta \lambda}{\Delta t}$ ، فإن المعادلة السابقة يمكن كتابتها على النحو التالي:-

$$[5-6:2] \quad \dots\dots 1 \approx (\Delta \lambda) (\Delta \nu)$$

وهذا هو مبدأ الارتباب **Uncertainly Principle** الذي سيبحث بالتفصيل فيما بعد.

ولعلك تذكر أيضاً أن طول الرتل الموجي يرتبط بعرض خط الطيف المناظر له، ويتم ذلك باستخدام تحويل فورييه؛ وعلى نحو مماثل فستبحث هذه العلاقة بتفصيل أوسع في الفصل القادم.

ويشبه الزمن التحالفي تماماً زمن التلاشي **decay time** للحالات الذرية المهتاجة **excited atomic states**، وقد يصل هذا الزمن حتى في مصادر الضوء الاعتيادية إلى 10^{-8} ثانية. وكما هو واضح تختلف مصادر الضوء كثيراً في أطوال الأرتال الموجية التي تصدرها؛ إذ يبلغ طول الرتل الموجي للضوء الأحمر الاعتيادي حوالي 10^{-7} م؛ ولذا فعند وجود فارق مسار طوله 10^{-5} م ينقص وضوح الأهداف إلى نصف قيمته. أما ضوء الكاديوم الأحمر ($\lambda = 644$ نـم) وكذلك الضوء الأخضر المنبعث من مصباح الزئبق تحت ضغط منخفض ($\lambda = 546$ نـم) فيعطي كل منهما تداخلاً على مدى فارق مسار يبلغ 50 سم

تقريباً، كذلك فإنَّ خطَّ الكربتون البرتقاليَّ ($\lambda = 606$ نم) يُنتِجُ أهداباً واضحةً على فارقي مسارٍ طولُهُ ٨٠ سم. أما خطُّ الرنين resonance line في طيف الكالسيوم ($\lambda = 622,6$ نم) فَلَهُ غَرَضٌ نِصْفِيٌّ مقداره ٠,٠٠٣ سم^١ وَيُعْطِي أهداباً واضحةً لفارقي مسارٍ طولُهُ متران.

و يبلغُ الزمنُ التحالفيُّ لِلْيَزَرِ الياقوتِ حوالي ١٠^{-٨} ثانية؛ في حين أنَّ طولَه التحالفيُّ هُوَ في حدودِ المتر. أما الزمنُ التحالفيُّ للضوءِ المنبعثِ من أنبوبٍ لِيَزَرٍ غازيٍّ فَقَدْ يَزِيدُ على ذلك كثيراً (حوالي ١٠^{-٤} ثانية)، كما أنَّ طولَه التحالفيَّ (Δ ط) قَدْ يَصِلُ إلى ٣٠ كم.

التحالف والوضوح

لا يوجدُ فصلٌ حادٌّ بينَ الشروطِ التي يحدثُ بموجبِها التحالفُ ومنَ ثمَّ التداخلُ والشروطِ التي لا يَحْدُثان بموجبِها؛ فالمغايرةُ تتلاشى تدريجاً كما أنَّ «التحالفَ» يتغيرُ تدريجاً إلى «تعارضٍ». وتتوقفُ مسألةُ تحديدِ إمكانِ الحصولِ على أهدابٍ تداخليةٍ بإحدى تجاربِ التداخلِ على تحديدِ درجةِ المغايرةِ اللازمةِ لجعلِ الأهدابِ واضحةً لِلْمُشَاهِدِ بصورةٍ كافيةٍ؛ ذلك لأنَّ «التحالفَ التامَّ» أمرٌ لا يمكنُ تحقيقه.

وفي الواقع، فإنَّ درجةَ وضوحِ أهدابِ التداخلِ هي مقياسٌ مباشرٌ لِلتَّحَالُفِ (الجزئي) بينَ الرُّتَلينِ الموجيينِ المُشْهِمَيْنِ؛ فعلى غرارِ ما فَعَلَ فان سِيْتَرْت Van Cittert *، يمكننا افتراضُ أيةِ نقطتينِ على ستارةِ نُضَاءانِ بحزمتينِ ضوئيتينِ مُتساويتينِ في الشدَّةِ (ش.). إنَّ كُلاًّ من هاتينِ الحزمتينِ يتألَّفُ من قِسْمَيْنِ: أ و ب؛ أما الاجزاءُ التي تشكُلُ القسمَ أ فهي متخالفةٌ تماماً، وتبلغُ شِدَّةُ كُلِّ مِنْهُما ش_م، في حين أنَّ الاجزاءَ التي تشكُلُ ب غيرُ متخالفةٍ تماماً نِسْبَةً إلى أ وإلى بَعْضِها بعضاً، وَلَكُلَّ منها شِدَّةٌ تساوي (أ-ت) ش ب؛ حيث الكميَّةُ ت هي درجةُ التحالفِ بينَ الحزمتينِ. وإذا ما جُعِلَتِ الحزمتانِ تَدَاخِلانِ، فإنَّ الاجزاءَ التي تشكُلُ أ هي التي تُسْهِمُ بِمُفْرَدِها في ذلك وهي تَكُونُ معاً أنماطاً تداخليةً يَكُونُ فيها توزيعُ الشدَّةِ بدلالةِ فارقي الطورِ δ على النحوِ التالي:-

$$\text{ش}_\text{م} = 4 \text{ ت ش. جتا}^2 \left(\frac{1}{\lambda} \delta \right) \dots\dots [6-6:2]$$

* ب. هـ. سِيْتَرْت: «درجة التحالف»، مجلة Physica، ٢٤ (١٩٥٨)، ٥٠٥-٥٠٧.

ولذلك تبلغ الشدة القصوى ٤ ت ش.، بينما تبلغ الشدة الدنيا صفراً. ويتراكب على نمط التوزيع الذي تشير إليه المعادلة السابقة توزيع آخر منتظم للشدة على النحو التالي:

$$\text{ش ب} = ٢ (١ - \text{ت}) \text{ ش.}$$

ونتيجة تراكب التوزيعين تصبح الشدة القصوى :-

$$\text{ش القصوى} = ٤ \text{ ت ش.} + ٢ (١ - \text{ت}) \text{ ش.} = ٢ (١ + \text{ت}) \text{ ش.} \dots\dots [٧-٦:٢]$$

وتصبح الشدة الدنيا :-

$$\text{ش دنيا} = ٢ (١ - \text{ت}) \text{ ش.} \dots\dots [٨-٦:٢]$$

وبتعويض قيمتي الشدتين القصوى والدنيا في المعادلة [٢-٦:٢] نحصل على قيمة للوضوح هي :-

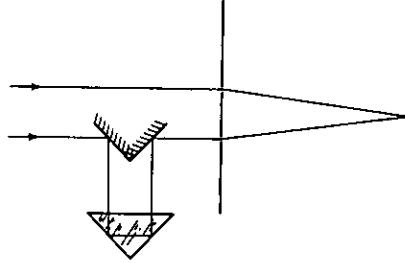
$$\text{و} = \frac{٢ (١ + \text{ت}) \text{ ش.} - ٢ (١ - \text{ت}) \text{ ش.}}{٤ \text{ ش.}} = \text{ت} \dots\dots [٩-٦:٢]$$

وتعني هذه النتيجة أن درجة تحالف اهتزازين موجيين يقطعان مستوى ما تساوي درجة وضوح الأهداب الحاصلة من تداخل هذين الاهتزازين.

تحديد التحالف بالتجربة

كيف يمكن قياس درجة التحالف بالتجربة؟ إنَّ أية تجربة من تجارب التداخل تكفي من ناحية مبدئية؛ وعلى سبيل المثال تنجح تجربة تداخل الشقَّ المزدوج عملياً لتحديد درجة التحالف المكاني، كما تنجح في الوقت نفسه في إظهار اختلاف التحالف المكاني الطولي عن التحالف المكاني العرضي. فعندما يكون الشقان في تجربة الشقَّ المزدوج مثلاً متقاربين إلى درجة كافية، وتكون إحدى الحزمتين متأخرة عن الأخرى - الشكل ٤؛ فإننا نستطيع أن نقيس التحالف الطولي؛ وتكون درجة التحالف الطولي عندها متناسبة مع عرض النمط الهدبي أي مع المسافة من المحور البصري التي ترى عندها الأهداب الداخلية بمغايرة محددة.

ويمكنُ استنتاجُ درجة التحالف العرَضِيّ من المسافة بين الشقين ؛ وقد أدى هذا المبدأ البسيط إلى تطوير مجموعة كاملة من مقاييس التداخل التي يستخدمُ معظمُها في علم الفلك : ففي مقياس تداخل أندرسون النجمي * على سبيل المثال يُحرَّكُ مانعٌ أو غِشاءٌ بشقين إلى الأمام وإلى الخلف على المحورِ داخل أنبوبِ التلسكوبِ مما يَسْمَحُ بتغييرِ متواصلٍ للمسافة بين الشقين .



الشكل ٤ : قياس التحالف المكاني الطولي باستخدام تجربة الشق المزدوج ليونغ .

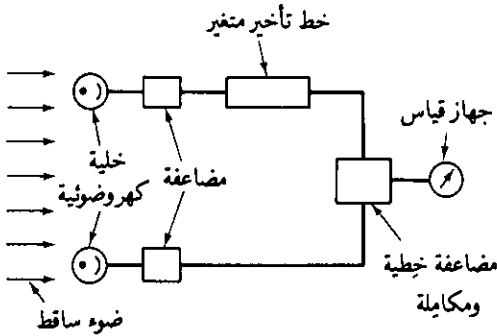
وفي مقياس تداخل ميكلسون النجمي يمكنُ فصلُ الشقين من بعضهما بعضاً مسافةً أبعدَ، وَيَتِمُّ ذلكُ باستخدامِ مرآيا خارجية أربَع - الشكل ٥ : المرآتان أمام الشிئية ثابتتان يَتِمُّ المرآتان الأخرى أن يَكُنَّ إبعادهما إلى مسافة ٧م ؛ وبمعرفة درجة التحالف المكاني العرَضِيّ يمكنُ تعيينُ القطرِ الزاويّ لنجم ما .+

٥ . جـ . أ . أندرسون J.A.Anderson : «تطبيق طريقة مقياس تداخل ميكلسون في قياس الثنائيات النجمية القريبة» ، مجلة Astrophys. J. ، ٥١ (١٩٢٠) ، ٢٦٣-٢٧٥ .

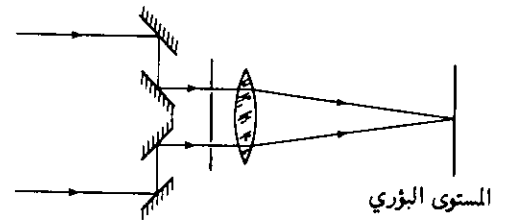
+ في ١٣ ديسمبر ١٩٢٠ قام بيث Pease بمشاركة ميكلسون مستخدماً هذه الطريقة بالقياسات الحاسمة الأولى لنجم منكب الجوزاء ، وَوَجَدَ أنَّ أهداب التداخل اختفت عند تحريكه المرآتين الآخرين بحيث تبعدان عن بعضهما مسافة ٣٠٦,٥ سم (على الرغم من أن الأهداب ظلت تُرى في صور النجوم المجاورة) ؛ وبافتراض أنَّ الطول الموجي الفعّال $\lambda = ٥٧٥$ نَم وَجَدَ أنَّ القطر الزاوي للنجم يبلغ ٠,٠٤٧ + ١٠٪ . ومن إزاحة الاختلاف المثظري Parallax البالغة ٠,٠١٨ وجد أن قطر النجم يبلغ ١,٠٤٧ + ١٠ كم أي أكبر من طول مدار الأرض (٣ × ١٠^٨ كم) . انظر أي . أي . ميكلسون ، ف . حـ . بيس : «قياس قطر نجم الجوزاء α بمقياس التداخل» مجلة الفيزياء الفلكية Astrophys. J. ، ٥٣ (١٩٢١) ، ٢٤٩-٢٥٩ .

وتجدرُ الإشارةُ إلى أنَّ استخدامَ طرائقِ التداخلِ في القياساتِ الفلكيةِ لا يتأثرُ بخطورةِ بالاضطراباتِ الجوية؛ ويعودُ السببُ في ذلك إلى أنَّ مقطعَ الحزمتينِ المازتينِ بالشقين ضئيلٌ قياساً إلى مقطعِ الأجزاءِ الجويةِ التي تُعاني الاضطرابَ، مما يُبقي الأهدابَ التداخليةَ المتكونةَ -رُغمَ حركتها- واضحةً تماماً. أما الصورةُ الاعتياديةُ فهي تتكونُ بتكاملِ الضوءِ المارِّ على مدى الشقِّ كُلِّه، ولذا فهي تكونُ في حالةِ الاضطراباتِ الجويةِ الشديدةِ غيرَ واضحةٍ مما يجعلُ التعرفَ إليها أمراً صعباً. كذلك يستخدمُ المبدأُ نفسه بنجاحٍ كبيرٍ في علمِ الفلكِ الراديوي radio astronomy .

كذلك يُمكنُ قياسُ أقطارِ زاويةِ أصغرَ من التي يُحصَلُ عليها بقياسِ تداخلِ ميكلسون النجميِّ باستخدامِ قياسِ تداخلِ الشدةِ intensity interferometry †: فالأجزاءُ الأساسيةُ في مقاييسِ التداخلِ من هذا النوعِ هي مرةً أخرى مرأتان -وليستا بالضرورة ذاتِ نوعيةٍ بصريةٍ عالية- تُجمَّعانِ الضوءَ أو تركزيه على خليتين كهروضوئيتين؛ ثم تُغذى الإشارتان الكهربائيتان إلى جهازٍ أو خطٍّ تأخيرٍ متغيِّرٍ ثم إلى مضاعفةٍ إلكترونيةٍ multiplier ومنها إلى مُكاملةٍ integrator - الشكل ٦ . وبعدَ معالجاتٍ سليمةٍ نحصلُ على القطرِ الزاويِّ للمصدرِ.



الشكل ٦: مقياس تداخل الشدة نسبة إلى هانبري براون Hanbury Brown وتويس Twiss .



الشكل ٥: مقياس تداخل ميكلسون النجمي.

†R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss, "A New Type of Interferometer for Use in Radio Astronomy," *Phil. Mag.* 45 (1954), 663-82; "Interferometry of the intensity fluctuations in light, I. Basic theory: the correlation between photons in coherent beams of radiation," *Proc. Roy. Soc. London A* 242 (1957), 300-24; "II. An experimental test of the theory for partially coherent light," *Ibid.* A 243 (1957), 291-319; "III. Applications for astronomy," *Ibid.* A 248 (1958), 199-221.

شرط التحالف

نذكر من مناقشتنا السابقة لحيود فرونفهر أن موقعي النهايتين الصغريتين من الرتبة الأولى تُعَيَّنُهُمَا المعادلة التالية :-

$$\text{أ ج ا } \theta = \lambda \dots\dots [١٠-٦:٢]$$

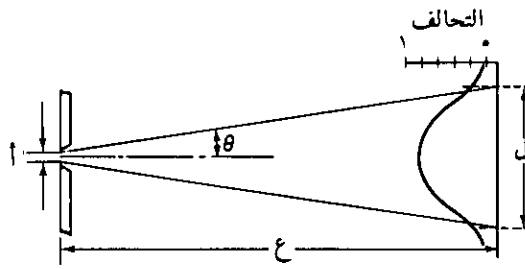
وإذا ما افترضنا اعتباطاً أن نصف فارق المسار يجعل الأهداب واضحة بصورة كافية، نتوصل إلى ما يُسمَّى بشرط التحالف حيث :-

$$\text{أ ج ا } \theta \gg \frac{\lambda}{2} \dots\dots [١١-٦:٢]$$

وكما هو موضح في الشكل ٧، أقطر الثقب، θ نصف زاوية رأس مخروط الضوء المار بالثقب، و λ الطول الموجي. ولما كان للزوايا الصغيرة $\theta \approx \theta$ ؛ و $\theta \approx \frac{\lambda}{2}$ ، فإننا نحصل على :-

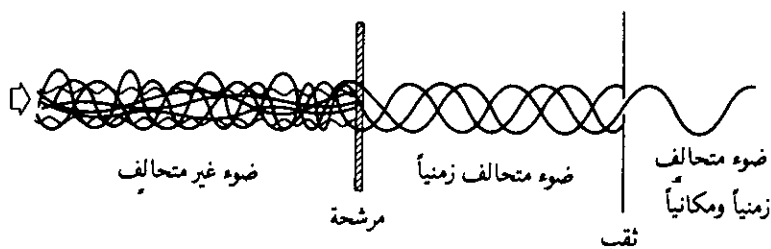
$$\text{أ ج ا } \theta \gg \frac{\lambda}{2} \dots\dots [١٢-٦:٢]$$

وكقاعدة عملية فإن الضوء داخل مخروط بهذا الحجم يكون متحالفاً على نحو كافٍ مما يَسْمَحُ بتكوين أهداب تداخلية يمكن رؤيتها بفايرة مرضية.



الشكل ٧: العلاقة بين تحديد الحزمة الضوئية ودرجة التحالف.

ولا يُمكنُ الحصولُ على الضوءِ التامِّ في تحالفه (المكاني) إلا من مصدرٍ نقطةٍ حقيقيٍّ؛ ويمكنُ الاعتياضُ عن ذلك عملياً وبصورةٍ مرضيةٍ بثقبٍ مع أنَّ الليزرَ هو أكثرُ ملاءمةً مِنْهُ. ويتمُّ الاقترابُ من التحالفِ الزمنيِّ أي الحصولُ على ضوءٍ أحاديِّ الموجةِ - إذ لا يُمكنُ الحصولُ عليه تماماً - بوضعِ مرشحةٍ ملائمةٍ في مسارِ الضوءِ - الشكل ٨؛ أمّا الضوءُ الأحاديُّ الموجةِ تماماً وَغيرُ المتحالفِ مكانياً فيُحصلُ عليه من مَصْدَرٍ مُمتدٍّ أو مُنتَشِرٍ مثل أنبوبِ التفريغِ الغازيِّ الذي يُضافُ إليه مرشحةٌ إن لَزِمَ الأمرُ.



الشكل ٨: الحصول على ضوء متحالف الى درجة كافية بالطريقة الصعبة باستخدام مرشحة وثقب.

التحالف الجزئي

أُجرى فيرْدْتُ Verdet في وقتٍ مبكرٍ عام ١٨٦٠ الدراساتِ التجريبيةَ الاولى عن المجالاتِ المتحالفةِ جزئياً؛ ثم اهتمَّ ميكلسون في وقتٍ لاحقٍ بوضوح الأهدابِ التداخلية. وعلى الرغم من أنَّ ميكلسون لم يطور مفهوم التحالفِ الجزئيِّ، فما زالت منحنياتِ الوضوح وسيلةً لقياسِ التحالفِ الجزئيِّ. أمّا التقدُّمُ الهامُّ في هذا الصددِ قَتَمَ على يَدَيَّ فان سِترْت الذي دَرَسَ التوزيعَ الاحتماليَّ للاضطراباتِ الموجية عندَ نُقْطَتَيْنِ نُضاءانِ بمصدرٍ ضوئيٍّ ممتدٍّ.

افترض أنَّ ستارة ما تستقبلُ ضوءاً ماراً بعدسة ذاتِ فتحةٍ دائرية؛ وقد يكونُ الجسمُ جسماً مُمتدّاً يتألف من عددٍ كبيرٍ من النقاطِ المضيئة التي لا تتحالفُ مكانياً تماماً، وفي هذه الحالة يتوقعُ المرءُ أن تكونَ استضاءَةُ الستارة غيرَ متخالفةٍ البتَّة. ولكنَّ الأمرَ على

*P. H. van Cittert, "Die wahrscheinliche Schwingungsverteilung in einer von einer Lichtquelle direkt oder mittels einer Linse beleuchteten Ebene," *Physica* 1, (1934), 201-10.

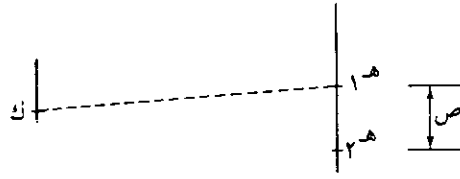
خلافِ التوقع ، و يعودُ السببُ في ذلك إلى أنَّ فتحةَ العدسة (منفذها) المحدودة لا تُكوِّنُ لكلِّ نقطةٍ في الجسمِ صورةً نقطيةً بلْ صورةً في شكلِ قرصٍ أيري Airy disk ؛ الأمرُ الذي ينشأُ مِنْهُ أنَّ تُغطِّي الستارةُ بسلسلةٍ من أقراصٍ أيري غيرِ المتخالفةِ نسبةً إلى بعضها بعضاً والتي تتراكَّبُ جزئياً. وَيعني هذا التراكُّبُ الجزئيُّ وجودَ درجةٍ من التحالفِ بَيْنَ النقاطِ المتجاورةِ على الستارة.

وَتنشأُ نفسُ الحالةِ عندَ عَدَمِ وجودِ العدسةِ بَيْنَ الستارةِ والمصدرِ؛ إذْ لا تتوقَّفُ درجةُ التحالفِ فعلاً إلاَّ على الفتحةِ الزاويةِ لحزمةِ الضوءِ التي تصلُ إلى الستارة: فالعدسةُ تُهيِّئُ مُجرَّدَ فَتْحَةٍ زاويَّةٍ أكبر. وَنَرَعِبُ الآنَ في قياسِ درجةِ تحالفِ الضوءِ الصادرِ من جِسْمٍ أو مصدرٍ مُمتدٍّ - الشكل ٩ ؛ إنَّ أيةَ نقطةٍ على المصدرِ كالنقطةِ (ك) تصدرُ ضوءاً يصلُ النقطةَ هـ بَسْعَةٍ وَتَظَوِّرُ ϕ ؛ وَلَمَّا كانتِ النقاطُ ك في المصدرِ الضوئي تهتزُّ باستقلالٍ عن بعضها بعضاً ، فَإِنَّ أطوارَ جميعِ الأشعةِ المتضامَّةِ عندَ هـ تكونُ عشوائيةً ومستقلةً أيضاً؛ وَلذا تكونُ محصلُهُ الاهتزازِ عندَ هـ مساويةً لمجموعِ الاهتزازاتِ الفرديةِ العديدةِ التي سَعَتْ كُلَّ منها ع والتي لها طورٌ عشوائي. وعندِ النقطةِ هـ على الستارة نَجِدُ أنَّ توزيعَ الطورِ يَكُونُ مختلفاً عن حالتهِ عندَ هـ ؛ ذلكَ لأنَّ أطوالَ المساراتِ من ذراتِ المصدرِ إلى النقطةِ هـ مختلفةٌ عَنْ مثيلاتها عندَ هـ . ويدورُ السؤالُ الهامُّ الآنَ حَوْلَ ما إذا كَانَ هـنالكَ ارتباطٌ بَيْنَ الاهتزازينِ عندَ هـ ، هـ١ .

دَعْنَا نُسَمِّ الحِجَمَ الزاويَّ للمصدرِ الضوئي α ، وهي الزاويةُ التي يعملُها المصدرُ الضوئيُّ عِنْدَ النظرِ إليه من النقطةِ هـ١ ؛ ولنفترضْ أنَّ قَ هي متوسطُ القدرةِ الضوئيةِ الساقطةِ على الستارةِ لكلِّ وَحْدَةٍ مساحيةٍ. ويكونُ احتمالُ الحصولِ على اهتزازينِ (σ) عندَ النقطتينِ هـ ، هـ١ بِسَعَتَيْنِ ع١ ، ع٢ وَبِظَوْرَيْنِ ϕ ، ϕ كما في المعادِلَةِ التالية:-

$$\sigma \times \frac{1}{\pi(1 - \cos \phi)} = (\sigma_1, \phi_1, \sigma_2, \phi_2) \quad \text{و-} \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_2 \cos \phi) + (\sigma_2 - \sigma_1 \cos \phi)}{2(1 - \cos \phi)} \right] \dots [2: 6-13]$$

* و- س = $e - x$



الشكل ٩ : اشتقاق معادلة فان سِيْتِزْت للتحالف الجزئي.

حيث $\epsilon_1 = \epsilon_1 \phi$ جتا η_1 ، $\epsilon_2 = \epsilon_2 \phi$ جتا η_2 ، $\epsilon_3 = \epsilon_3 \phi$ جتا η_3 ؛

ومن ثَمَّ يَكُونُ الاهتزازان عند النقطتين هـ_١ ، هـ_٢ اللتين تَبْعُدَانِ مسافةً ص متحالفين جزئياً ، وتُعْطَى درجةُ التحالفِ ت بالمعادلةِ التالية :-

$$[١٤-٦:٢] \quad \dots \frac{\frac{\text{جا } 2 \text{ ط ص جا } \alpha}{\lambda}}{\frac{\text{جا } 2 \text{ ط ص جا } \alpha}{\lambda}} = \text{ت}$$

وتبْلُغُ القيمةُ القصوى لِ (ت) ١ ؛ أما القيمةُ الدنيا فهي صفرٌ. وعندما تكونُ ت = ١ ، تكونُ $\sigma = 0$ صفر إلا في حالة كون $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ ؛ إذ عندها يَكُونُ الاهتزازان اللذان يَصْلَانِ إلى النقطتين هـ_١ ، هـ_٢ مُتَحَالِفَيْنِ تماماً. ونُلاحِظُ أَنَّ المعادلةَ [١٤-٦:٢] تُشَبِّهُ معادلةَ نَمِطِ الحيودِ مِنْ ثُقْبٍ دائريٍّ قُطْرُهُ مساوٍ لِقُطْرِ المصدرِ الضوئِيِّ.

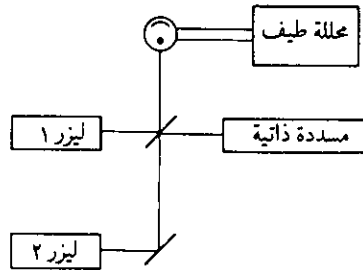
وَكَمَا يَظْهَرُ بوضوحٍ ، فَإِنَّ «ت» هي دالَّةٌ لِ ص ، أي أَنَّ ت = د (ص). وَلِلنَّقَاطِ هـ_١ ، القريبية من هـ_٢ أي عندما ص ← الصفر نجدُ أَنَّ ت ← ١ . وَيَعْنِي هذا أَنَّهُ يَكُونُ هنالك عند هذه النقاطِ تحالفٌ تامٌ. وَلَكِنْ بازديادِ المسافةِ ص تَصْغُرُ درجةُ التحالفِ ، وعندما تَبْلُغُ ص $\frac{\lambda}{2 \text{ جا } \alpha} = 0$ نجدُ أَنَّ ت = صفر أي لا يَوجَدُ تحالفٌ هنالك .

وقدّم زرنيك Zernike * مَنَحَى مغايراً لمسألة التحالف الجزئي؛ إذ وصف الأهداب التداخلية في تجربة يونغ بدلالة مفهوم الوُضوح لِمَيْكِلْسُون: فالكمية الأساسية في تحليل زرنيك هي دالة الشدّة المتبادلة $\text{mutual intensity function}$ التي تُعرّف بالمعدل الزمني لحاصل الاضطراب عند نقطة بالمترافق المُركَّب للاضطراب عند نقطة أخرى. أما درجة التحالف فهي دالة الشدّة المتبادلة المُسوَّاة normalized بصورة ملائمة.

إحداث الضربات أو النبضات Heterodyning

يمكن جعل الضوء الصادر من مصدرين ضوئيين مستقلين يتداخل؛ إلا أن هذا الأمر لم يتحقق حتى الآن لكونه أمراً غير سهل. وعلى سبيل المثالي فالتواتران اللذان استخدمنا في التجارب الأولى كانا غالباً مُكوّنتي زيمان Zeeman Components ليحط طيف منفرد، وكانت محصلة الاضطراب تلتقط بكاشف ضوئي. وتبعاً للفارق بين تواتري هاتين المكوّنتين، كان يحدث هنالك تواتر للضربات يدلُّ على حدوث تداخل بينهما؛ وقد عُرفت هذه العملية الكاملة بإحداث الضربات.

وفي أيامنا هذه تُوفّر الليزرات مصادر أكثر ملاءمة لحدوث الضربات؛ لأنّ للليزرات ذات الأمواج المتواصلة أزماناً تحالفية طويلة. وفي التطبيق العملي يستخدم مصدران ليزريّان مُتماثلان اسمياً - الشكل ١٠، ولهذين المصدرين عادة تواتران متغيران قليلاً مما يؤدي تداخل الضوء منهما إلى حدوث الضربات بتواتر مُعين. ولا يكفي أن



الشكل ١٠: مبدأ الحصول على اشارات الضربات من ليزرين.

* ف. زرنيك: «مفهوم درجة التحالف وتطبيقها على المسائل البصرية»، مجلة Physica، ١٩٣٨، ٧٨٥-٧٩٥.

تَتَعَرَّضُ نَفْسُ الْمَسَاحَةِ مِنَ الْمَهَبِطِ الضَّوئِيِّ لِلْحَزْمَتَيْنِ الضَّوئِيَّتَيْنِ فَحَسَبُ وَإِنَّمَا يَجِبُ كَذَلِكَ التَّأَكُّدُ مِنْ أَنَّ الْحَزْمَتَيْنِ مُتَوَازِيَتَانِ تَمَاماً؛ فَإِذَا لَمْ تَكُنَا مُتَوَازِيَتَيْنِ، فَإِنَّ الضَّرْبَاتِ تَنْشَأُ عَنْ أَجْزَاءٍ مُخْتَلِفَةٍ مِنَ الْمَهَبِطِ الضَّوئِيِّ، وَهِيَ لِذَلِكَ تَخْتَلِفُ فِي الطُّورِ مِمَّا يَجْعَلُ الضَّرْبَاتِ تَتَلَاشَى تَمَاماً.

اقتراحات لقراءات اضافية

- M. J. Beran and G. B. Parrent, Jr., *Theory of Partial Coherence* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1964).
 L. Mandel, E. Wolf, "Coherence Properties of Optical Fields," *Rev. Modern Physics* **37** (1965), 231-287.
 M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 4th ed., Chap. X (Oxford, London, New York: Pergamon Press, 1970).

المسائل

- ١-٦:٢ رَتْلَانِ مُوجِيَّانِ مِنْ مَصْدَرَيْنِ ضَوْئِيَّيْنِ لُهُمَا تَوَاتُرٌ وَاحِدٌ وَسَعَةٌ وَاحِدَةٌ، وَيَتَرَاكَبَانِ عَلَى بَعْضِهِمَا عَلَى مَدًى يَبْلُغُ ٤٠% مِنْ طَوْلَيْهِمَا؛ فَإِذَا كَانَتِ الشَّدَّةُ عِنْدَ النِّهَايَاتِ الْعَظْمَى فِي نَمَطِ التَّدَاخُلِ الْحَاصِلِ مِنْهُمَا تَبْلُغُ (٢٠) وَاحِدَةً، فَمَا مَقْدَارُ الشَّدَّةِ عِنْدَ النِّهَايَاتِ الصَّغْرَى؟
- ٢-٦:٢ تَدَاخَلَتْ مَوْجَتَا رَادِيُو لُهُمَا سَعَةٌ وَاحِدَةٌ وَتَوَاتُرٌ وَاحِدٌ، وَقَدْ بَلَغَتْ الْمَغَايِرَةُ غ = ١ عِنْدَمَا كَانَ فَارَقُ زَاوِيَةِ الطُّورِ $\delta = 0$ ، كَمَا بَلَغَتْ غ = صَفْرًا عِنْدَمَا كَانَتْ $\delta = 180^\circ$ ؛ جِدْ مَغَايِرَةَ أَهْدَابِ التَّدَاخُلِ لِمِثْلِ هَذِهِ الْأَمْوَاجِ غَيْرِ الْمُنْتَاهِيَةِ إِذَا كَانَتْ δ عَلَى التَّرْتِيبِ 30° ، 60° ، 90° .
- ٣-٦:٢ يَبْلُغُ طَوْلُ الْأَرْتَالِ الْمَوْجِيَّةِ لِلضَّوْرِ الْأَحْمَرِ الَّذِي يُحْصَلُ عَلَيْهِ مِنْ مِصْبَاحٍ بِاسْتِخْدَامِ مِرْشَحَةٍ مَاصِيَةٍ حَوَالِي 10λ ؛ فَإِذَا كَانَتْ $\lambda = 650$ نَمِ قَجِدْ قِيَمَةَ التَّشْتِتِ فِي الطُّوْلِ الْمَوْجِيِّ وَفِي التَّوَاتُرِ.
- ٤-٦:١ يُعْطِي الضَّوُّ الْأَخْضَرُ مِنْ مِصْبَاحِ الزُّبْقِ ($\lambda = 546$ نَمِ) تَدَاخُلًا عَلَى طَوْلِ فَارَقٍ مَسَارٍ يَبْلُغُ ٥٠ سَمِ؛ فَإِذَا افْتَرَضْنَا أَنَّ الْأَرْتَالَ الْمَوْجِيَّةَ طَوْلُهَا ٦٠ سَمِ، قَجِدْ التَّشْتِتَ فِي الطُّوْلِ الْمَوْجِيِّ، وَجِدْ أَيْضًا عَدَدَ الْأَمْوَاجِ الَّتِي يَخْوِيهَا الرَّتْلُ الْمَوْجِيُّ.

٥-٦:٢ جَذُّ أَقْلٍ بُعْدٍ بُؤْرِيٍّ لَعْدَسَةٍ مَسْدَدَةٍ تُغْطِي ضَوْءاً مُتَحَالِفاً عَلَى مَسَاحَةِ قَطْرُهَا ٢سم، وَذَلِكَ بِاسْتِخْدَامِ ثُقْبٍ قُطْرُهُ ٠,٠٤مم وَضَوْءِ الصُّوْدِيَوْمِ الَّذِي طَوْلُهُ الْمَوْجِيُّ ٥٨٩مم.

٦-٦:٢ بِالِاسْتِعَانَةِ بِمَتَسَلْسَلَةٍ مِنَ الرُّسُومَاتِ الْمُتَّجِهَةِ، حَدِّدْ طَوْلَ الْمُتَّجِهَةِ الْمُحْصَلَةِ وَالْوَضُوحَ بِافْتِرَاضِ أَرْتَالٍ مُوجِيَّةٍ غَيْرِ مُتَّنَاهِيَةٍ فِي طَوْلِهَا، وَإِذَا كَانَ الرَّتْلَانِ الْمَوْجِيَّانِ الْمُشْهَمَانِ لَهُمَا سَعَتَانِ تَبْلُغَانِ عَلَى التَّرْتِيبِ ٢، ٣ وَخُدَاتِ وَتِرَاكِبَانِ بِفَارَقِ زَاوِيَةٍ طَوْرِيَّتِلْغُ بِالْتَّرْتِيبِ ٠، ٤٥، ٩٠، ١٨٠.

٧-٦:٢ يَتَمَرَّكُزُ نِطَاقُ ضَبِيقٍ مِنَ الضُّوْءِ حَوْلَ طَوْلِ مُوجِيٍّ مُتَوَسِّطٍ يَبْلُغُ ٥٢٠مم. فَإِذَا قُطِّعَ شُعَاعُ الضُّوْءِ هَذَا بِغَالِقٍ تَقْطِيعاً تَوَاتُرُهُ ٤٠ مِيْجَاهَرْتِزْ، فَعَيَّنْ عَرَضَ نِطَاقِ الضُّوْءِ النَّاتِجِ بِالْأَنْجَسْتِرُومِ.

٨-٦:٢ تَدَاخَلَ الضُّوْءُ الصَّادِرُ مِنَ لَيْزَرَيْنِ مِنْ ثَانِي أُكْسِيدِ الْكَرْبُونِ يُصْدِرَانِ الضُّوْءَ بِطَوْلِ مُوجِيٍّ اسْمِيٍّ مَقْدَارُهُ ١٠×١٠-٣مم؛ فَإِذَا قُصِدَ الْحَصُولُ عَلَى ضَرَبَاتِ تَوَاتُرِهَا لَا يَزِيدُ عَلَى ٢٠٠ مِيْجَاهَرْتِزْ، فَجَدَّ تَشْتُّ التَّوَاتُرِ الَّذِي يَنْبَغِي أَنْ يُضَبَّطَ عَلَيْهِ كُلٌّ مِنَ اللَّيْزَرَيْنِ.

الفصل ٢ : ٧

محزوزات الحيود Diffraction Gratings

يُعتَبَرُ مبدأ محزوز الحيود امتداداً مباشراً لتداخل الشقِّ المزدوج ؛ إذ يَكْمُنُ الفارقُ الرئيسُ بينه وَبَيْنَ الشقِّ المزدوج في أنَّ محزوزَ الحيود يَسْمَحُ بِمُرُورِ ضَوْءٍ أَكْثَرَ. كذلك تأخذُ محزوزاتُ الحيود شَكْلَ مُشَبَّكَاتِ grids ذاتِ بُعْدَيْنِ أو ثلاثة أبعاد .

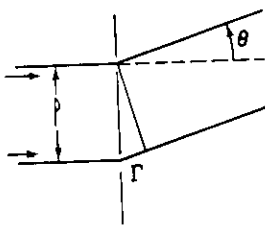
المحزوزات ذات البعد الواحد

وَفَقْ مَبْدَأ هَيْجِنز يَعْمَلُ كُلُّ شَقٍّ في محزوزِ الحيود كَمَصْدِرٍ لِلْمَوْجَاتِ الثَّانَوِيَّةِ، وَ يُشَكِّلُ غِطَاءَ هَذِهِ الْمَوْجَاتِ جِهَةً مَوْجِيَّةً جَدِيدَةً ؛ وَعِنْدَمَا يُرْسَمُ الْغِطَاءُ لِيَشْمَلَ الْمَوْجَاتِ ذاتِ الطَّوْرِ الْمَتَسَاوِي تَتَقَدَّمُ الْجِهَةُ الْمَوْجِيَّةُ الْجَدِيدَةُ فِي نَفْسِ الْإِتْجَاهِ الَّذِي سَقَطَ فِيهِ الضَّوْءُ عَلَى الْمَحْزُوزِ فِي الْبَدَاءَةِ .

غَيْرَ أَنَّهُ يُمْكِنُ رَسْمُ غِطَاءَاتٍ أُخْرَى : فَعَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ تَخَيَّلْ غِطَاءً يَشْمَلُ جِهَةً مَوْجِيَّةً تَمُرُّ فِي أَحَدِ الشَّقَوقِ وَجِهَةً مَوْجِيَّةً سَابِقَةً لِلأُولَى تَمُرُّ فِي الشَّقِّ الْمَجَاوِرِ التَّالِي وَجِهَةً مَوْجِيَّةً سَابِقَةً لِلثَّانِيَةِ تَمُرُّ فِي الشَّقِّ التَّالِي لَذَلِكَ وَهَكَذَا ذَوَالَيْكَ ؛ فَالْغِطَاءُ الْمَحْصَلَةُ لَهُ طَوْرٌ مُنْتَظِمٌ أَيْضاً ، وَلَكِنَّهُ يَتَقَدَّمُ فِي اتِّجَاهٍ يَمِيلُ عَنِ اتِّجَاهِ الضَّوْءِ السَّاقِطِ بِزَاوِيَةٍ مَا .

معادلة المحزوز The grating equation

افترض أنَّ الضَّوْءَ يَسْقُطُ عَلَى مَحْزُوزٍ مَا مِنْ جِهَةِ الْيَسَارِ - الشَّكْلُ ١ ؛ أَنْشِئْ كَمَا فِي الشَّكْلِ عَمُوداً مِنْ مَرَكِّزِ شَقٍّ مَا عَلَى الشَّعَاعِ الْمَرْكَزِيِّ الْمُحَيَّدِ بِالشَّقِّ التَّالِي الْمَجَاوِرِ . فَإِذَا كَانَتْ أ الْمَسَافَةُ بَيْنَ مَرَكِّزِي الشَّقَّيْنِ ، θ زَاوِيَةُ الْحَيُودِ الْمَحْصُورَةِ بَيْنَ الْعَمُودِ عَلَى الْمَحْزُوزِ وَالشَّعَاعِ الْمُحَيَّدِ ، وَ Γ فَارَقَ الْمَسَارِ بَيْنَ الشُّعَاعَيْنِ ، فَإِنَّ :-



الشكل ١ : اشتقاقُ معادلةِ المحزوز

جا $\theta = \frac{\Gamma}{\lambda}$ ؛ تماماً كما هو الحال في تداخل الشقّ المزدوج؛ ولذا تكون الأمواج المارة من الشقين متحدة الطور، أي تُدعّم كل موجة منها الأخرى، عندما يتوافر الشرط التالي:

$$\Gamma = \lambda \cdot n, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

وَيُشع من ذلك أنّ موقع النهايات العظمى يتحدّد بمايلي :-

$$[1-7:2] \quad \boxed{\text{أجا } \theta = \lambda \cdot n} \quad \dots\dots$$

وتُعرف هذه المعادلة بمعادلة المحزوز؛ حيثُ n تمثل الرتبة و λ الطول الموجي.

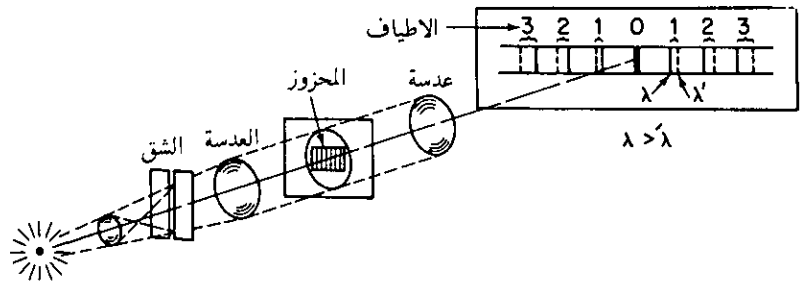
وإذا ما سقط الضوء على المحزوز مائلاً بزاوية α ، فإنّ :-

$$[2-7:2] \quad \dots\dots \quad \lambda \cdot n = (\text{أجا } \theta + \alpha)$$

تكون الأطياف Formation of Spectra

يسدّد الضوء في التطبيق العمليّ باستخدام شقّ يوجّه موازياً للمحزوز و يوضع في بؤرة عدسة جهة الجسم؛ ثمّ يسقط الضوء على المحزوز - الشكل ٢، وتقوم عدسة أخرى (س٢) بتركيز الضوء على ستارة جهة اليمين. ويمرّ معظم الضوء في المحزوز من دون أن يعاني أي اضطراب مُكوّناً بذلك النهاية العظمى المركزية أو الصفريّة؛ أما بقية الضوء فسّتعاني من الحيود مكونةً بذلك متسلسلةً من النهايات ذات الرتب الأعلى. غير أنّ الضوء من أطوال موجيّة مختلفة يعاني من الحيود (أو يُحيّد) بزوايا مختلفة θ ؛ ولذا يمتدّ، لكلّ رتبة، طيف من أطوال موجيّة مختلفة: ويتألّف كل طيف من متسلسلة من صوّر أحادية اللون للشق، تكون فيها الصورة الزرقاء أقرب إلى المركز والصورة الحمراء أبعد عنه. وتحفظ النهاية العظمى الصفريّة وخذها بلون المصدر غير الأحاديّ ممّا يسهّل التعرف إليها.

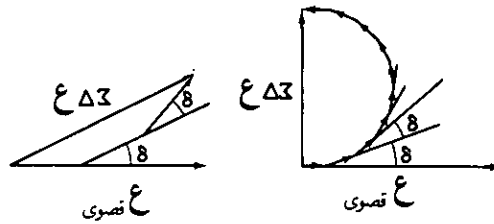
ويتحدّد عدد الرتب التي يمكن الحصول عليها بثابت المحزوز (أ)؛ ذلك لأنّ قيمة θ لا تتجاوز ٩٠°، فاعلى رتبة يمكن الحصول عليها تساوي $\frac{\lambda}{\lambda}$. ويُعطى المحزوز غير المصقول،



الشكل ٢: تكون الطيف الخطي بمحزوز حيود؛ ويظهر الشكل طيف المصدر الذي يصدر طولين موجيين: λ ، λ' .

حيث تكون أ كبيرة، رتباً عديدة؛ بينما يُغطي المحزوزُ المصقولُ باتقانٍ رتبةً واحدةً أو رتبتين؛ ولذا يَتَنَشَرُ الطيفُ الذي يُحَصَّلُ عليه من محزوزٍ مصقولٍ أكثر من الطيف الذي يُحَصَّلُ عليه من محزوزٍ غير مصقولٍ .

وتصبحُ صورُ الشقِّ أو خطوطُ الطيفِ بشكلٍ خاصٍ أوضح وأرفع إذا زادَ عددُ شقوقِ المحزوز؛ ويمكننا بيان ذلك بالرجوع إلى رسومِ الطورِ التي تُظهرُ جَمْعَ الأمواجِ لمحزوزاتٍ حيودٍ مختلفةٍ - الشكل ٣. وفي كلا الحالتين تُمثِّلُ E القصوى العظمى في مَرَكِزِ الحِطِّ الطيفيِّ حيثُ تتضامُّ السعاتُ الفرديةُ ΔE من كلِّ شقٍّ متحدةً طورياً تماماً. وإذا ما تحركنا مبتعدين عن الزاوية θ التي تحدثُ عندها السعةُ العظمى بمقدارٍ قليل $\Delta \theta$ ، نُدْخِلُ بَيْنَ الأمواجِ من شقين متجاورين فارقاً في الطورِ مقداره δ ؛ ولأنَّ δ ثابتةٌ لأيِّ شقين متجاورين فإنَّ محصلةَ السعةِ ΔE وكذلك الشدةُ تَهْبِطَانِ بِحِدَّةٍ على جانبي النهايةِ العظمى المركزية إذا احتوى المحزوز على عددٍ أكبر من الشقوق.



الشكل ٣: رسومات الطور لمحزوزات الحيود: أحدها بثلاثة شقوق (الى اليسار) والآخر بعشرة شقوق (الى اليمين) وذلك لكل وحدة عرض .

ولتحديد الطول الموجي يُمكن استخدام الشكل ٤. ويتبع من الرسم في الشكل ٤ أن: ح = $\sqrt{ف^2 + ب^2}$ ؛ ولذا تُحسب زاوية الحيود θ من: جا $\theta = ف / \sqrt{ف^2 + ب^2}$. وبتعويض هذه القيمة في معادلة المحزوز [١-٧:٢] وبحل المعادلة لإيجاد λ ، نحصل على:-

$$\frac{ف}{\sqrt{ف^2 + ب^2}} = \lambda \quad \dots\dots \quad [٣-٧:٢]$$

التحليل الزاوي Angular dispersion

يُعرف التحليل الزاوي لمحزوز بقدرته على فصل الضوء متعدد الألوان إلى حزم ذات أطوال موجية مختلفة منفصلة. افترض أن مصدراً ضوئياً يُصدر ضوءاً بطولين موجيين: λ ، $\lambda + \Delta\lambda$ ؛ فنهايات الحيود العظمى ذات الرتبة النونية تحدث بالترتيب عند الزاويتين θ ، $\theta + \Delta\theta$ ، حيث يُعطى جيباهما بمايلي:-

$$\frac{\lambda}{\sin \theta} = \theta \quad \text{جا} \quad \frac{\lambda + \Delta\lambda}{\sin(\theta + \Delta\theta)} = (\theta + \Delta\theta) \quad \text{جا} \quad \dots\dots [٥-٧:٢] \quad \dots\dots$$

وإذا كانت $\lambda \gg \Delta\lambda$ ، $\theta \gg \Delta\theta$ أمكننا كتابة:-

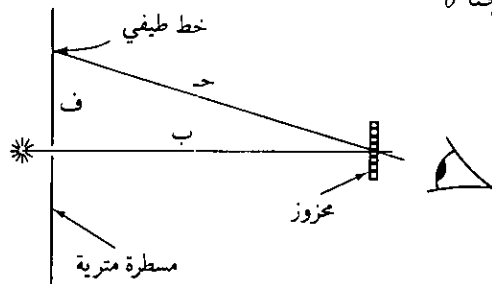
$$\frac{\lambda}{\sin \theta} = \theta \quad \text{جا} \quad \frac{\lambda + \Delta\lambda}{\sin(\theta + \Delta\theta)} = (\theta + \Delta\theta) \quad \text{جا} \quad \dots\dots [٦-٧:٢]$$

وبتضمين المعادلتين [٤-٧:٢]، [٥-٧:٢] في المعادلة [٦-٧:٢] نحصل على:-

$$\frac{\lambda}{\sin \theta} + \frac{\Delta\lambda}{\sin \theta} = \frac{(\lambda + \Delta\lambda)}{\sin \theta} \quad \text{جا} \quad \theta$$

ومنها نحصل على:-

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\theta}{\sin \theta} \quad \dots\dots [٧-٧:٢]$$



الشكل ٤ : النظر الى مصدر ضوئي عبر محزوز حيود.

وَيُسَمَّى المقدار $\frac{\theta \Delta}{\lambda}$ بالتحليل الزاوي أو القدرة التحليلية للمحزور. ويمكن بسهولة رؤيته أن التحليل يزداد بازدياد رتبة الطيف n ، وأنه يتناسب عكسياً مع ثابت المحزور Δ . وللزوايا الصغيرة يكون جتا $\theta \approx 1$ ، مما يعني أن الطيف خطي تقريباً، أي أن الزيادات المتساوية في θ يصاحبها زيادات متساوية في الطول الموجي. ولترتب العالية يزداد التحليل الزاوي بزيادة θ وبالتالي بزيادة λ ؛ ولذا ينتشر الطرف الأحمر للطيف أكثر من الطرف الأزرق، وهي عكس النتيجة التي توصلنا إليها في حالة الموشور.

قدرة التبين اللوني Chromatic resolving power

إن قدرة التبين اللوني لمحزور، كما للموشور، هي قدرته على فصل خطين طيفيين متقاربين. افترض أن $\Delta \lambda$ هي الفارق في الطول الموجي بين الخطين، θ الموقع الزاوي للنهاية العظمى ذات الرتبة n ، $\theta + \delta$ موقع النهاية الصغرى التالية المجاورة. فكما ذكر سابقاً فإن:-

$$\text{جا } \theta = \frac{\lambda n}{\Delta} \dots\dots [4-7:2]$$

أما للنهاية الصغرى فإن:-

$$\text{جا } (\theta + \delta) = \frac{\lambda}{\Delta} \left(n + \frac{1}{L} \right) \dots\dots [8-7:2]$$

حيث L عدد الشقوق في المحزور. لكن:-

$$\text{جا } (\theta + \delta) = \text{جا } \theta + \delta \text{ جتا } \theta \dots\dots [6-7:2]$$

ولذلك فإن:-

$$\frac{\lambda}{\Delta} \left(n + \frac{1}{L} \right) = \text{جا } \theta + \frac{\lambda n}{\Delta} + \delta \text{ جتا } \theta$$

أي أن:-

$$\frac{\lambda}{L \text{ جتا } \theta} = \delta \dots\dots [9-7:2]$$

وَبَوْضِع $\theta \Delta = \theta \delta$ ، وَبِجَمْعِ الْمَعَادِلَتَيْنِ [٩-٧:٢] وَ [٧-٧:٢]، نَحْصُلُ عَلَى:-

$$\frac{\lambda}{\lambda \Delta} = \frac{\lambda \Delta}{\lambda \Delta}$$

أَيْ أَنَّ:-

[١٠-٧:٢]

.....

$$\lambda \Delta = \frac{\lambda}{\lambda \Delta}$$

وَتَصِفُ الْمَعَادِلَةُ الْأَخِيرَةُ أَقَلَّ فَارِقٍ فِي الطَّوِيلِ الْمَوْجِيِّ $\lambda \Delta$ مِنَ الرَّتْبَةِ ن يُمْكِنُ لِمَحْزُوزٍ عَدْدُ شُقُوقِهِ ل أَنْ يَتَبَيَّنَهُ.

وَتَتَنَاسَبُ قَدْرَةُ التَّبْيِينِ مَعَ الرَّتْبَةِ وَمَعَ عَدْدِ الشُّقُوقِ، فَقَدْرَةُ التَّبْيِينِ عِنْدَ الرَّتْبَةِ الثَّانِيَةِ هِيَ ضَعْفُ قَدْرَةِ التَّبْيِينِ عِنْدَ الرَّتْبَةِ الْأُولَى. وَلِذَا تَتَطَلَّبُ زِيَادَةُ قَدْرَةِ التَّبْيِينِ اسْتِخْدَامَ مَحْزُوزٍ بِشُقُوقٍ أَكْثَرَ عَدْدًا أَوْ التَّقَدُّمَ إِلَى رَّتْبَةٍ أَعْلَى. وَلَكِنْ لَا حِظٌّ مِنَ الْمَعَادِلَةِ [١٠-٧:٢] أَنَّ قَدْرَةَ التَّبْيِينِ -خِلَافًا لِلتَّحْلِيلِ الزَّاوِيِّ- لَا تَعْتَمِدُ عَلَى الْمَسَافَةِ الْفَاصِلَةِ بَيْنَ الشَّقَّيْنِ مِمَّا يَفْرَضُ عَمَلِيًّا أَنْ تُحَزَّ خُطُوطُ الْمَحْزُوزِ مُتَقَارِبَةً جَدًّا مِنْ أَجْلِ الْإِحْتِفَاطِ بِفَتْحَةِ الْمُنْظُومَةِ الْبَصَرِيَّةِ ضَمْنَ حُدُودٍ مَعْقُولَةٍ.

أنواع المحزوزات

نُفِيزُ هُنَا بَيْنَ مَحْزُوزَاتِ النِّفَازِ Transmission gratings وَمَحْزُوزَاتِ الْإِنْعِكَاسِ. فَفِي الْأُولَى، تُحَزُّ الْخُطُوطُ عَلَى الزَّجَاجِ، وَتُعْمَلُ الْأَجْزَاءُ غَيْرُ الْمُحَزَّةِ مِثْلَ شُقُوقٍ. بَيْنَمَا فِي الثَّانِيَةِ تُحَزُّ الْخُطُوطُ عَلَى سَطْحٍ مَعْدَنِيٍّ مَصْقُولٍ، وَيَنْعَكِسُ الضَّوُّ السَّاقِطُ عَنِ الْأَجْزَاءِ غَيْرِ الْمُحَزَّةِ مُحْدِثًا بَانْعِكَاسِهِ النَّتِيجَةَ نَفْسَهَا الَّتِي يُحْصَلُ عَلَيْهَا مِنْ نَفَازِ الضَّوِّ فِي مَحْزُوزَاتِ النِّفَازِ. وَنُفِيزُ كَذَلِكَ تَبَعًا لَشَكْلِ السَّطْحِ الْمُحَزِّ بَيْنَ الْمَحْزُوزَاتِ الْمُسْتَوِيَةِ وَالْمَحْزُوزَاتِ الْمَقْوَسَةِ Curved grating.

لقد صَنَعَ المحزوزات الأولى عام ١٨١٩ فُرونهوفر الذي قام بلف أسلاك دقيقة حول لولبتين متوازيين. وفي أيامنا هذه تُصنَعُ المحزوزات الأصلية أي النسخة الأصلية بحزأخايدة متوازية متساوية البعد على شريحة زجاجية باستخدام قاطعة من الماس تُضَبِّط حركتها آلياً. ويستطاع بهذه الطريقة صنع محزوزات تحوي أكثر من ٣٠٠ خط للمليمتر الواحد. وتشتمل بعض راسمات الطيف التي تستخدم المحزوزات على نسخ بلاستيكية عن هذه النسخ الأصلية المتقنة.

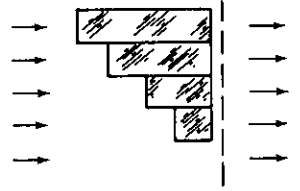
و يُسمى المحزوز الذي يحتوي على مساحات رفيعة معتمة أو ممتصة ومساحات رفيعة حرة مُنفِذَة بمحزوز السعة. وفي محزوز الطور phase grating توجد مساحات رفيعة متبادلة لا تعمل إلا على إبطاء طور الضوء الذي يمر فيها. وفي المحزوز الاعتيادي، تكون المساحات الرفيعة المعتمة والمنفذ ذات عرض واحد. أما في المحزوز الصفحي lamingry grating، فتكون المساحات الرفيعة المعتمة والمنفذ ذات عرض واحد أيضاً، وتعمل كذلك على إبطاء الطور بمقدار $\frac{\lambda}{4}$. ويكون لمثل هذه المحزوزات خصيصة غريبة وهي أنها لا تُكوّن النهاية العظمى المركزية (الصفريّة). وفي المحزوز المتوهج blazed grating تُعطى الأخاديد شكلاً هندسياً منتظماً بحيث يتركز معظم الضوء المُحيّد عند رتب معينة، إذ في العادة تُعمل الأخاديد بحيث يكون لكل منها وجه شديد الانحدار ووجه مسطح قليلاً كما في الشكل ٥. ويوجه الضوء الساقط بحيث يقع موازياً للوجه المسطح وعمودياً على الوجه شديد الانحدار، وبذلك يعود الضوء المُحيّد في اتجاه معاكس للضوء الساقط وموازياً له إلى درجة كبيرة+. وتسمى هذه الحالة بحالة التسديد الذاتي. وتشتمل محزوزات رونشي Ronchi التي هي من المحزوزات المتوهجة عادة على ٥ إلى ١٠ خطوط للمليمتر الواحد تقريباً.



الشكل ٥: مخطط (بروفيل) محزوز الانعكاس المتوهج.

*G. R. Harrison and S. W. Thompson, "Large Diffraction Gratings Ruled on a Commercial Measuring Machine Controlled Interferometrically," *J. Opt. Soc. Am.* 60 (1970), 591-95.

† For the numerical relationships see S. P. Davis, *Diffraction Grating Spectrographs* (New York: Holt, Rinehart & Winston, Inc., 1970), 11-12.



الشكل ٦: المحزوز السلمي:
لقد رُسم المحزوز على النحو
المبين ليؤكد تشابهه للمحزوز
الاعتيادي. وفي الواقع لا
توجد شقوق الى يمين المحزوز.

وَتُظْهِرُ حَتَّى أَحْسَنُ المحزوزاتِ صُنْعاً عيوباً (أخطاءً) دوريةً معينة تُغزى إلى قُصُورٍ في آلة الحز، وَتَنْشَأُ عَنْ هذه الأخطاءِ خطوطٌ طيفيةٌ كاذبةٌ تسمى الأشباح ghosts. وَيُستخدَمُ في المطيافية العادية محزوزاتٌ بخطوطٍ كثيرة، كذلك تَتِمُّ المشاهداتُ عند الرتبِ الصغيرة. وقد أشارَ ميكلسون إلى أَنَّ التبيينَ العالي يُحصَلُ عليه باستخدامِ خطوطٍ قليلةٍ ورتبٍ عالية. وَيمكنُ توفيرُ ذلكِ بوضعِ شرائحٍ زجاجيةٍ متزايدةٍ في سُمكها باستمرارٍ أمامَ كلِّ شقٍّ، مما يُحدِثُ إبطاءً في طورِ الضوءِ يَتَبَيَّنُ الشقوقِ المتجاورةِ بمقدارٍ يزيدُ كثيراً على طولِ موجيٍّ واحدٍ. وَيعرَفُ مثلُ هذا الترتيبِ بالمحزوزِ السلمي echelon grating - الشكل ٦، وهو يتألفُ عملياً من كومةٍ من الشرائحِ الزجاجيةِ ذاتِ الوجوهِ المستويةِ المتوازيةِ والمتساويةِ في سُمكها والمزاحةِ جانبيّاً، فقد يتألفُ من ٤٠ شريحةً سُمكُ كلِّ منها ١ سم وتَنزاحُ عَنْ الشريحةِ المجاورةِ لها بمقدارٍ ٢ مم. وَبِمِثْلِ هذه المحزوزاتِ يمكنُ الحصولُ على رتبٍ تصلُ إلى ١٠,٠٠٠. أما الإكليت echelette فهو محزوزٌ طورٍ عاكسٌ.

حاملات المحزوزات Grating mounts

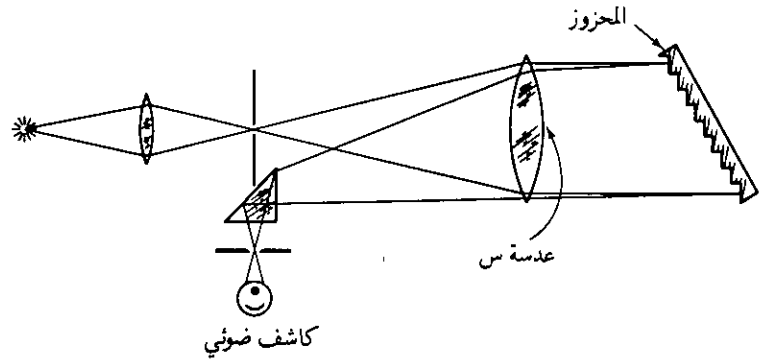
يُثَبَّتُ محزوزُ الحيودِ في أبْسَطِ طريقةٍ كالמושورِ تماماً بَيْنَ المسددةِ والتلسكوبِ - الأشكال ٦-٩. وَيعْمَلُ حاملُ ليثرو Li ttrow على المبدأ نفسه، إلا أَنَّهُ مكيفٌ للاستعمالِ مَعَ محزوزِ الانعكاسِ المستوي - الشكل ٧، حيثُ تعملُ العدسةُ نفسها (س) مِثْلَ مسددةٍ وتلسكوبٍ في حينِ ينعكسُ الضوءُ مُبتعداً عن المحورِ بمرآةٍ أو موشورٍ صغيرٍ مُوازٍ. وَقَدْ يُغتاضُ عن العدسةِ المنفردةِ في حاملِ ليثرو بِمرايا كما هو الحالُ في حاملَي شيرني - تزنر Czerny-Turner وفاستي - إبرت Fastie-Ebert. ففي تصميمِ شيرني - تزنر توجَدُ مرأتان مُقَعَّرتان: إحداهما للتركيز، والأخرى للتشديد، كما أَنَّ المحزوزَ يدورُ حَوْلَ محورٍ مُتعامِدٍ على مُستوى الرسم - الشكل ٨*. أما حاملُ فاستي - إبرت + فيشملُ مرآةً واحدةً للتشديد والتركيز، إذْ بَعْدَ أَنْ يَمُرَّ الضوءُ مِنْ شقِّ الدخولِ يَسْقُطُ على نِصْفِ المرآةِ حيثُ يُسَدَّدُ وَيُعْكَسُ إلى المحزوزِ المستوي؛ كذلك يقومُ نِصْفُ المرآةِ الآخرُ بَعْدَ تحليلِ الضوءِ بتركيزه على شقِّ الخُروجِ؛ وَيدورُ المحزوزُ بنفسِ الطريقةِ التي يدورُ بها في تصميمِ شيرني - تزنر.

*M. Czerny and A. F. Turner, *Z. Physik* 61 (1930), 792.

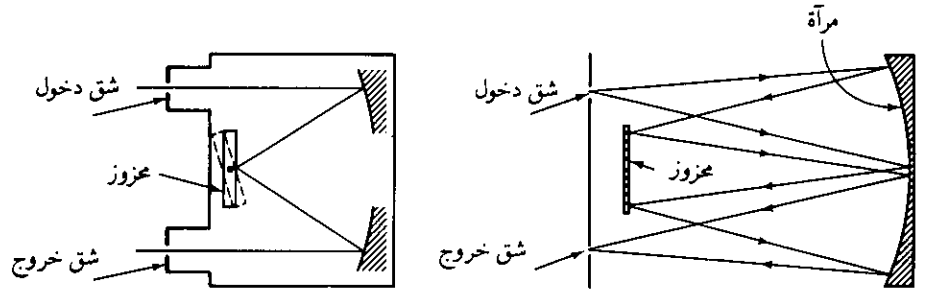
†W. G. Fastie, "A Small Plane Grating Monochromator," *J. Opt. Soc. Am.* 42 (1952), 641-47.

وَيُعْتَبَرُ تَصْمِيمُ فَاسْتِي - إِبْرَتِ تَصْمِيماً بَسِيطاً وَأَسْهَلَ مِنْ حَيْثُ تَعْدِيلُهُ . وَيُمْكِنُ تَصْحِيحُ بَعْضِ الزَوَاغَاتِ بِاسْتِخْدَامِ شُقُوقٍ مَتَقَوِّسَةٍ عَوَضاً مِنَ الشَّقُوقِ الْمُسْتَقِيمَةِ .

وَعِنْدَمَا يَكُونُ الْمَحْزُوزُ مَتَقَوِّساً ، فَإِنَّهُ يَقُومُ بِتَرْكِيزِ الضَّوءِ كَذَلِكَ مِمَّا يُغْنِي عَنْ الْحَاجَةِ إِلَى اسْتِخْدَامِ عَدْسَةٍ أَوْ مِرَاةٍ مَرْكَزِيَّةٍ أَوْ مُسَدَّدَةٍ . فَفِي حَامِلِ رُولَانْدِ Rowland + مثلاً ، يَقَعُ الشَّقُّ (ش) ، مَرْكَزُ الْمَحْزُوزِ (O) ، مَرْكَزُ التَّكْوِيرِ (م) وَالْفِيلْمُ الْفُوتُوغْرَافِيُّ تَقَعُ جَمِيعاً عَلَى دَائِرَةٍ وَاحِدَةٍ تُعْرَفُ بِدَائِرَةِ الْمَرْجِعِ أَوْ دَائِرَةِ رُولَانْدِ . أَمَّا حَامِلُ بَاشِنِ paschen فَهُوَ يُشَبَّهُ حَامِلَ رُولَانْدِ .

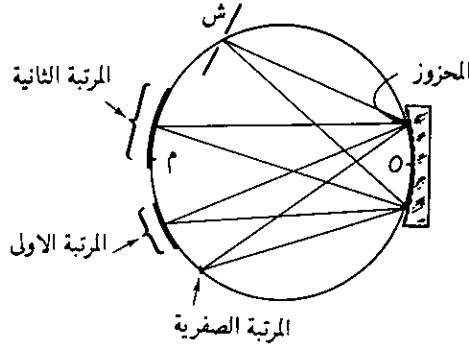


الشكل ٧ : حامل ليترو لمحزوز الانعكاس المستوي



الشكل ٨ : حامل شيرني - تِرَنر (الى اليسار) وحامل فاستي - إِبْرَتِ (إلى اليمين) .

+ نسبة الى هـ. أ. رولاند H. A. Rowland (١٨٤٨-١٩٠١): أستاذ الفيزياء في جامعة جونز هوبكنز Johns Hopkins ، بَلْتِيمُور .



الشكل ٩ : المحزوز المقعرو دائرة رولاند

مثال : لمحزوز حيود عدد خطوطه ٦٠٠ خط للملتر الواحد وعرضه ١٥ سم ، نجد أن :-

$$\frac{\lambda}{\lambda \Delta} = L = N = 15(600)(10) = 90,000$$

وبذلك تكون قيمة $\lambda \Delta$ لضوء أخضر:

$$\frac{550 \text{ nm}}{90,000} = \lambda \Delta$$

= ٠,٠٠٦١ سم. ويعني هذا أنه يُمكن تبيين خطين طيفيين الفارق في طوليهما الموجيين = ٠,٠٦ أنجستروم.

أما لموشور زجاجي عرض قاعدته ب ، فنجد أن :-

$$b = \frac{\lambda}{\lambda \Delta} \text{ ب } \frac{d}{\lambda d} ; \text{ فإذا كانت } \frac{d}{\lambda d} = \frac{10 \times 12}{10^4} \text{ م}^{-1} , \text{ فإن عرض قاعدة الموشور}$$

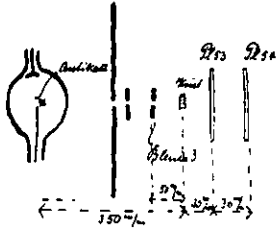
أو متسلسلة المواشير ب تُعطى على النحو التالي إذا ما أريد للموشور أن يكون له نفس قدرة التبيين التي للمحزوز :-

$$b = \frac{90,000}{10^4 \times 12 - 1} \text{ سم} = 75 \text{ سم}$$

المحزوزات ذات البعدين

يمكن تصور المحزوز ذي البعدين على أنه محزوزان اعتياديان وُضِعَ أحدهما فوق الآخر بشكلٍ متقاطع. ومن الطبيعي أن يُكوّن المحزوز ذو البعدين نمطاً ذا بُعْدَيْن من النهايات العظمى عوضاً من النمط الخطّي ذي البعد الواحد المُكوّن بالمحزوز الاعتيادي. وإذا كان ثابتا المحزوز في البعدين متساويين، فإن النهايات العظمى الحاصلة تكون متساوية البعد عن بعضها بعضاً في كلا الاتجاهين؛ أما إذا كان الثابتان غير متساويين فإن نمط الحيود الناتج يكون مستطيل الشكل، وتتقارب النهايات العظمى في أحد الاتجاهين أكثر من تقاربها في الاتجاه الآخر. ولا تقتصر المحزوزات ذات البعدين من حيث شكلها على الوضع المستطيل إذ يمكن مثلاً اعتبار لوحة المناطق أنها محزوز ذو دائريّين ذو بعدين. وستبحث المحزوزات ذات الأبعاد الثلاثة لاحقاً.

حيود الأشعة السينية X-ray Diffraction



لقد أظهرت التجارب الأولى التي تناول الشقوق الرفيعة أن الطول الموجي للأشعة السينية هو من رتبة المقدار 10^{-10} م أو أنجستروم. ولما كانت المسافات بين الذرات في بلورة من رتبة المقدار نفسه، فقد أشار ماكس فون لاو Max Von laue عام ١٩١٢ أن البلورة قد تفعل بالأشعة ما يفعله المحزوز تماماً بالضوء.

الشكل ١٠: صورة مستنسخة من دفتر ملاحظات فريدريك نينج، وفان لاو المؤرخ ٤ ايار ١٩١٢. ويظهر أنبوب الأشعة السينية (الى اليسار)، ثلاثة ثقوب، مسددة، بلورة، و لوحة فوتوغرافية في وضعين مختلفين كما استخدمت في أول تجربة ناجحة عن حيود الأشعة [استنسخت باذن من متحف مانشن München الألماني للصور].

ولقد وجد فريدريك وينج Friedrich and Knipping، أثر اقتراج لاو، أن الأمر هو حقاً كذلك. فقد مرّ حزمة من الأشعة السينية في بلورة من كبريتات النحاس (CuSO_4) ووضعوا لوحة فوتوغرافية خلف البلورة كما يظهر في الشكل ١٠ المستنسخ من سجلاتهما المخبرية الأصلية. ووجدوا أن بعض الأشعة السينية قد مرّت عبر البلورة مكونة

• ماكس فان لاو (١٨٧٩-١٩٦٠): الفيزيائي الألماني، مدير معهد القيصر وللم في برلين الذي سُمّي فيما بعد باسم معهد ماكس بلانك، حصل على جائزة نوبل عام ١٩١٤. لقد اكتشف الأشعة السينية عام ١٨٩٥ ولهم كوناود رونشجن (١٨٤٥-١٩٢٣) الفيزيائي الألماني والفائز بجائزة نوبل عام ١٩٠١. انظر:

W. C. Röntgen, "Ueber eine neue Art von Strahlen," *Ann. Physik* 64 (1898), 1-11, 12-17.

†W. Friedrich, P. Knipping, and M. von Laue, *Sitz. ber. Bayer. Akad. Wiss., Math.-phys. Klasse* 1912, 303.

الرتبة الصفريّة، كما أنّ بعضها قد عانى الحيوة أو التشتت المتحالف من الإلكترونات في المدارات الخارجيّة لذرات البلورة، مكونةً بذلك نمطا من البُقْع متماثلاً حول مركزه يُعرَف بشكلٍ لاؤ.

قانون براج Bragg's Law

أبلورة هيئة ثلاثية الأبعاد من الذرات أو زُمُر الذرات، وهي تُبنى من وحدات بناءٍ أساسية متكررة تُعرَف بالخلايا التوحديّة Unit cells. ويمكنُ تصورُ حيود الأشعة السينية من هذه الخلايا كأنه انعكاس - الشكل ١١. افترضُ حزمةً أحادية الطول الموجي من الأشعة السينية تسقط على بلورة صانعة زاوية θ مع سطحها+. إنّ بعض الطاقة الساقطة تنعكس عن الطبقة العليا ١، غير أنّ بعض الأشعة تنفذ إلى المستويات الداخلية ٢، ٣، الخ. افترض أيضاً أنّ المسافة بين أيّ مستويين هي أ. ولكي تُدعم الموجة المنعكسة من المستوى ١ بالموجة المنعكسة من المستوى ٢، ينبغي أن يكونَ فارقُ المسار Γ بين الشعاعين مساوياً لـ: $\Gamma = \text{ك ب} + \text{ب ح} = \lambda$ ، أو أن يكونَ مضاعفاً من مضاعفات λ :

$$\Gamma = n\lambda, n = 0, 1, 2, 3, \dots; \text{ لكنْ جا } \theta = \frac{\text{ك ب}}{\text{أ}}, \text{ ك ب} = \text{ب ح} = \text{أ جا } \theta.$$

ولذلكَ فلكي يتمّ الحصولُ على نهايةٍ عظمى، ينبغي أن يكونَ فارقُ المسار Γ (حيث $\Gamma = 2 \text{ أ جا } \theta$) مضاعفاً صحيحاً للطول الموجي، أي أن:-

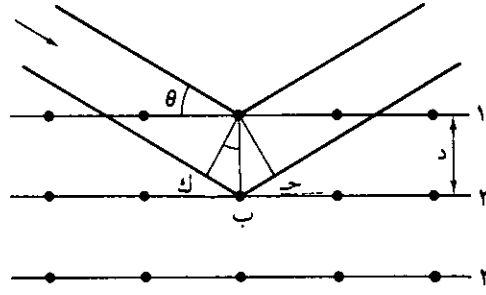
[١١-٧:٢]

$$2 \text{ أ جا } \theta = n\lambda \dots\dots$$

وهذه المعادلة هي قانونُ براج **. وتصحّ العلاقة نفسها أيضاً عندما تنفذ الأشعة السينية من البلورة بدلَ انعكاسها عنها كما في الشكل ١٣.

+ تقاس الزاوية لسوء الحظ في تخطيط البلورات بالأشعة السينية من السطح لا من العمود المقام على السطح، كما هو في مواضع أخرى من علم البصريات.

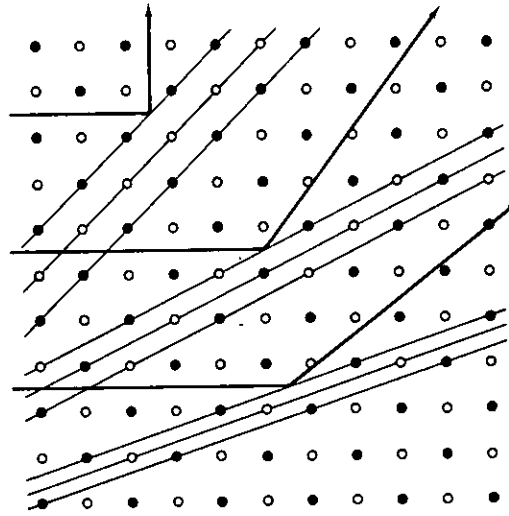
** نسبةً إلى وليم هنري براج William Henry Bragg (١٨٦٢-١٩٤٢): الفيزيائي البريطاني الذي تقاسم جائزة نوبل عام ١٩١٥ مع ابنه السير جون وليم لورنس براج: «انعكاس الأشعة السينية عن البلورة» محاضر جلسات الجمعية العلمية الملكية. Proc. Roy. Soc. لندن ١٨٨ (١٩١٣)،



الشكل ١١ : اشتقاق قانون براغ

الشبكات البلورية Crystal lattices

تعتمد شدة البقع في شكل لاو على كثافة الذرات في مجموعة من مستويات الشبكية. تخيل بلورة مؤلفة من مراكز تشتت منفردة. لقد اشتققنا قبل قليل قانون براغ باستخدام مستويات شبكية موازية للسطح. ولكن كما هو واضح يُقدّر المرء أيضاً على أن يستخدم مستويات في اتجاهات أخرى. ويظهر الشكل ١٢ ثلاثة من هذه المستويات، ولا تختلف هذه المستويات فحسب في ميلها وإنما أيضاً بعدد مراكز التشتت التي تحتويها لكل وحدة مساحة أي بكثافة الذرات في مجتمعتها. وتتناسب تلك الكثافة طردياً مع شدة البقعة المناظرة في شكل لاو.



الشكل ١٢ : ثلاث مجموعات من المستويات الشبكية في بلورة والانعكاسات عنها .

وَيُمْكِنُ وَصْفُ اتِّجَاهٍ أَوْ مَيَلٍ أَيْ مَسْتَوًى شَبَكِيٍّ بِالْبَارَامَتَرَاتِ هـ، كـ، ل التي تَعْرِفُ بِمُعَامَلَاتِ مِلَرِ Miller indice's. وَتَكُونُ الْمَسَافَةُ بَيْنَ أَيْ مَسْتَوَيْنِ إِذَا هـ كـ . وَمُعَامَلَاتُ مِلَرِ أَعْدَادٌ صَحِيحَةٌ تَمَثِّلُ مَقْلُوبَاتِ الْأَجْزَاءِ الْمَقْطُوعَةِ بِالْمَسْتَوًى مِنَ الْمَحَاوِيرِ س، ص، ع. وَهَكَذَا فَإِنَّ (٠٠١) تَغْنِي مَسْتَوًى قُطِعَ بِالْمَحْوَرِ السِّينِيِّ مَرَّةً وَاحِدَةً وَهُوَ مُوَازٍ لِلْمَحْوَرَيْنِ ص، ع. وَيُمْكِنُ تَفْسِيرُ التَّعَابِيرِ (١٠٠)، (١٠١)، (١٠٢) ... الخ بِصُورَةٍ مِمَّا ثَلَّةُ.

وَمِنَ السَّهْلِ أَنْ تَرَى أَنَّهُ يُمْكِنُ تَمَثِيلُ الْمَسْتَوًى بِخَطِّ يَقَامُ عَمُودِيًّا عَلَيْهِ، فَاتِّجَاهُ هَذَا الْعَمُودِ فِي الْفَرَاغِ يَصِفُ اتِّجَاهَ الْمَسْتَوًى. وَفِي تَخْطِيطِ الْبُلُورَاتِ بِالْأَشْعَةِ السِّينِيَّةِ يُفْتَرَضُ عَادَةً أَنَّ طَوْلَ هَذَا الْعَمُودِ يَتَنَاسَبُ عَكْسِيًّا مَعَ الْمَسَافَةِ بَيْنَ الْمَسْتَوِيَّاتِ مِنْ اتِّجَاهٍ وَاحِدٍ. وَيُسَمَّى طَوْلُ الْعَمُودِ «الْمَتَجَّةُ الشَّبَكِيَّ الْمَقْلُوبُ» كـ هـ كـ reciprocal lattice vector، وَهُوَ يُعْطَى بِالْمَعَادِلَةِ التَّالِيَةِ:

$$\text{كـ هـ كـ} = \frac{\lambda}{\text{أ هـ كـ}} \dots\dots [١٢-٧:٢]$$

وَفِي الْفَرَاغِ ثَلَاثِيَّ الْأَبْعَادِ، وَبِاسْتِخْدَامِ مُعَامَلَاتِ مِلَرِ يُمْكِنُ وَصْفُ هَيْئَةِ الشَّبَكِيَّةِ أَوْ تَرْتِيبِهَا بِثَلَاثَةِ مَتَجَهَاتٍ شَبَكِيَّةٍ مَقْلُوبَةٍ :-

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{\dots \text{أ} \dots} &= \dots = ١ \\ \dots\dots \frac{\lambda}{\dots \text{أ} \dots} &= \dots = ٢ \\ \frac{\lambda}{\dots \text{أ} \dots} &= \dots = ٣ \end{aligned}$$

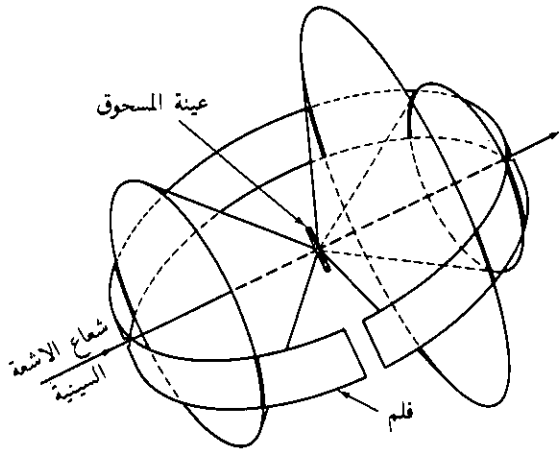
[١٣-٧:٢]

حِيُودُ الْأَشْعَةِ السِّينِيَّةِ تَجْرِيْبِيًّا

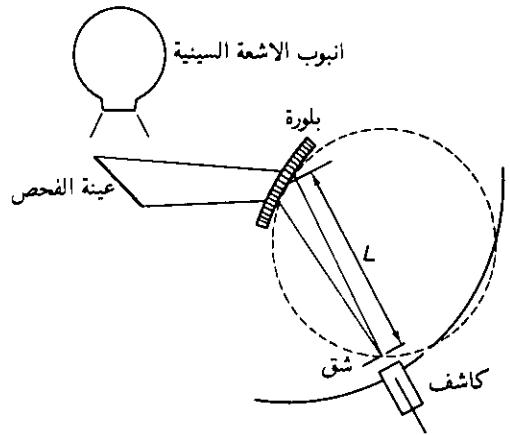
يُمْكِنُ الْحَصُولُ عَمَلِيًّا عَلَى حِيُودِ الْأَشْعَةِ السِّينِيَّةِ بِطَرِائِقَ عَدَّةٍ. فَفِي طَرِيقَةِ لَاوِ الْأَصْلِيَّةِ تَسْقُطُ الْأَشْعَةُ السِّينِيَّةُ غَيْرُ الْمُتَجَانِسَةِ أَوْ «الْبَيْضَاءِ» عَلَى بُلُورَةٍ مُسْتَقَرَّةٍ مُفْرَدَةٍ. وَتَحْدُثُ الْإِنْعِكَاسَاتُ عِنْدَمَا يَخْتَارُ كُلُّ مَسْتَوًى شَبَكِيٍّ طَوْلًا مُوجِبًا يَشْتَوِي قَانُونُ بُرَاجٍ.

وهكذا يتكوّن شكلٌ لاؤ من نسقٍ مُتماثلٍ من البقع: كلُّ بقعةٍ منها تناظرُ مجموعةٍ واحدةٍ من المستويات ذات الاتجاه المحدد. ومن المحتمل أن تتكوّن البقع المختلفة بالأشعة السينية ذات الأطوال الموجية المختلفة.

وفي طريقة براج تهتز بلورة مفردة إلى الأمام وإلى الخلف في مجرى حزمة من الأشعة السينية أحادية الطول الموجي مكونةً بذلك نمطاً واحداً من مجموعةٍ واحدةٍ فقط من المستويات في الوقت الواحد. ويكون الكاشف عادةً عبارة عن عداد جيجر أو عداد أيماض Scintillation Counter - الشكل ١٣. وفي طريقة المسحوق أو طريقة دبائي - شيرز - هل Debye-Scherrer-Hull، تُختزل المادة البلورية إلى مسحوق، ثم تلصق كمية قليلة منه بالصمغ إلى ليف زجاجي يدور في مجرى حزمة من الأشعة السينية أحادية الطول الموجي. إنَّ كلاً من البلورات الصغيرة الموجودة في المسحوق تُغطي بُقعاً على فيلم مثني حول عينة المسحوق. ولأنَّ البلورات الصغيرة موزعة عشوائياً، فإنَّ البقع المفردة تلتحم معاً وتشكّل مخروطات من الأشعة المنعكسة تُظهر على الفيلم مثل مُتسلسلةٍ من الأقواس - الشكل ١٤. وإذا ما أدمجت ذرة أو أكثر ذات وزن ذري عالٍ في جزيء يتألف عادةً من ذرات ذات وزن ذري صغير، يتغيّر نمط الحيود للأشعة السينية بكيفية متميزة. وتُسمى هذه الطريقة الاستبدال المُتبادل isomorphous replacement، وقد أصبحت هذه الطريقة إحدى أقوى الأدوات في علم الأحياء الحديث، حيث أعانت على الكشف عن بنية الهيموجلوبين وعن جزيئات أحيائية هامة أخرى.



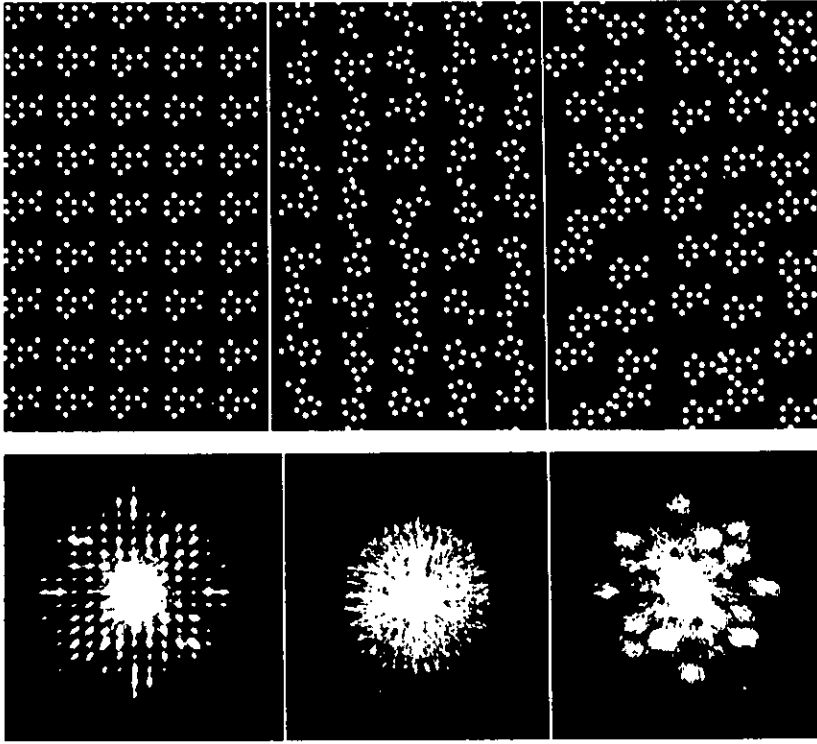
الشكل ١٤ : طريقة المسحوق للحصول على حيود الاشعة السينية.



الشكل ١٣ : حيود الأشعة السينية بطريقة النفاذ: الأشعة السينية المحيطة وفقاً لقانون براج تُركّز بواسطة بلورة محنية في شق أمام الكاشف.

المماثلات البصرية Optical Analogs

يمكنُ مقارنة أنماط حيود الأشعة السينية بالنماذج البصرية الضوئية. تَحْيَلُ متسلسلة من الثقوب في ستارة معتمة مرتبة كترتيب الذرات في جزيء البنزين * . ولأن نمط الحيود المكوّن بوحدّة مفردة من النوع المشار إليه ضعيفٌ إلى درجة لا يمكنُ مشاهدته بسهولة، عُمِلَتْ ١٠٠ وُحْدَةٌ من نفس النوع وَرُتِبَتْ في عشرة أعمدة: كُلُّ عمودٍ منها يحوي عَشْرَ وُحْدَاتٍ. فإذا اختزلت هذه الهيئَةُ فوتوغرافياً، ثم عُرِضَتْ لحيود فرونفور، فإن نمط الحيود الحاصل يُشَبِّهُ إلى درجة كبيرة شَكْلَ بُرَاجٍ. وإذا كانت الوُحْدَاتُ منتظمةً في اتجاهها، فإن الأنماط من كُلِّ منها تتراكبُ، وتمثلُ النتيجة الحاصلة الشبيكة المقلوبة لهذه الوحدات - الشكل ١٥ إلى



الشكل ١٥: الوحدات (إلى الأعلى) وأنماط حيود فرونفور لها (إلى الأسفل). من اليسار إلى اليمين: الوحدات في هيئة منتظمة، الوحدات في اتجاهات عشوائية، والوحدات لها توزيع عشوائي منتظم الاتجاه. [استنسخت باذن من ج. ر. ماير - أرندت J. R. Meyer-Arendt و ج. ك. وُود J. K. Wood، مجلة الفيزياء الأمريكية Am. J. physics ٢٩ (١٩٦١)، ٣٤٢].

* وبصورة أدق، صُنِعت الوُحْدَاتُ المشار إليها لنسبة الأيسومر (المتجاذبي) الأحمر لمادة الأثير الكيل ثيوفونيل التي هي حلقة بنزين يرتبط بها من الجانب السلسلة $\text{OCH}_3 - \text{N} = \text{O}$.

اليسار. وتكون المسافات في نمط الحيود متناسبة عكسياً مع أبعاد الشبكية الأصلية، وهو السبب الذي لأجله سُمِّي نمط الحيود بالشبكية المقلوبة. أما إذا كانت الوحدات عشوائية الاتجاه، فإن نمط الحيود يشبه شكل الأشعة السينية الحاصل بطريقة المسحوق - الرسم في الوسط. لكن إذا كانت الوحدات موزعة عشوائياً ومنتظمة الاتجاه إلى اليمين، فإن النتيجة الحاصلة هي تقريباً نفس النتيجة التي يُحصل عليها من الهئية الأولى. ومع أن بعض التفاصيل قد ضاعت في الشبكية المقلوبة إلا أن الملامح الأساسية للتمطين تظل واحدة+.

أهداب مُواري Moire Fringes

عندما يتراكب مُشبران لهما فراغات بينية من نفس المقدار، فإن نقاط تقاطع خطوطهما تُحدّد نسقاً آخر متكرراً من الخطوط يعرف بأهداب مُواري. وتُرى هذه الأهداب عند النظر على سبيل المثال إلى خلفية ضوئية عبر ستارتين سلكيتين. وتحتوي المشبكات المستخدمة لإظهار ظاهرة مُواري عادة على عدد قليل من الخطوط للملمتر الواحد يقل بكثير عن عددها في مخزوز الحيود. وبذلك لا يلزم في هذه الحال اعتبار الخصائص الموجية للضوء. إذ يكون التحليل هندسياً تماماً.

تَحَيَّل مُشَبَكَيْن: المسافة بين أي خطين فيهما أ و آ على الترتيب، وضعا متراكبين على بعضهما بعضاً بحيث يَعْمَل أحدهما مع الآخر زاوية θ . فتتكوّن أهداب مُواري التي يَنفَصِلُ بعضها عن بعض مسافة ه - الشكل ١٦. انظر إلى متوازي المستطيلات س ص ع ل، فمساحته تُعطى ب:

$$ح = (س ل) (ه) = (ع ل) (أ) = (ص ل) (آ) \dots [١٤-٧:٢]$$

ومن قانون جيب التمام، نحصل على:-

†J. R. Meyer-Arendt and J. K. Wood, "Light-Optical Analogs of X-Ray Diffraction Patterns," *Am. J. Physics* 29 (1961), 341-44.

*Y. Nishijima and G. Oster, "Moiré Patterns: Their Application to Refractive Index and Refractive Index Gradient Measurements," *J. Opt. Soc. Am.* 54 (1964), 1-5. G. Oster, M. Wasserman, C. Zwerling, "Theoretical Interpretation of Moiré Patterns," *J. Opt. Soc. Am.* 54 (1964), 169-75. M. Stecher, "The Moiré Phenomenon," *Am. J. Physics* 32 (1964), 247-57.

$$-(صع)^2 = (سل)^2 = (صل)^2 + (عل)^2 -$$

$$[١٥-٧:٢] \quad ٢(صل)(عل) \text{ جتا } \theta \dots\dots$$

وبإعادة ترتيب الحدود وقسمة المعادلة [١٥-٧:٢] على [١٤-٧:٢]، نَحْصَلُ على :-

$$\frac{١}{٢هـ} = \frac{١}{٢أ} + \frac{١}{٢ب} - \frac{٢}{٢ب} \text{ جتا } \theta \text{ ، أي:}$$

$$[١٦-٧:٢] \quad \dots\dots هـ = \frac{أ}{\sqrt{٢ب + ٢أ - ٢أ \text{ جتا } \theta}}$$

وعندما تكون θ صغيرة، فإنَّ جتا $\theta \approx ١$ ، وَنَحْصَلُ على :-

$$[١٧-٧:٢] \quad \dots\dots هـ = \frac{أ}{|أ - ب|}$$

وهكذا، فَكُلَّمَا زَادَ التشابهُ بين المُشَبَّكَيْنِ زادت المسافةُ الفاصلةُ بَيْنَ أَهْدَابِ مُوَارِي. وإذا كانت $أ = أ' \text{ نجدُ أن: } -$

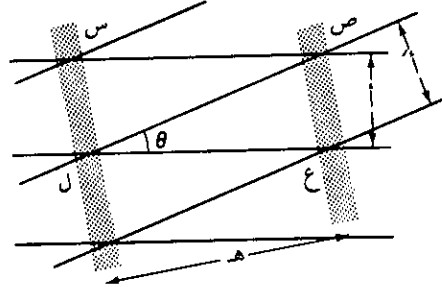
$$هـ = \frac{أ}{\sqrt{٢ - ١ \text{ جتا } \theta}} \text{ ، أي أن: } -$$

$$[١٨-٧:٢] \quad \dots\dots هـ = \frac{أ}{٢ \text{ جا } \frac{\theta}{٢}}$$

$$\text{لأنَّ جا } \frac{\theta}{٢} = \frac{\sqrt{١ - \text{جتا } \theta}}{٢}$$

ولأهدابِ مُوَارِي تطبيقاتٌ علميةٌ هامةٌ فضلاً عن كونها فُضُولاً جَمَالِيّاً وموضوعاً محبباً في قَرْنِ البصريّاتِ، فهي تَسْمَحُ بإجراء قياساتٍ دقيقةٍ جدّاً للمسافاتِ الخطيّةِ والزائِيةِ، وهي مفيدةٌ أيضاً للكشِفِ عن التغيراتِ الطفيفةِ جداً في السمكِ البصريِّ مِنّا يُمَكِّنُ من

فَقَصِّ المِرايا والعدساتِ وَدراسةِ التراكيبِ الصغيرةِ جدا التي لا يمكنُ تَبَيُّنُها حتى بالميكروسكوبِ الإلكترونيّ.



الشكل ١٦ : اشتقاق معادلة أهذاب مُواري

اقتراحات لقراءات إضافية

- D. Richardson, "Diffraction Gratings," *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. V, ed. R. Kingslake. (New York and London: Academic Press, Inc., 1969), Part II, 17-46.
- R. J. Meltzer, "Spectrographs and Monochromators," *Ibid.*, pages 47-84.
- S. P. Davis, *Diffraction Grating Spectrographs* (New York: Holt, Rinehart & Winston, Inc., 1970).
- B. D. Cullity, *Elements of X-Ray Diffraction* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., Inc, 1956).
- Sir Lawrence Bragg, "X-Ray Crystallography," *Scientific American* **219** (July 1968), 58-70.
- G. Oster and Y. Nishijima, "Moiré Patterns," *Scientific American* **208** (May 1963), 54-63.
- G. Oster, "Optical Art," *Applied Optics* **4** (1965), 1359-69.

المسائل

- ١-٧:٢ استخدم محزور مع ضوء طوله الموجي ٦٠٠ نـم. فإذا كان الضوء المحيّد من الرتبة الثانية يعمل زاوية ٤٥° مع المحور، فكّمْ عدد الخطوط التي يحتوي عليها المحزور لكلّ وحدة عرض؟
- ٢-٧:٢ ضوء يحتوي على طولين موجيين: ٦٠٠ نـم و ٦١٠ نـم، حيّد بمحزور مستو عدد خطوطه ٥٠٠٠ خط للمستمر الواحد. فإذا استخدمت عدسة بعدها البؤري ٢ م لتركز الضوء على ستارة، فجد المسافة بين الخطين المكونين بالطولين الموجيين عند الرتبة الأولى وعند الرتبة الثالثة.
- ٣-٧:٢ حزمة ضوئية متوازية تحتوي على طولين موجيين: ٤٥٠ نـم، ٦٥٠ نـم تسقط عمودياً على محزور نفاذ مستو ثابتته ٠,١٢ م. جد البعد البؤري لعدسة وضعت قريبة من المحزور إذا كان عرض الطيف من الرتبة الأولى المتكون في المستوى البؤري لها يساوي ٢ سم.
- ٤-٧:٢ يحتوي طيف الزئبق على خط أزرق $\lambda = 435,8$ نـم وخط أصفر $\lambda = 579,1$ نـم. فإذا استخدم محزور عدد خطوطه ٤٥٠ للملتر الواحد، فما أقل رتبة يكون فيها مقدار الفصل الزاوي بين الخطين مساوياً ٥°؟
- ٥-٧:٢ أطولان الموجيان للخط الثنائي D من طيف الصوديوم هما ٥٨٩,٦، ٥٨٩ نـم. فإذا حوّل محزور حيود ليصبح متوهجاً وليستخدم أحسن ما يكون عند الرتبة الثانية، فجد الحد الأدنى من عدد الخطوط التي ينبغي أن يحتوي عليها المحزور لتبين هذا الخط الثنائي.
- ٦-٧:٢ جد المسافة الأقل $\Delta \lambda$ في طيف ما التي يمكن تمييزها قرب الطول الموجي ٦٤٠ نـم عند الرتبة الثانية باستخدام محزور عرضه ٥ سم وعدد خطوطه ٤٥٠ خط/م.
- ٧-٧:٢ المسافة بين خطي D في طيف الصوديوم هي ٦ أنجستروم. فإذا لم يُتَح لنا إلا محزور عدد خطوطه ٤٠٠ فجد: (أ) الرتبة الدنيا التي يمكن عندها تبيين الخطين (ب) عرض المحزور؟

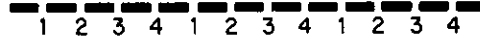
٨-٧:٢ بين كيف يتغير الطيف الحاصل من محزوز عند تثنيّ البارامترات الأخرى
عندما: (أ) يُزاد عدد الشقوق (ب) تنقص المسافة بين الشقين (ج) يزداد عرض
الشقوق.

٩-٧:٢ جد أقل عدد من الخطوط يلزم أن يكون لمحزوز ليتّم تبيّن الثنائي الأحمر في
طيف مزيج من الهيدروجين والديتريوم عند الرتبة الأولى، علماً أن فارق
الطول بينهما على الطول الموجي ٦٥٦ نـم هو ٨,١ أنجستروم.

١٠-٧:٢ في محزوز الحيود المبين في الشكل ١٧، رُقمت الشقوق المتتالية ١، ٢، ٣، ٤،
١، ٢، ٣، ٤، تصوّر أن المحزوز قادرٌ تماماً على تبيّن خطّي الصوديوم D
عند الرتبة الأولى ($\lambda \approx ٥٨٩$ نـم، $\Delta \lambda = ٦$ أنجستروم).

(أ) ماذا يحدث عند سدّ الشقوق ٢، ٣، ٤.

(ب) إذا سُدّت الشقوق ٢، ٣، ٤ فعلى أيّ طول موجي في الرتبة الأولى يمكن
تبيّن $\Delta \lambda = ٦$ أنجستروم.



الشكل ١٧

(ج) إذا سُدّ الشقان ٢، ٤ فجد قدرة التبيّن على الطول الموجي ٤٠٠ نـم.

١١-٧:٢ حُدثت أشعة سينية طولها ١,٣ أنجستروم بمطياف بُراج المبين في الشكل ١٣
بزوايا مقدارها ٢٢° عند الرتبة الأولى. جد المسافة بين أيّ مستويين في
البلورة.

١٢-٧:٢ المسافة بين أيّ مستويين في بلورة كالتسيت Calcite هي ٣,٠٣ أنجستروم. جد
الطول الموجي للأشعة السينية التي تنعكس بزوايا ٢٣° عند الرتبة الأولى.

١٣-٧:٢ جد الزوايا التي تَمَسُّ فيها الأشعة السينية الوجه المصقول لبلورة من ملح
الصخر (أ= ٢,٨ أنجستروم) والتي تناظر النهايات العظمى من الربتين
الأولى والثانية، علماً بأنّ الطول الموجي للأشعة السينية هو ١,٤٤ أنجستروم.

١٤-٧:٢ وُضِعَ مُشَبَّكَانِ مُتَمَاثِلَانِ فَوْقَ بَعْضِهِمَا: كُلُّ مِنْهُمَا يَحْتَوِي عِدداً قَلِيلاً مِنْ
الْخُطُوطِ لِكُلِّ وَحْدَةٍ عَرَضٍ، بِحَيْثُ يُمْكِنُ مَعَهُ إِهْمَالُ تَأْثِيرَاتِ الْحُبُودِ. فَمَا
الْمَسَافَةُ الزَاوِيَّةُ الَّتِي يَجِبُ أَنْ تَكُونَ بَيْنَ الْمُشَبَّكَيْنِ بِحَيْثُ تَظْهَرُ أَهْدَابُ مُوَارِي
بِمَسَافَةٍ فَاصِلَةٍ بَيْنَ أَيِّ اثْنَيْنِ مِنْهَا تَبْلُغُ ضِعْفَ الْمَسَافَةِ بَيْنَ أَيِّ خَطَّيْنِ فِي أَيِّ مِنْ
الْمُشَبَّكَيْنِ. جَدَ الزَاوِيَّةُ الَّتِي تَلْزُمُ لِمُنتَاجِ أَهْدَابِ الْمَسَافَةِ بَيْنَهَا (١٠) أَمْثَالِ
الْمَسَافَةِ بَيْنَ أَيِّ خَطَّيْنِ فِي أَيِّ مِنَ الْمُشَبَّكَيْنِ.

الفصل ٢ : ٨

تداخل الانعكاس المتعدد

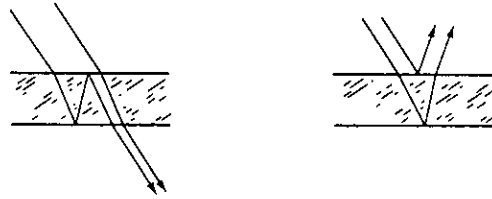
Multiple Reflection Interference

نبحث في هذا الفصل عدة ظواهر تداخلية تتميز جميعها بحدوث انعكاسات متعددة أو بوجود أكثر من حزمتين ضوئيتين لإحداث التداخل.

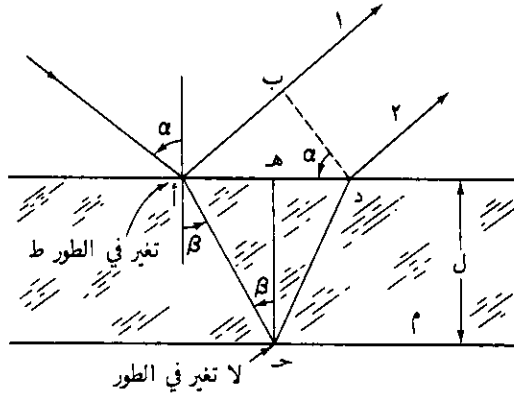
ألشرايح متوازية المستويات Plane-Parallel Plates

يعاني الضوء الساقط على سطحين متوازيين من الانعكاس المتعدد الذي يؤدي إلى التداخل. ويمكن رؤية هذا التداخل في الضوء النافذ مِنْهُمَا أو في الجزء المنعكس عنهما - الشكل ١.

نتناول أولاً حالة الانعكاس، ونشتق شروط التداخل مُستخدمين مثلاً أعطاه فريزل. لنفترض أن الضوء يسقط على شريحة ذات وجهين مستويين متوازيين عند النقطة أ. إن بعض الضوء ينعكس إلى النقطة ب - الشكل ٢، كما أن بعضه الآخر ينعكس في الشريحة و ينعكس عند ح، ويخرج من د مستمراً في نفس اتجاه الشعاع الساقط ابتداءً. وينطبق هذان الجزءان مُحدّثين تداخلاً.



الشكل ١ : التداخل من شريحة متوازية الوجهين المستويين كما يُرى في الضوء النافذ (إلى اليسار) والضوء المنعكس (إلى اليمين).



الشكل ٢ : اشتقاق شروط التداخل من شريحة متوازية الوجهين المستويين .

وفي حالة السقوط العمودي، يكونُ فارقُ المسارِ L بين هذين الجزئين المنعكسين ضعفتْ سُمْكُ الشريحة :-

$$[١-٨:٢] \quad \Gamma_1 = 2L \quad \dots\dots$$

أما في حالة السقوط المائل، فيكونُ فارقُ المسارِ على النحو التالي :-

$$\Gamma_1 = m (أح + حد) - أب$$

ومن الرسم نجدُ أنَّ :-

$$\frac{أب}{أه٢} = \alpha \text{ جا} ; \frac{أه٢}{L} = \beta \text{ ظا} ; \frac{L}{\beta \text{ جتا}} = حد = أح$$

ويتبعُ من ذلك أنَّ :-

$$[٢-٨:٢] \quad \Gamma_1 = 2m أح - 2أه جا \alpha - \frac{L}{\beta \text{ جتا}} = 2L \text{ ظا } \beta \text{ جا} \quad \dots\dots$$

وَمِنْ قانونِ شينل نجدُ أنَّ :

$$[٣-٨:٢] \quad \text{جا } \alpha = \text{جا } \beta \quad \dots\dots$$

وبذلك نَحْصِلُ على :-

$$\Gamma_1 = \frac{L}{\beta \text{ جتا}} - 2L \text{ ظا } (\beta \text{ جا}) = 2L \left(\frac{1}{\beta \text{ جتا}} - \text{ظا } \beta \text{ جا} \right)$$

$$= 2L \left(\frac{1 - \beta^2 \text{ جا}^2}{\beta \text{ جتا}} \right) ;$$

$$\text{ولأنَّ : } 1 - \beta^2 \text{ جا}^2 = \beta^2 \text{ جتا}^2$$

فإنَّ:

[٤-٨:٢]

$$\Gamma_{\lambda} = 2 \text{ م ل جتا } \beta \dots\dots$$

وهو فارق المسار بين الشعاعين ١ و ٢.

وإذا كان فارق المسار مضاعفاً صحيحاً للطول الموجي ، فإننا نتوقع رؤية نهايات التداخل العظمى. إلا أنَّ الأمر على خلاف ذلك، إذ أنَّ هنالك تغيراً في الطور مقداره ط زاوية نصف قطرية (أو $\frac{\lambda}{4}$) يحدث عند السطح الفاصل بين الهواء والزجاج (الجزء العلوي) ولَيْسَ عند السطح الفاصل بين الزجاج والهواء (الجزء السفلي). وعند أخذ هذا التغير في الطور بالاعتبار، فإنَّ نهايات التداخل الصغرى تحدث كلما كان:-

[٥-٨:٢]

$$\dots\dots 000, 3, 2, 1 = \text{ن}$$

$$\Gamma_{\lambda} = 2 \text{ م ل جتا } \beta \text{ ن} = \lambda$$

وعلى عكس ذلك تحدث النهايات العظمى كلما كان:-

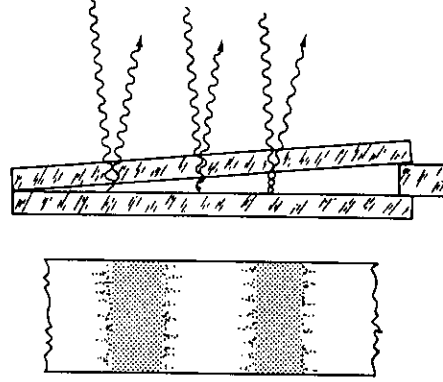
[٦-٨:٢]

$$\dots\dots$$

$$2 \text{ م ل جتا } \beta = \left(\text{ن} - \frac{1}{4} \right) \lambda$$

وتبعاً للكمية في المعادلة [٥-٨:٢] التي نفترض تغييرها، فإنَّ أهداً من أنواع مختلفة تحدث، فعند تغيير الطول الموجي تحدث النهايات الصغرى لبعض الأطوال الموجية دون غيرها. وتسمى الأهداب الناتجة هذه بالأهداب ذات الرتبة اللونية المتساوية Fringes of Equal Chromatic Order أو FECO اختصاراً. ومن جهة أخرى فإذا ثبت الطول الموجي وتغيرت الكمية ل تكون الأهداب الناتجة من نوع فيزو Fizeau. وتحدث هذه الأهداب على سبيل المثال بين سطحين لا يلزم توازيهما ضرورة. وعندما يأتي الضوء من مصدر ممتد ويسقط عمودياً تقريباً على سطح الشريحة، فإنَّ قيمة جيب التمام في المعادلتين [٥-٨:٢]، [٦-٨:٢] تقترب من ١. ولذلك توجد نهايات التداخل العظمى كلما كان: $2 \text{ م ل} \approx \left(\text{ن} - \frac{1}{4} \right) \lambda$ ، أما النهايات الصغرى فتوجد كلما كان $2 \text{ م ل} \approx \text{ن} \lambda$. ولحجم مخصص بمستويين مائلين يكون السمك ثابتاً في اتجاه الخطوط الموازية لرأس هذا الحجم المحصور. وتنتج الأهداب المشاهدة هذه الخطوط وتسمى الأهداب ذات السمك المتساوي - الشكل ٣. وتغزى نطاقات بروستر Brewster's bands إلى الانعكاس من السطح الأربعة لشريحتين مائلتين على بعضهما بعضاً ميلاناً طفيفاً.

وتُظهر الأفلام الرقيقة جداً غالباً عند النظر إليها في الضوء الأبيض ألواناً ساطعة، وهي ظاهرة معروفة تماماً في فقاعات الصابون وطبقات الزيت التي تنتشر على رصيف مبلول. ويُظهر الجدول ١ بعض هذه الألوان والسُمْك المرتبط بكل منها. أما في الأفلام الثخينة فلا تكون الألوان ساطعة كما هو الحال في الأفلام الرقيقة.



الشكل أ: الأهداب ذات السُمْك المتساوي المتكونة بين شريحتين مائلتين على بعضهما بعضاً ميلانا طفيفاً.

الجدول ١: ألوان التداخل للأفلام الرقيقة (معامل الانكسار ١,٥)

أللون	سُمْك الفيلم (نم)	أللون	سُمْك الفيلم (نم)
أخضر	٢٤٠	أسود	٤٠
أبيض	٢٥٥	رمادي	٥٥
أصفر - أخضر	٢٦٠	أبيض	١٠٠
أصفر	٢٨٠	أصفر	١٣٠
برتقالي	٣٠٠	بني	١٥٠
برتقالي - بني	٣٣٠	أرجواني - أحمر	١٧٥
بنفسجي - أحمر	٣٦٠	بنفسجي	١٩٠
		أزرق	٢١٠

مقياس تداخل فبري — بيرو The Fabry-Perot Interferometer

يُشكلُ التداخلُ بالانعكاسِ المتعددِ - كما يُرى في الضوءِ النافذِ - الأساسَ الذي يقومُ عليه مقياسُ تداخلِ فبري - بيرو*. وهُنا يحدثُ التغيُّرُ في الطورِ على السطحينِ الفاصلينِ بَيْنَ الهواءِ والزجاجِ. وهكذا فَشَرَطَ حدوثَ النهاياتِ العظمى هو:-

$$2L \cos \alpha = n\lambda \dots\dots [7-8:2]$$

وَتُسْتَخْدَمُ العدسةُ س في الشكلِ ٤ والتي يمكنُ أَنْ تكونَ عدسةَ العينِ لِضَمِّ الأشعةِ الصادرةِ من الشريحتين معاً لجعلها تداخل. ولقيمةٍ معينةٍ لـ α ، يتقدَّمُ الضوءُ من الرتبةِ المناظرةِ في شكلٍ محروِّطٍ مكوناً حلقاتٍ متحدة المركزِ مَرَكُزُها المحورُ البصريُّ. وَيَكُونُ للنهايةِ العظمى قُرْبُ المركزِ أعلى قيمةٍ لـ n ؛ أما النهاياتُ العظمى الأبعدُ عن المحورِ فَلَهَا رَتَبٌ أَقْلُ.

وعند اعتبار هُذُبٍ معينٍ تأخذُ α في المعادلةِ [7-8:2] قيمةً محددةً. وَمِنْ ثَمَّ تَظْهَرُ الأهدابُ في شَكْلِ دوائرٍ أو أجزاءٍ دوائرٍ مَرَكُزُها مُلتَقَى العمودِ المرسومِ من العينِ إلى السطحِ. وتُسَمَّى هذه الأهدابُ بأهدابِ هيدِنجر Haidinger**. وتَقَابِلُ هذه الأهدابُ الأهدابَ الدائريةَ في مقياسِ تداخلِ ميكلسون. وَيَلْزَمُ كَمَا في مقياسِ ميكلسون استخدامُ مصدرٍ ممتدٍّ لرؤية الأهدابِ تلك. وَبَيْنَمَا تَظْهَرُ الأهدابُ في الأفلامِ الرقيقةِ متموضعةً داخلَ الفيلمِ إلا أَنَّهُ يَجِبُ في مقياسِ تداخلِ فبري-بيرو تركيزُ العينِ أو التلسكوبِ الذي يُسْتَخْدَمُ مكانَها على مالا نهايةٍ لأنَّ الأهدابَ تَظْهَرُ هُناكَ فِعْلاً.

ويحتوي مقياسُ تداخلِ فبري-بيرو الأصليُّ على شَرِيحَتَيْنِ زجاجيتينِ طَلَّيتاهما العاكستانِ متقابلتان. وَيُمْكِنُ تحريكُ إحدى الشريحتين تماماً كما تُحَرِّكُ إحدى المرأتينِ في مقياسِ تداخلِ ميكلسون. وَقَدْ وُجِدَ أَنَّ الشريحةَ المتحركةَ لا يمكنُ الاحتفاظَ بها تماماً موازيةً للشريحةِ الأخرى، ولذلك استعِضَ عنها بِشَرَاخٍ: المسافاتُ الفاصلةُ بَيْنَها ثابتةٌ، وتُسَمَّى إِتْلوناتِ etalons.

* اخترعَ هذا المقياسَ عامَ ١٨٩٧ شارلُ فبري (١٨٦٧-١٩٤٥): عالِمُ البصرياتِ الفرنسي وزميله ألفريدُ بيرو.

** نسبةً إلى و. ك. هيدِنجر (١٨٧١-١٨٩٥): عالمُ المعادن والفيزيائي النمساوي، ومديرِ المركزِ الجيولوجي الإمبراطوري في فينا.

وَيَمْتَازُ مَقْيَاسُ تَدَاخُلِ فَبْرِي-بِيرُو عَنْ مَقْيَاسِ مِيكَلْسُونِ فِي أَنَّ قُدْرَتَهُ عَلَى التَّبْيِينِ اللَّوْنِيِّ أَعْلَى. وَ يَتَّبِعُ هَذَا مَبَاشَرَةً مِنْ حَقِيقَةِ كَوْنِ الْأَهْدَابِ (فِي حَالَةِ ظَلْيِ الْوَجْهَيْنِ) أَرْفَعَ. وَلَفْهَمِ ذَلِكَ، أَعْتَبِرْ مَرَّةً أُخْرَى الْمَعَادِلَةَ [٧-٨:٢] الَّتِي تَصِفُ مَوَاقِعَ النِّهَايَاتِ الْعُظْمَى. فَلَا يَجَادِ مُعَدِّلُ التَّغْيِيرِ فِي الطَّوْلِ الْمَوْجِيِّ، يُوْخَذُ تَفَاضُلُ الْمَعَادِلَةِ [٧-٨:٢]⁺ بِالنِّسْبَةِ لِـ α ؛ وَبِذَلِكَ نَحْصُلُ عَلَى:-

$$\frac{\lambda}{\alpha} = \frac{L^2}{n} \text{ جتا } \alpha.$$

وَلِلْأَشْعَةِ الْمَحَازِيَةِ لِلْمَحْوَرِ وَلِلتَّغْيِيرَاتِ الصَّغِيرَةِ $\Delta \lambda$ ، $\Delta \alpha$ ، نَجِدُ أَنَّ:-

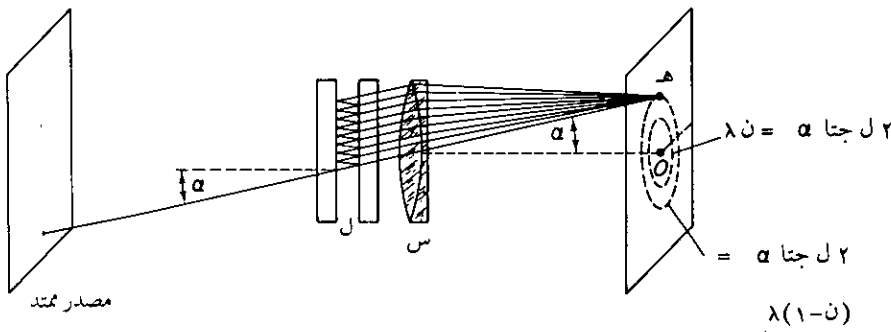
$$\Delta \lambda = \frac{L^2}{n} \Delta \alpha \text{ [٨-٨:٢]}$$

وَلَا يَتَرْتَّبُ عَلَى الْإِشَارَةِ السَّالِبَةِ فِي الْمَعَادِلَةِ الْأَخِيرَةِ أَيَّةُ نَتِيجَةٍ، فَإِشَارَةُ الْمَقْدَارِ $\Delta \lambda$ أَمْرٌ غَيْرُ ذِي شَأْنٍ.

كَذَلِكَ إِذَا كَانَتْ α صَغِيرَةً، فَإِنَّ:-

جتا $\alpha \approx 1$ ، وَيَكُونُ لِذَلِكَ:-

$$\lambda n \approx L^2 \text{ [٩-٨:٢]}$$



الشكل ٤: مقياس تداخل فبري - بيري

ونَجِدُ لِلْهَدَبِ الْمَجَاوِرِ الْأَكْبَرِ التَّالِي أَنَّ:-

[†]Following C. L. Andrews, *Optics of the Electromagnetic Spectrum* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1960), 192-93.

[١٠-٨:٢]

$$\lambda(1-n) \approx \left(\frac{\alpha}{2} - 1\right) L$$

وَبَطْرَحِ الْمَعَادِلَةِ [٩-٨:٢] مِنْ [١٠-٨:٢]، نَحْصُلُ عَلَى :-

[١١-٨:٢]

$$\lambda = \alpha L$$

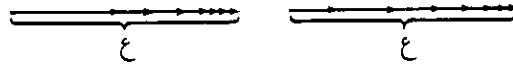
وَبَقْسَمَةِ الْمَعَادِلَةِ [١١-٨:٢] عَلَى [٨-٨:٢]، نَحْصُلُ عَلَى :-

[١٢-٨:٢]

$$\dots\dots \frac{\alpha}{\Delta} \frac{n}{2} = \frac{\lambda}{\lambda \Delta}$$

وَتَرَبُّطِ الْمَعَادِلَةِ الْأَخِيرَةِ التَّغْيِيرَ الْكُسْرِيِّ فِي الطَّوْلِ بِالتَّبْيِينِ الزَّائِغِ .

وَتَعْتَمِدُ دَرَجَةُ تَبْيِينِ الْمَسَافَاتِ الزَّائِغَةِ كَمَا هُوَ وَاضِحٌ عَلَى عَرْضِ الْأَهْدَابِ الَّتِي يَتَعَمَّدُ بِدَوْرِهِ عَلَى انْعِكَاسِيَّةِ الظِّلِّيَّةِ reflectivity . وَ يُوَضِّحُ الشَّكْلُ ٥ هَذِهِ الْعِلَاقَةَ بِالرَّسْمِ الْبَيَانِيِّ . وَنُلاحِظُ أَوَّلًا أَنَّ سَعَاتِ الانْعِكَاسَاتِ الْمُتتَالِيَةِ تَصْغُرُ تَدْرِيجًا . وَفِي حَالَةِ النِّهَايَةِ الْعَظْمَى تَتَّحِدُ الانْعِكَاسَاتُ الْمُتتَالِيَةُ فِي الطَّوْرِ، وَلَا يَكُونُ لِمُعْدِلِ النِّقْصَانِ فِي السَّعَةِ أَيُّ تَأْثِيرٍ - الشَّكْل ٥-أ . أَمَّا فِي حَالَةِ النِّهَايَةِ الصَّغْرَى فَتَخْتَلِفُ السَّعَاتُ الْمُتتَالِيَةُ فِي الطَّوْرِ بِمِقْدَارِ ١٨٠° أَوْ طَ زَاوِيَةً نِصْفَ قَطْرِيَّةٍ مِمَّا يَجْعَلُ الْمَحْصِلَةَ تَقْرِيبًا صَفْرًا - الشَّكْل ٥-ب . وَفِي حَالٍ قَرِيبَةٍ مِنَ النِّهَايَةِ الْعَظْمَى نَجِدُ بَيِّنَ أَيِّ سَعَتَيْنِ مُتتَالِيَتَيْنِ فَارَقًا فِي زَاوِيَةِ الطَّوْرِ . وَفِي الشَّكْلِ ٥-ج



(أ)



(ب)



٠,٧ = ر

(ج)

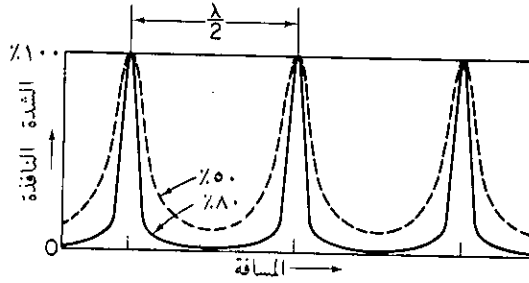


٠,٩ = ر

الشَّكْل ٥ : جَمْعُ السَّعَاتِ فِي الْحَالَاتِ التَّالِيَةِ وَلَقِيَمَتَيْنِ لِلانْعِكَاسِيَّةِ : ر = ٠,٧ ، ر = ٠,٩ :-

(أ) النِّهَايَةِ الْعَظْمَى (ب) النِّهَايَةِ الصَّغْرَى (ج) بَيْنَ النِّهَايَتَيْنِ الْعَظْمَى وَالصَّغْرَى .

افتراضنا على سبيل المثال أن فارق الطور يساوي $\frac{\lambda}{2}$ زاوية نصف قطرية. ويُعطي الجمع المتجهي حلزونا، ولكن محصلة السعة في حالة وجود انعكاسية عالية تهبط إلى قيمة أكثر انخفاضاً وبشكل ملحوظ - أُرسم إلى اليمين من الشكل ٥ ج). وبذلك يمكن القول إن الأهداب تُصبح أرفع فأزقع (الشكل ٦) عندما تزداد انعكاسية الطلية، كذلك تزداد قدرة التبيين اللوني بحسب المعادلة التالية :-



الشكل ٦ : رسم للنفاذية مقابل المسافة الفاصلة بين الشريحتين في مقياس تداخل فبري - بيرو يُبين كيف يعتمد تمايز الأهداب على الانعكاسية .

[١٣-٨:٢]

$$..... \frac{p}{2p-1} = \frac{\lambda}{\lambda \Delta}$$

حيث p معامل انعكاس فِرِنل الذي يساوي مُربَّعة الانعكاسية ($r=p$). ويمكن التعبير عن العلاقة بين المسافة الفاصلة بين الأهداب وعرضها (أي رفعها) بالتمايز ، ويُعرفُ بنسبة المسافة بين هُذَين متتالين إلى نصف عرض الهُذب . ومن الواضح أن القياسات الأكثر دقة تصبح ممكنة بارتفاع التمايز.

و يعتبرُ مقياسُ تداخل فبري - بيرو مطيافاً أكثر دقة من مقياس التداخل . ونظراً لقدرة تبيينه العالية، فهو يُستخدَم على نطاق واسع في القياس الدقيق للأطوال الموجية ، تحليل البنى الدقيقة للاطياف ، وتعرض دوبلر للخطوط الطيفية Doppler broadening . ونقدّم في الجدول ٢ قدرات التبيين لمقاييس طيف من أنواع عدة .

وإذا أمكن تغيير المسافة بين الشريحتين بسرعة نحصلُ على مقياس تداخل فبري - بيرو الماسح Scanning Interferometer . ويتم هذا التغيير بوصول إحدى الشريحتين

يُطْرَف أنبوب خَرْفِيّ مصنوع من تَيْتَنات الباريوم أو مِنْ أَيْة مَادَّةٍ كَهْرَبِيَّةٍ - ضَغْطِيَّةٍ Piezo-electric مماثِلَةٍ يَوْقَعُ عَلَيْهَا فَرْقُ جَهْدٍ (فولتية) مُتَنَاطِبٌ مِقْدَارُهُ حَوَالِي ١ كيلوفولت.

أَلْجُودُل رَقْم ٢ : مَقَارَنَةُ قُدْرَاتِ لَانَوَاعِ مُخْتَلِفَةٍ مِنْ مَقَايِيسِ الطِّيفِ

الرتبة * ن	عدد العناصر ل	$\frac{\lambda}{\lambda \Delta}$	التبين ($\lambda = \lambda$) ٥٠٠ ن.م
٤	٩٦٠٠	$٤١٠ \times ٣,٨$	٠,٠١ أنجستروم
٤٠,٠٠٠	٥٣٠	$٦١٠ \times ١,٢$	٠,٠٠٤ أنجستروم
٤٠٠,٠٠٠	٥٣٠	$٧١٠ \times ١,٢$	٠,٠٠٠٤ أنجستروم
١٠,٠٠٠	٣٦	$٥١٠ \times ٣,٦$	٠,٠١ أنجستروم

• عدد الانعكاسات

الأمواج المستقرة Standing Waves

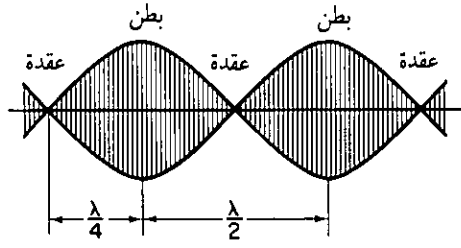
تَحْدُثُ الأمواجُ المُسْتَقَرَّةُ كُلَّمَا سَارَتْ الأمواجُ ذَاتُ الطُولِ المَوْجِيّ الوَاحِدِ، وَالسَّعَةِ الوَاحِدَةِ، وَالسَّرْعَةِ الوَاحِدَةِ فِي اتِّجَاهَيْنِ مُتَضَادَّيْنِ وَتَدَاخَلَتْ. وَمِنْ مَعَادِلَةِ الحَرَكَةِ التَّوَافِقِيَّةِ البَسِيطَةِ:-

$$ص = ع \text{ جا } (\omega \text{ ز}) \dots\dots [٢:٨-١٤]$$

يَمَكُنُ تَمَثِيلُ المَوْجَتَيْنِ السَّائِرَتَيْنِ فِي اتِّجَاهَيْنِ مُتَضَادَّيْنِ عَلَى النِّحْوِ التَّالِي:-

$$ص = ع \text{ جا } (\omega \text{ ز} - k \text{ س})$$

$$ص = ع \text{ جا } (\omega \text{ ز} + k \text{ س})$$



الشكل ٧ : لقطة لهيئة موجة مستقرة .

وبالجمع نحصلُ على :-

$$ص_{٢+١} = ع٢ جتا (k - س) جا w ز .$$

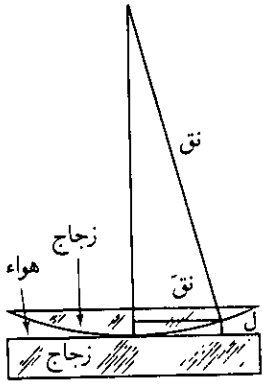
إن حاصل الجمع هو موجة جيئية أيضاً، ومع ذلك فهذه الموجة لا تتحرك فعلاً. أما أجزاء الموجة فتتحرك إلى أعلى وإلى أسفل مكونة بذلك نقاطاً لها سعة ثابتة مقدارها صفر تُسمى العقد ونقاطاً ذات سعة عالية تسمى البُطون. وتنفصل العقد عن البُطون مسافة نصف طول موجي - الشكل ٧.

وشاهد الأمواج المستقرة أول مرة ويتر Weiner * حيث ترك الضوء يسقط عمودياً على مرآة عاكسة جداً (كالزئبق) مضغوطة بإحكام على طبقة حساسة فوتوغرافية تظفو على سطحها (أي سطح المرآة). فالضوء المنعكس يرجع في نفس مساره محدثاً بالتداخل الأمواج المستقرة. وعند معالجة الطبقة الحساسة الفوتوغرافية كيميائياً، تظهر البُطون كخطافات سوداء.

حلقات نيوتن Newton's Rings

من المحتمل أن حلقات نيوتن كانت أول ظاهرة تداخل درست كمياً. وقد شاهدها في وقت مبكر في القرن السابع عشر روبرت بويل Boyle وروبرت هوك Hooke اللذان كانا يعملان باستقلال عن بعضهما بعضاً. وللحصول على حلقات نيوتن توضع عدسة محدبة مستوية ذات بُعد بؤري طويل بحيث يلامس سطحها المحدب شريحة زجاجية مستوية

* اوتو ه. ويتر (١٨٦٢-١٩٢٧): الفيزيائي الألماني.



الشكل ٨ : اشتقاق معادلة حلقات نيوتن

الوجهين. وعندما يسقط ضوء من مصدر ضوئي ممتد عمودياً تقريباً على المجموعة، تتكوّن أهداب دائرية مركزها نقطة تماس سطح العدسة بسطح الشريحة. وكما يوضح الشكل ٨، نق هو نصف قطر السطح المحدب للعدسة، نق هو نصف قطر حلقة نيوتن، ل هو سُمك الفجوة الهوائية عند الحلقة. ومن ثم فإن :-

$$نق^2 = 2(ل - نق) + نق^2$$

$$نق^2 = 2نق - 2ل + 2نق^2 = 2ل - 2نق$$

ولأن ل » نق، فإن :-

$$نق^2 \approx 2ل - 2نق$$

[١٦-٨:٢]

.....

$$\boxed{ل \approx \frac{نق^2}{2نق}}$$

وتُظهر المعادلة الأخيرة أن الحلقات الخارجية متقاربة من بعضها بعضاً أكثر من الحلقات الداخلية. وبُصِّم هذه المعادلة إلى المعادلة العامة للنهايات العظمى للأفلام الرقيقة [١٦-٨:٢]، وبافتراض أن معامل انكسار الهواء ≈ ١ وأن السقوط هو شبه عمودي، نجد أن :-

[١٧-٨:٢]

.....

$$\boxed{نق^2 \approx (ن - \frac{١}{٢}) \lambda نق}$$

وتحدث النهايات الصغرى عندما :-

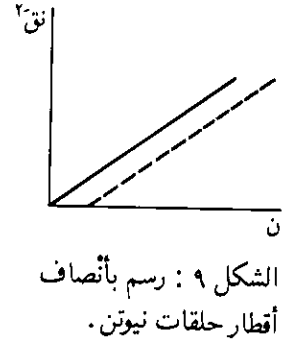
[١٨-٨:٢]

.....

$$\boxed{نق^2 \approx ن \lambda نق}$$

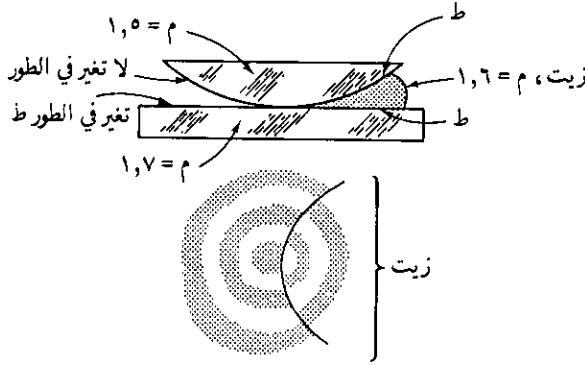
وبمعرفة λ يمكن تعيين نصف قطر تكوير السطح المحدب بقياس أنصاف أقطار الحلقات الداخلية المتكونة.

ويتبع من المعادلة [١٨-٨:٢] عندما يكون التماس بين السطحين مُتَقَنَّاً أن مربعات أنصاف أقطار النهايات الصغرى المتتالية تتناسب مع الأعداد الطبيعية أي الصحيحة الموجبة.



وَعِنْدَ رَسْمِ نَقْ٢ فِي مَقَابِلِ رَقْمِ الْحَلْقَةِ سَوَاءٍ لِلْأَهْدَابِ السَّاطِعَةِ أَوِ الْمَعْتَمَةِ نَحْصَلُ عَلَى خِطِّ مُسْتَقِيمٍ مِثْلُهُ نَقْ ٨ (الشكل ٩) يَقْطَعُ الْمَحْوَرَّ السِّينِي عِنْدَ $s = ٠$. وَلَكِنَّ التَّمَاسَّ الْمَتَقَنَّ نَادِرٌ، ذَلِكَ أَنَّ بَعْضَ دَقَائِقِ الْغَبَارِ تَكْفِي لِتُبْعَدِ سَطْحِ الْعَدْسَةِ عَنِ الشَّرِيحَةِ مَسَافَةً لَيْسَتْ غَالِبًا صَغِيرَةً نَسْبَةً إِلَى الطَّوِيلِ الْمَوْجِي . وَيَكُونُ تَأْثِيرُ التَّمَاسَّ غَيْرِ الْمَتَقَنِ هُوَ إِزَاحَةُ الْجُزْءِ الْمَقْطُوعِ مِنَ الْمَحْوَرِّ السِّينِي بِالْخِطِّ الْمُسْتَقِيمِ إِلَى الْيَمِينِ كَمَا يَبِينُ ذَلِكَ الْخِطُّ الْمَتَقَطُّ فِي الشَّكْلِ ٩ .

وَمِنَ التَّعْدِيلَاتِ الْكَثِيرَةِ فِي هَذِهِ التَّجْرِبَةِ مَا عَمِلَهُ توماس يونغ Young ، حَيْثُ تُصَنِّعُ الشَّرِيحَةُ مِنْ زُجَاجٍ مُعَامِلُ انْكَسَارِهِ أَعْلَى مِنْ مُعَامِلِ انْكَسَارِ زُجَاجِ الْعَدْسَةِ وَيُمَلَأُ جُزْءٌ مِنَ الْفَرَاغِ بَيْنَ الشَّرِيحَةِ وَالْعَدْسَةِ بِسَائِلٍ (عَادَةً زَيْتٌ) ذِي مُعَامِلِ انْكَسَارٍ مُتَوَسِّطٍ . وَالْآنَ لِأَنَّ السُّطْحَيْنِ هُمَا مِنْ نَوْعِ الْخَفِيفِ إِلَى الثَّقِيلِ (زُجَاجٍ - زَيْتٍ ، زَيْتٍ - زُجَاجٍ) ، يَحْدُثُ تَغْيِيرٌ فِي الطَّوْرِ قَدْرُهُ ط بِسَبَبِ الانْعِكَاسِ عِنْدَ كُلِّ مِنَ السُّطْحَيْنِ ، كَذَلِكَ تُغَيَّرُ الْأَهْدَابُ السَّاطِعَةُ وَالْمَعْتَمَةُ مَوَاضِعُهَا دَاخِلَ مَنْطَقَةِ السَّائِلِ - الشَّكْلِ ١٠ .

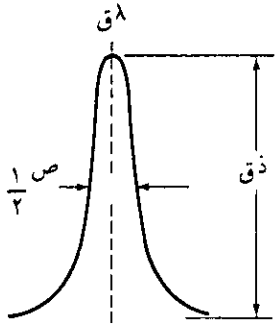


الشكل ١٠ : حلقات نيوتن عند ملء بعض الفراغ بالزيت

وَيُمْكِنُ أَيْضًا رُؤْيُهُ حَلَقَاتِ نِيوتُنٍ فِي الضَّوِّ النَّافِذِ إِلَّا أَنَّ مَغَايِرَةَ الْأَهْدَابِ تَكُونُ أَقَلَّ . وَفِي الضَّوِّ الْأَبْيَضِ تَكُونُ حَلَقَاتُ نِيوتُنٍ مَلُونَةً . وَلَقَدْ شَاهَدَ نِيوتُنُ أَنَّ الْأَهْدَابَ الْمَكُونَةَ بِالضَّوِّ الْأَحْمَرَ أَكْبَرُ مِنْ تِلْكَ الْمَكُونَةِ بِالضَّوِّ الْأَزْرَقِ . كَذَلِكَ فَإِنَّ الْأَهْدَابَ الَّتِي تُرَى فِي الضَّوِّ

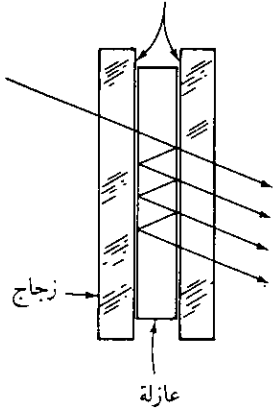
الأبيض النافذ لها ألوان متممة لتلك التي ترى في الضوء المنعكس. وعندما تتراكب مجموعتان من حلقات نيوتن تكون الأهداب المتكونة حلزونية*.

مرشحات التداخل Interference Filters



الشكل ١١: خصائص مرشحة اللون: ق تقاس بالنومترات، ذق تقاس بالنسبة المئوية، وض 1/2 تقاس بالنومترات.

طبقات نصف عاكسة



الشكل ١٢: مرشحة تداخل

يمكن وصف مرشحة التداخل كأي مرشحة لونية بثلاثة بارامترات: الطول الموجي ذق المناظر لدروة النطاق الموجي المار، النفاذية ذق بالنسبة المئوية عند ذروة النطاق المار، ونصف العرض ض 1/2 أي العرض الطيفي للنطاق المار عند مستوى نصف النفاذية القصوى. ويبيّن الشكل ١١ هذه البارامترات الثلاثة.

ويمكن صنع مرشحات التداخل من النوع النافذ الذي وصفه أول مرة جفكن** Geffken وذلك لأني طول موجي مرغوب فيه.

وتتألف هذه المرشحات من طبقة أو عدة طبقات رقيقة من مادة شفافة مثل الكريوليت $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$ توضع بين طليتين نصف شفافتين. وترسب هذه الطبقات بالتعاقب على شريحة زجاجية تحت فراغ عالٍ، ثم يُلصق بها بوساطة الإسمنت شريحة كغطاء لها لحمايتها - الشكل ١٢.

ويحدد المسافة بين الطليتين الفلزية التي تبلغ عادة نصف طول موجي أو مضاعفاً من مضاعفاته لون الضوء الذي تمرره المرشحة. أما معظم الضوء غير النافذ فينعكس. وبذلك فإن تلت المرشحة بسبب التسخين الزائد أمر نادر.

ويحدث النفاذ الأقصى في حالة السقوط العادي، كذلك، عندما تكون $\lambda = 2\text{م}$. وعندما تكون $\lambda = 2\text{م}$ ، فإن المرشحة هي مرشحة تداخل من الرتبة الثانية. ويمكن صنع مرشحات التداخل وفق مواصفات أكثر تزمناً من تلك التي تستوفيها مرشحات الامتصاص. ويوضح الجدول ٣ مقارنةً بينهما. كذلك يمكن صنع مرشحات التداخل لعكس الضوء، وفي هذه الحالة تعمل هذه المرشحات مثل مرايا تلوانية dichroic، فتتسبب

*R. R. Shannon, R. E. Weekley and D. Shafer, "A Source of Spiral Fringes," *Applied Optics* 4 (1965), 1193-96.

**W. Geffken, *Interferenzlichtfilter*, German Patent 716, 153, 8 Dec 1939.

في إحداث انعكاس لبعض الأطوال الموجية ونفاذ لبعضها الآخر. وتُمرَّر مرشحات التداخل من النوع الإسفيني مدى واسعاً من الطيف: من البنفسجي إلى الأحمر في العادة. وعند استخدامها مع شق لاختيار الطول الموجي فإنها تُسمَّى «مُمرِّرة اللون الأحادي الرخيصة».

الجدول رقم ٣: قيم نموذجية لنوعين من المرشحات اللونية.

مرشحة الامتصاص	مرشحة التداخل	
٣٠%	٩٠%	ذق
٥٠ نم	١,١ نم أو أنجستروم	ض $\frac{1}{2}$
٢ دولار	٢٠٠ دولار	الثلث

أطليات المضادة للانعكاس Antireflection Coatings

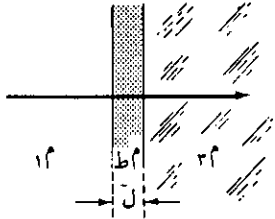
يضيغ بعض الضوء المارَّ عبْر سطح ما بسبب الانعكاس. ومَع أنَّ الاضعاف الحاصل للأشعة المركزية الساقطة عمودياً بسبب انعكاس واحد يكون قليلاً، إلّا أنَّ هذه الخسارة تزداد زيادة بالغة لمنظومة تتألف من عدة عناصر. وبصورة عامة تُعطى الانعكاسية ر عند السطح الفاصل بين وسطين: مُعاملاً انكسارهما n_1 ، n_2 بالمعادلة التالية:-

$$R = \left(\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2 + n_1^2} \right)^2 \dots\dots [٢:٨-١٩]$$

وسَتُبَحِّث هذه المعادلة بمزيد من التفصيل في الفصل ٣:٢. وعلى سبيل المثال تكون الانعكاسية عند سطح فاصل بين الهواء والزجاج ($n_1 = 1,5$) مساوية للمقدار $R = \left(\frac{1,5^2 - 1^2}{1,5^2 + 1^2} \right)^2 = \frac{1}{25}$ ، أي أنَّ ٤% من الضوء الساقط ينعكس ومن ثمَّ يضيغ. هذا وفي حالة السقوط المائل تزداد نسبة الضوء الضائع.

وتوجد هناك طريقتان لانقاص هذا الضياع: (١) إن الانعكاس لا يحدث إذا كان $m = 2$. ولكن لا يحدث انكسار أيضاً في هذه الحالة. كذلك لا يحدث الانعكاس إذا كان التغير في معامل انكسار الوسطين تغيراً تدريجياً وليس فجائياً، ويمكن تحقيق ذلك إلى حد ما بواسطة حَكَّ سَطحي الوسطين. (٢) أما الطريقة البديلة للتخلص من الانعكاس فهي طريقة التداخل وذلك من خلال وضع طبقات رقيقة من مادة مناسبة على السطحين المعنيين.

افترض أن ضوءاً يسقط على سطح زجاجي مغطى بفيلم رقيق من مادة شفافة - الشكل ١٣. وفي العادة ينعكس بعض الضوء عن أي من السطحين؛ إلا أن هذين الانعكاسين يمكن حذفهما إذا كانت الموجتان المنعكستان مختلفتي الطور بمقدار 180° وذواتي سعة واحدة $E_1 = E_2$.



الشكل ١٣: اشتقاق خصائص الطليات المضادة للانعكاس.

فإذا استوفى شرط الطور، نحصل على:-

$$m\lambda = 2n_2d \quad (2-8-20)$$

حيث m هو معامل انكسار الظلية، λ سُمكها. ويتحقق شرط تساوي سعتيهما $E_1 = E_2$ عندما:-

$$r_1 = r_2 \text{ ؛ أي عندما :-}$$

$$\frac{2(n_2^2 - n_1^2)}{n_2^2 + n_1^2} = \frac{2(n_2^2 - n_3^2)}{n_2^2 + n_3^2} \quad (2-8-21)$$

وعندما تكون $m = 1$ ، نحصل على:-

• توصل الى هذا الاكتشاف أ. شماكولا Smakula (١٩٠٠-): الفيزيائي الالماني الذي كان وقت هذا الاكتشاف مدير دائرة البحث بمصانع كارل زيس البصرية في جينا، ثم رحل بعد ذلك الى امريكا ليعمل في قلعة بلفوار في معهد متشوستس التكنولوجي (MIT).

$$-، وتُختَزَلُ هذه إلى :- \frac{٢م^٢ + ٣مط^٢ - ٢م^٢}{٣م^٢ + ٣مط^٢ + ٢م^٢} = \frac{٢م^٢ + ٣مط^٢ - ١}{٢م^٢ + ٣مط^٢ + ١}$$

$$٣مط^٤ + ٣م^٤ = ٣م^٤ + ٣مط^٤$$

وبقسمة طرفي المعادلة الأخيرة على $٣مط^٤$ وإعادة ترتيب الحدود، نجد أن :-

$$٠ = ٣م - ٢م + ٣م - ٢م$$

ومنها يتبع أن :-

[٢٢-٨:٢]

.....

$$٢م \approx \sqrt{٢} \text{ زجاج}$$

أما سمك الظلية اللازمة فيستخرج من معادلة النهاية الصغرى (للسقوط العمودي) ولتغيرين في الطور كُلاً منهما ط) :-

$$ل = (ن - \frac{١}{٢}) \frac{\lambda}{٢م}$$

ولذلك فعند الرتبة الأولى يكون السمك البصري (السمك $\times$ معامل الانكسار) على

النحو التالي :

[٢٣-٨:٢]

$$٢م = \frac{\lambda}{٤} \text{}$$

وبإمالة المرشحة نسبة إلى الضوء الساقط، تُزاح ذرّة النفاذ إلى الأطوال الموجية الأقصر. ولما كان شرط الطور وكذلك معامل الانكسار (إلى درجة أقل) يعتمد على الطول الموجي، فلا يمكن صنع الظليات المضادة للانعكاس إلا لمدى محدود من الطيف. وفي العادة يُختار جزء الطيف الأسطع بصرياً (الأصفر - الأخضر) مما يبقى على بعض انعكاس للونين البنفسجي والأحمر. وهذا الإجراء يجعل هذه الظليات تظهر مزرقة أو أرجوانية. فكما في مرشحات التداخل، يُمكن الحصول على تحسين بالغ للظليات المضادة للانعكاس باستخدام ظليتين أو ظليات متعددة تُسمى «الطبقات المتعددة». وعلى نحو مماثل يستخدم هذا المبدأ في صنع المرايا التلوانية.

ولسألة الطليبات المضادة للانعكاس بغض الأهمية التاريخية. فقد ظهرت في أثناء الحرب العالمية الثانية الحاجة إلى إيجاد طلية مضادة للانعكاس للعواصبات الألمانية كإجراء مضاد لرادار العدو. وفي هذه الحالة يكون الوسطان الهواء والطلية على بُرج المراقبة. ويمكن التخلص من الانعكاس إذا كانت نسبة ثابتي العازل للوسطين مساوية لنسبة نفاذيتيهما أي: $\frac{1^{\mu}}{2^{\mu}} = \frac{1^3}{2^3}$. وعلاوة على ذلك، ينبغي أن تكون الطبقة المضادة للانعكاس ذات امتصاصية عالية لأمواج الرادار، وهي خصيصاً يمكن تحقيقها باستخدام مواداً فرومغناطيسية ذات تخلفية مغناطيسية عالية hysteresis.

اقتراحات لقراءات اضافية

- O. S. Heavens, *Thin Film Physics* (New York: Barnes & Noble, 1970).
H. Mayer, *Physik dünner Schichten* (Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1955).
A. Vasicsek, *Optics of Thin Films* (New York: Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc., 1960).
M. Françon, *Modern Applications of Physical Optics* (New York: Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc., 1963).
P. Baumeister, "Interference, and Optical Interference Coatings," *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. 1, ed. R. Kingslake (New York: Academic Press, Inc., 1965), 285-323.

المسائل

- ١-٨: ٢ تُظهِرُ فقاعةُ صابونٍ تشاهدُ في ضوءِ طولُهُ الموجي ٥٥٠ نـم انعكاساً قوياً للضوء. ولا سيّما عند الرتبة الأولى؛ فبافتراض السقوط العمودي، جدّ سُمْكَ الفيلم. علماً أنّ معامل انكسار مخلول الصابون ١,٣٨.
- ٢-٨: ٢ انعكسَ ضوء طولُهُ الموجي ٥٨٩,٣ نـم يسقطُ شبه عموديّ عن فيلم رقيقٍ معامل انكساره ١,٣٤. ما السُمْكُ الأقلُّ للفيلم ليُظَهَرَ (أ) معتماً (ب) ساطعاً؟
- ٣-٨: ٢ انتشرَ فيلمُ زيت (م=١,٤٢) على شريحة زجاجية (م=١,٥٨)، وأظهرَ أقلَّ إرجاع للضوء الأزرق أي نهايةً صفراً ($\lambda = ٤٠٠$ نـم). فإذا سَقَطَ الضوء الأزرقُ على زاوية ٤٥°، فجدّ أقلَّ سُمْكٍ ممكنٍ للفيلم. جدّ كذلك القيم الأخرى الممكنة للسُمْك.

- ٤-٨:٢ فقاعة صابون ($m = 1,38$) مصنوعة من فيلم رقيق سمكه $10 \times 3,54 \times 10^{-7}$ مم. فإذا شوهدت الفقاعة في الضوء الأبيض في وضع السقوط العمودي، فبأي لون تظهر؟ اعتبر فقط الضوء المنعكس.
- ٥-٨:٢ وُضع قرصان دائريان من الزجاج المستوي بحيث ينطبق محيطاهما باستثناء نقطة واحدة إذا وُضعت بينهما شعرة سمكها $0,016$ مم، جدّ عدّة الأهداب التي تُرى في الضوء الأزرق ($\lambda = 450$ نم)، وجد الشكل الذي تأخذه الأهداب.
- ٦-٨:٢ فراغ هوائي في شكل إسفين يشبه ذلك الفراغ في المسألة السابقة وعرضه من جانب يزيد طولين موجيين على عرضه من الجانب الآخر. قسّر بالاستعانة بشكلي تخطيطي ما تراه عند النظر إلى الشريحتين رأسيًا في: - (أ) ضوء أحادي الموجة (ب) الضوء الأبيض.
- ٧-٨:٢ انعكاسية كلّ من شريحتي مقياس تداخل فبري-بيرو تساوي $0,8$. جد المسافة الأقلّ بين الشريحتين ليُمكن تبيين خطّ ثنائي قرب 480 نم: ألفارق في الطول الموجي لجزئية $0,05$ أنجستروم.
- ٨-٨:٢ كوّنت أمواج مستقرة كأموّج الصوت التي سرعتها 330 م/ث في فجوة أبعادها $2 \times 3 \times 5$ م. فافتراض أنّ العقدة تنعكس عن كلّ جزء من جدران الفجوة، فجد: - (أ) الطول الموجي والتواتر للموجة المستقرة في الاتجاهات الثلاثة (ب) تواتر النغمة التوافقية الثانية في الاتجاهات الثلاثة.
- ٩-٨:٢ وُجد في تجربة حلقات نيوتن أنّ قطر الحلقة الساطعة العاشرة المكونة بضوء الصوديوم الأصفر هو 3 مم. جد نصف قطر تكوّر العدسة مفترضاً تماساً قريباً وباعتبار النظر إليها في اتجاه الضوء المنعكس.
- ١٠-٨:٢ تخيل تجربة حلقات نيوتن حيث يُستخدم الضوء الأحادي اللون ويُنظر عمودياً على المحور البصري. (أ) بأية متسلسلة أعداد يمكنك تمثيل أنصاف أقطار النهايات الصغرى من المركز إلى الخارج؟ (ب) بأية متسلسلة يمكنك تمثيل النهايات العظمى؟ (ج) جد كذلك متسلسلة الأعداد الطبيعية التي يمكنك بها وصف نسب عرض الفراغات الهوائية المناظرة للنهايات الصغرى والعظمى المتعاقبة.

١١-٨:٢ شوهدت حلقات نيوتن في الضوء النافذ ($\lambda = 500 \text{ nm}$)، وَوُجِدَ أَنَّ قُطْرَ الحلقة العشرين الساطعة هو ٤ مم.

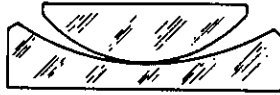
(أ) ما نصف قطر تكوير سطح العدسة؟ (ب) جد قطر الحلقة الساطعة الثلاثين؟

١٢-٨:٢ أكمل الجدول ٤ مُضيفاً شروط النهايات الصغرى والعظمى لمجموعة من ثلاث طبقات مُعَامِلَاتُ انكسارها على الترتيب منخفضة، متوسطة، عالية وتُرى في الضوء المنعكس والضوء النافذ.

الجدول ٤

الضوء النافذ	الضوء المنعكس	
		شريحة رقيقة
	$2\mu \cos \theta = \lambda \left(n - \frac{1}{4} \right)$	النهاية العظمى
		النهاية الصغرى
$2\mu \cos \alpha = n\lambda$		فيري - بيرو (تغيران في الطور)
		نهاية عظمى
		نهاية صغرى
		حلقات نيوتن (تغير واحد في الطور)
		نهاية عظمى
	$n\lambda = 2\mu \cos \theta$	نهاية صغرى

١٣:٨:٢ لإيجاد حلقات نيوتن وُضِعَتْ عدسة محدبة مستوية (نق = ١٠٠ سم) على عدسة مقعرة مستوية كما في الشكل ١٤. وباستخدام ضوء أخضر ($\lambda = ٥٥٠$ نم) وُجِدَ أَنَّ للحلقة المعتمة العشرين التي تُرى في اتجاه الضوء الساقط قطراً مقداره ٢٠ مم. جُذِ نِصْفَ قطرِ تَكَوُّرِ سَطْحِ العدسة المقعر.



الشكل ١٤

١٤-٨:٢ في الشكل ١٤ أعلاه مُلِثَتِ الفجوة الهوائية بِزَيْتٍ ($m = ١,٨٠$)؛ صِفْ خصائص حلقات نيوتن التي تُرى في هذه الحالة.

١٥-٨:٢ صُمِّمَتْ مِرْشَحَةٌ تَدَاخِلُ بِاستخدام طبقة من الكريوليت ($m = ١,٣٥$) حُشِرَتْ بَيْنَ طليتين فلزيتين يَصِفُ شفافتين. فإذا قُصِدَ بهذه المِرْشَحَةِ عَزْلُ حَظِّ الزُّبُقِ الذي طوله الموجي ٨,٤٣٥ نم، فِجِذْ (أ) أَقَلَّ سُمْكٍ لطبقة الكريوليت وَ(ب) كَيْفَ تَتَغَيَّرُ ذِرْوَةُ النفاذية للأشعة إذا ما أُمِلَّتِ المِرْشَحَةُ ١٠°؟

١٦-٨:٢ صُنِعَتْ طليّةٌ عدسية مضادة للانعكاس من فلوريد المغنيسيوم ($m = ١,٣٧٥$). جُذِ سُمْكُ الطليّةِ اللازمة لإحداثِ أَقَلِّ انعكاسٍ ممكنٍ عِنْدَ مركزِ الطيف المرئي ($\lambda = ٥٥٠$ نم).

١٧-٨:٢ صُنِعَتْ عدسةٌ من زجاجٍ ($m = ١,٥٥$) وَطُلِّيَتْ بِطليّةٍ مضادة لانعكاسٍ ضوءٍ ($\lambda = ٥٥٠$ نم): (أ) ما أَفْضَلُ معاملِ انكسارٍ للطليّةِ (ب) ما سُمْكُ الطليّةِ؟

١٨-٨:٢ يَرَادُ وَضْعُ طليّةٍ مضادة للانعكاسٍ عَلَى سَطْحِ عَدَسَةٍ ($m = ١,٧٦$). (أ) فإذا كَانَ مُعَامِلُ انكسارِ الطليّةِ ١,٤٠، فِجِذْ سُمْكَهَا لِيَكُونَ الانعكاسُ صِفْراً عِنْدَ الطولِ الموجي ٥٠٠ نم. (ب) بِإِهْمَالِ التداخُلِ جِذِ الانعكاسيةَ عِنْدَ السطحِ الفاصِلِ بَيْنَ العدسةِ وَطليّةِ.

الجزء الثالث

خصائص الضوء والمادة

Properties of Light and Matter

يمكن تفسير التداخل كـ بـصـورة أساسية باعتماد الطبيعة الموجية للضوء، ومن غير الهام لغرض التفسير أن تكون الأمواج طولية أو عرضية. وفي وقت مبكر من تاريخ الفيزياء وُجد أن أمواج الصوت أمواج طولية. أما أمواج الماء فهي بجلاء عرضية (مستعرضة). ولسبب ما ورُبما لأن البصر والسمع يتبدوان متشابهين، طُنَّ أن أمواج الضوء هي طولية أيضاً، وقد أظهرت تجارب الاستقطاب فيما بعد أنها خلافاً لذلك أمواج مستعرضة.

وعلاوة على ذلك يتألف الضوء - كما سنرى - من مجالات كهربائية ومغناطيسية متغيرة باستمرار يمكن تمثيلها بمتجهات. وتمكننا هذه المجالات وأوصاف غيرها من فهم الضوء حين يمر عبر السطوح الفاصلة والأوساط غير المتجانسة وكذلك من تحديد سرعته، شدته، والخصائص الأخرى الناشئة عن تفاعل الضوء والمادة.

الفصل ٣ : ١

استقطاب الضوء

Polarization of Light

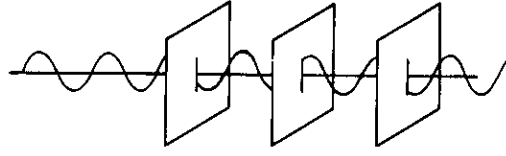
تنادي نظرية ماكسويل التي ستعرضها في نهاية هذا الكتاب بأن الأمواج الكهرومغناطيسية أمواج مستعرضة بالنسبة إلى اتجاه الانتشار. والبرهان التجريبي على ذلك يأتي من الاستقطاب كما سنرى في هذا الفصل. ونبدأ بخلاصة الأنواع المختلفة للضوء المستقطب.

أنواع الضوء المستقطب

١. إن معظم الضوء كما يوجد في الطبيعة هو ضوء غير مستقطب. ويُعزى ذلك جزئياً إلى أن الضوء يصدر من عدد كبير من الذرات: كل مجموعة منها تهتز في اتجاه مُغايِر. وحتى لو أمكن عزل شعاع ضوئي واحد، فإنه سيكون غير مُستقطب إلا إذا كان أحادي الموجة (اللون) تماماً. إذ في هذه الحال، سيظهر هذا الضوء تفضيلاً لاتجاه مُعَيّن للاهتزاز.

ولا توجد هنالك طريقة مُرضية لوصف الضوء غير المستقطب بالرسم. وفي العادة يتم تمثيله مثل نجمة ذات رؤوس عدّة؛ إلا أن هذا التمثيل قليل الجدوى، ذلك لأن السمة الأكثر بروزاً فيه، وهي التغير المستمر في نوع الاستقطاب، لا يمكن تمثيلها بهذه الطريقة.

٢. ويسمى الضوء بالضوء المستقطب خطياً إذا كان المتجه الكهربائي لا يهتز إلا في مستوى واحد - الشكل ١. وينبغي أن لا يستخدم لفظ «مستقطب في مستوى»، ذلك لأن لفظ «مستوى الاستقطاب» يُشير إلى المتجه المغناطيسي. ولما كنا اليوم نعرف



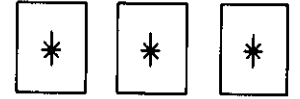
الشكل ١: الضوء المستقطب خطياً

أنَّ المتجه الكهربائي هو الذي يفسرُ جميع التأثيرات البصرية والفوتوغرافية، فإننا نفضلُ للدلالة عليه استخدامَ لفظِ مُستوى الاهتزاز.

٣ . وإذا احتوى الضوءُ المستقطبُ خطياً، فضلاً عن ذلك، بعضَ الضوءِ غيرِ المستقطبِ فإنه يُسمَّى الضوءُ المستقطبُ جزئياً - الشكل ٢ . وهذا الضوءُ ينشأ عن مرورِ الضوءِ العاديِّ في صفيحةٍ من مادةٍ مُستقطبةٍ تحتوي على ثُقُوبٍ . وتُعطى درجةُ الاستقطابِ كـ بنسبةِ الشَّدَتَيْنِ القُصوى والدُّنيا (الصغرى) للضوءِ النافِذِ أي :

$$K = \frac{I_{ش ق} - I_{ش ص}}{I_{ش ق} + I_{ش ص}}$$

٤ . في الاستقطابِ الدائريِّ لا يتحركُ رأسُ المتجهِ الكهربائيِّ إلى الأمامِ وإلى الخلفِ في مُستوى، وإنما يكونُ ذا مقدارٍ ثابتٍ، ويتحركُ حركةً دائريةً حَوْلَ مِخْوَرِ الانتِشَارِ - الشكل ٣ . وإذا دارَ المتجهُ عِنْدَ النظرِ إليه من جهةٍ مَصْدَرِ الضوءِ في اتجاهِ عقاربِ الساعة، فإنَّ الضوءَ يكونُ مستقطباً دائرياً جهةً اليمين، أما إذا دارَ عَكْسَ عقاربِ الساعةِ فهوَ مستقطبٌ دائرياً جهةً اليسار.

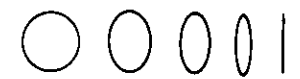


الشكل ٢: ضوء مستقطب جزئياً كما يرى عند النظر إليه رأسياً.



الشكل ٣: الضوء المستقطبُ دائرياً

٥ . يقع الاستقطابُ الإهليلجيُّ elliptical بين الاستقطابِ الدائريِّ والاستقطابِ الخطيِّ . وهو أكثرُ أنواعِ الاستقطابِ عموميةً حيثُ يُعْتَبَرُ الاستقطابانِ الدائريُّ والخطيُّ حالتين متطرفتين مِنْ حالاتِهِ - الشكل ٤ . وَلَوْ أَرَدْنَا استخدامَ اصطلاحاتٍ تنطبقُ في الأبعادِ الثلاثة، لاسْتَحْدَمْنَا لَفْظَ «الاستقطابِ المستوي» plane بدلَ «الاستقطابِ الخطيِّ» و«الاستقطابِ الحلزونيِّ» helical بدلَ «الاستقطابِ الدائريِّ» . وَلَكِنْ لِكُنْ لِكُنْ نتجنَّبُ ألفاظاً غَيْرَ مستساغةٍ كالحلزونِيَّ الدائريِّ، والحلزونِيَّ الإهليلجيِّ، فَضَّلْنَا استخدامَ الاصطلاحاتِ التي تنطبقُ في بُعْدَيْنِ وهِي الخطِّيُّ، الدائريُّ، والإهليلجيُّ .



الشكل ٤: الاستقطابُ الدائريُّ والإهليلجيُّ والخطيُّ

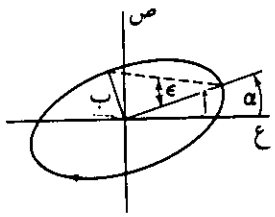


الشكل ٥ : الدوران البصري

٦ . في الدوران البصري **optical rotation** أو النشاط البصري، يتوقف دوران مستوى الاهتزاز **Plane of oscillation** للضوء المستقطب الخطي أو الإهليلجي على طول المسار - الشكل ٥ .

ملاحظة: النشاط البصري صفة للوسط الذي ينتشر فيه الضوء؛ أما الاستقطاب الدائري فهو صفة للضوء.

كرة بوانكاريه The Poincaré Sphere



الشكل ٦ : إسقاطي الضوء المستقطب إهليلجياً. يُظهر الرسم تعريف زاوية السم α والإهليلجية β . وفي الرسم

يظهر أن زاوية السم α

$\alpha = 20^\circ$ ، والإهليلجية $\beta = \frac{p}{p}$

$\alpha = 40^\circ$ ، وأن اتجاه الحركة

هو اتجاه عقارب الساعة عند

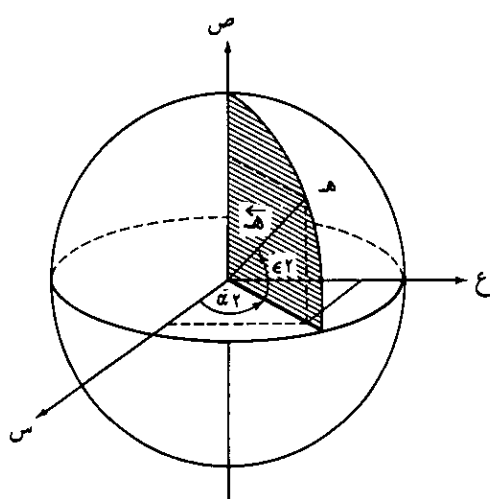
النظر في اتجاه المصدر.

في الخزمة الضوئية المستقطبة تماماً، تكون الاهتزازات إما خطية في اتجاه يعمل زاوية ما (زاوية السم) **azimuth** مع اتجاه عمودي على اتجاه انتشار الضوء وأما إهليلجيةً بمحور أساسي يميل بزاوية سميت ما على اتجاه متعامد مع اتجاه انتشار الضوء وأما دائريةً. خذ على سبيل المثال ضوءاً مستقطباً إهليلجياً يري في اتجاه أمامي، ثم أسقط حركة المتجه الكهربائي على مستوي يقطع عمودياً اتجاه انتشار الضوء. إن النسبة بين محوري الشكل الإهليلجي الناتج تأخذ أية قيمة، كما أن اتجاهه - أي اتجاه حركة منقطة رأس المتجه الكهربائي - قد يكون إلى جهة اليمين أو جهة اليسار.

وبذلك يمكننا وصف الحالة العامة للاستقطاب ببارامترين: (١) اتجاه المحور الأساسي للإهليلج أو زاوية سمته و (٢) نسبة محوره الأساسي إلى محوره الثانوي أو الإهليلجية $\beta = \alpha - \frac{p}{p}$ - الشكل ٦. وإذا كانت الإهليلجية صغيرة فإن الإهليلج يستطيل كثيراً؛ وفي النهاية عندما تصل الإهليلجية إلى القيمة صفر يكون الاستقطاب خطياً. أما إذا كانت $\beta = 1$ ، فإن الاستقطاب يكون دائرياً.

ويقال لخزمتين ضوئيتين إنهما متعامدتان إذا: (أ) كان الضوء مستقطباً وكان مستويا اهتزازهما يختلفان بـ 90° ، أو (ب) كان الضوء مستقطباً دائرياً وكان أحدهما مستقطباً جهة اليمين والآخر جهة اليسار، أو (ج) إهليلجياً وكان الفارق بين زاويتي سميت المحورين الأساسيين 90° واتجاه الاستقطاب متضادين وإهليلجيتاهما واحدة.

وَمِمَّا يَنْتَهِجُ جَمِيعُ الْحَالَاتِ الِاسْتِقْطَابِيَّةِ تَمَثِيلًا مُتَمِيزًا بِنُقْطَةِ (هـ) أَوْ بِصُورَةٍ أَكْثَرُ دَقَّةً بِالْمَتَجِّهِ هـ الَّذِي يُوْشِّرُ صُبُوتَ نَقْطَةِ وَاقِعَةٍ عَلَى سَطْحِ كُرَةٍ تُعْرَفُ بِكُرَةِ بَوَانْكَارِيَّةِ * - الشَّكْل ٧. وَبِذَلِكَ يَكُونُ خَطُّ (أَوْ زَاوِيَةُ) الْعَرْضِ Latitude وَزَاوِيَةُ أَوْ خَطُّ الطَّوْلِ longitude لِلْمَتَجِّهِ هـ بِالترتیب ٢ ، ٣ ، ٤ . وَتَقَعُ جَمِيعُ الِاسْتِقْطَابَاتِ الْخَطِيَّةِ عَلَى خَطِّ الِاسْتَوَاءِ equator حَيْثُ يَقْطَعُ الْمُسْتَوَى ص - ع الْكُرَةِ. أَمَّا الِاسْتِقْطَابَاتُ الْاِهْلِيلِجِيَّةُ فَتَقَعُ عَلَى الْكُرَةِ فَوْقَ خَطِّ الِاسْتَوَاءِ أَوْ تَحْتَهُ. وَتُمَثَّلُ الِاسْتِقْطَابَاتُ الْاِهْلِيلِجِيَّةُ ذَاتُ زَاوِيَةِ السَّمْتِ الثَّابِتَةِ بِنَقَاطٍ عَلَى خَطِّ طَوَّلٍ مُعَيَّنٍ، فِي حِينٍ تَقَعُ الْاِهْلِيلِجَاتُ ذَاتُ الْاِهْلِيلِجِيَّةِ الثَّابِتَةِ عَلَى خَطِّ عَرْضٍ مَا. وَتُنَاطِرُ الِاسْتِقْطَابَاتُ الدَّائِرِيَّةُ أَحَدَى قُطْبَي الْكُرَةِ؛ كَذَلِكَ تُمَثَّلُ الِاسْتِقْطَابَاتُ الْمُتَعَامِدَةُ بِطَرَفَيْ قُطْرٍ مِنْ أَقْطَارِ الْكُرَةِ.



الشكل ٧: كرة بوانكاريه

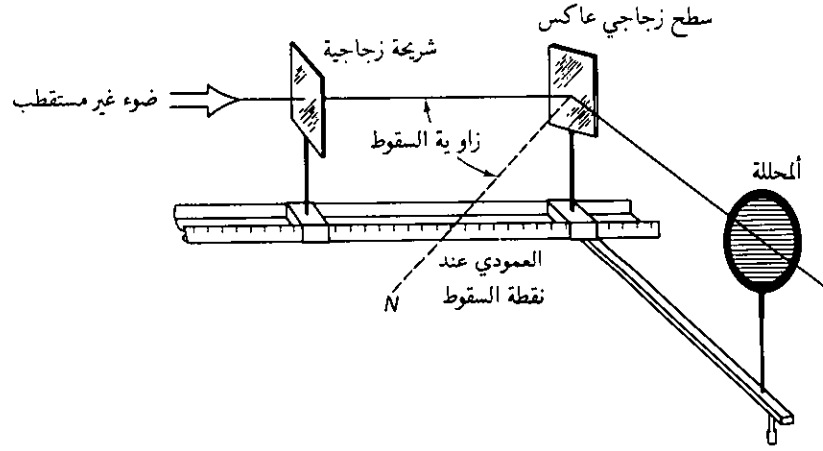
انتاج الضوء المستقطب Production of Polarized Light

يُمْكِنُ أَنْ يُجْعَلَ الضَّوُّ الْعَادِيُّ مُسْتَقْطَبًا بِطَرِيقٍ عِدَّةٍ، وَتَبَحُّثُ هُنَا الِاسْتِقْطَابَ بِالْاِنْعِكَاسِ، بِالْاِنْكَسَارِ، بِالتَّشْتِ، بِالْاِمْتِصَاصِ الْاِنْتِقَائِيِّ، وَبِالْاِنْكَسَارِ الْمَزْدُوجِ.

* نَسْبَةُ إِلَى هَنْرِي بَوَانْكَارِيَّةِ Henri Poincaré : الرِّيَاضِي الْفَرَنْسِي الَّذِي أَلَّفَ كِتَابَ «النَّظَرِيَّةُ الرِّيَاضِيَّةُ لِلضَّوِّ»، بَارِيسَ، عَامَ ١٨٩٢ .

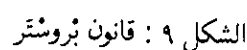
الاستقطاب بالانعكاس Polarization by reflection

عندما يسقط ضوء على قطعة زجاجية ينعكس جزء منه ويدخل الجزء الآخر قطعة الزجاج. وإذا كان الضوء الساقط ضوءاً طبيعياً غير مستقطب، فإن كلاً من الضوء المنعكس والضوء المنكسر - كما وجد بالتجربة - يصبح مستقطباً جزئياً. وقد وجد إتيان مالوس Malus عام ١٨٠٨ أن الاستقطاب يبلغ أقصى زاوية سقوط مقدارها 57° . وفي عام ١٨١٢ وجد بروستر Brewster أن الاستقطاب الأقصى يحدث عندما تكون الزاوية بين الشعاع المنعكس والشعاع المنكسر 90° . وفي مختبر البصريات يمكن إظهار الاستقطاب بالانعكاس باستخدام الترتيب الظاهر في الشكل ٨. فعندما تُدار المُحلَّلة analyzer حول



الشكل ٨: الاستقطاب بالانعكاس

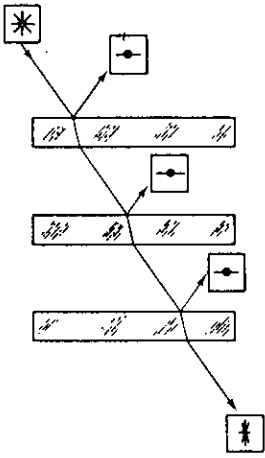
محورها يُضَيِّحُ الضوء المنعكس عن الزجاج ساطعاً ومُعْتِمًا بالتعاقب. ولتفسير ذلك، تَحَيَّلْ نفسك تنظر إلى الحزمة الضوئية المنعكسة. فالشعاع الساقط يتسبب في إحداث اهتزازات في ذرات المادة. ويمثل الضوء المنعكس الاشعاعات من هذه الذرات؛ غَيْرَ أَنَّ الاهتزازات العمودية على مستوى السقوط هي وحدها التي تُسَهِّمُ بالضوء المنعكس، ذلك لأن الاهتزازات الواقعة في مستوى السقوط لَيْسَ لها مركبة عمودية في الاتجاه العمودي على مستوى السقوط، لذا فهي لا تُشِعُّ في ذلك الاتجاه. ونَسْتَطِيعُ القول بصورة وصفية إنَّ المتجه الكهربائي الذي يهتز عمودياً على مستوى السقوط يَمَسُّ السطحَ بِنَتْمَا المتجه الكهربائي الذي يهتز في مستوى السقوط يَخْفِضُ في سطح العازل الكهربائي dielectric (الزجاج)؛ ولذلك يكون الضوء المنعكس مستقطباً خطياً.



— ۳۶۴ —

كَانَ مَعَامِلُ الانكِسَارِ يَعْتَمِدُ عَلَى الطُّوْلِ الْمَوْجِيِّ ، فَإِنْ زَاوِيَّةُ بُرُوسْتَرِ تَعْتَمِدُ إِلَى دَرَجَةِ مَا عَلَى الطُّوْلِ الْمَوْجِيِّ أَيْضاً . وَيُشَاهَدُ الاسْتَقْطَابُ بِالانْعِكَاسِ عَلَى الْأَرَصِفَةِ وَالسُّطُوحِ الْمِمَالَةِ مُتَسَبِّباً فِي وَهْجِهَا . وَيُمْكِنُ خَفْضُ شِدَّةِ هَذَا الْوَهْجِ بِالاسْتِعَانَةِ بِنَظَارَةِ مُسْتَقْطَبِيَّةٍ : مُسْتَوِيَّاتٍ تَمَرِيرِهَا لِلْأَشْعَةِ رَاسِيَةً .

الاستقطاب بالانكسار

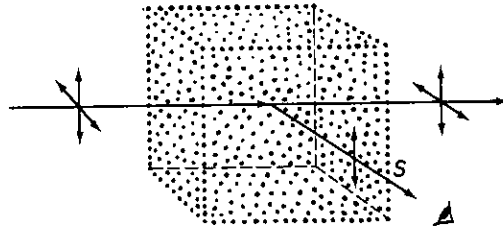


الشكل ١٠ : الاستقطاب بالانكسار من كومة من شرائح الزجاج

بَعْدَ اكْتِشَافِ بُرُوسْتَرِ بَزْمَنِ مَا ، وَجَدَ مَالُوسُ أَنَّ الاسْتَقْطَابَ لَا يَقْتَصِرُ عَلَى الشَّعَاعِ الْمُنْعَكِسِ فَحَسْبُ وَإِنَّمَا يَخْدُثُ أَيْضاً لِلشَّعَاعِ الْمُنْكَسَرِ . وَيُمْكِنُ تَفْهَمُ ذَلِكَ بِسَهُولَةٍ إِذَا مَا تَذَكَّرْنَا أَنَّ الشَّعَاعَ الْمُنْعَكِسَ يَكُونُ مُسْتَقْطَباً خَطِياًً بِصُورَةٍ تَامَةٍ عِنْدَ زَاوِيَةِ بُرُوسْتَرِ . وَيَعْنِي هَذَا أَنَّ هَذِهِ الْمَكُونَةَ غَيْرُ مُوْجُودَةٍ فِي الشَّعَاعِ الْمُنْكَسَرِ . وَبِالانْعِكَاسِ الْمَتَكَرِّرَةِ يُمْكِنُ بِاسْتِمْرَارٍ انْقِصَاصُ هَذِهِ الْمَكُونَةِ فِي الشَّعَاعِ الْمُنْكَسَرِ الَّذِي يَهْتَزُّ فِي مُسْتَوَى السَّقُوطِ حَتَّى يَصْبَحَ الشَّعَاعُ الْنَافِذُ بَعْدَ مُرُورِهِ فِي عِدَّةِ شَرَايِحَ زَجَاجِيَّةٍ مُسْتَقْطَباً خَطِياًً إِلَى دَرَجَةٍ مُقْبُولَةٍ أَيْضاً - الشَّكْلُ ١٠ . وَكُلَّمَا زَادَ عَدْدُ الشَّرَايِحَ الزَجَاجِيَّةِ الْمُسْتَحْدَمَةِ ، زَادَ الضَّوْءُ الْمُسْتَقْطَبُ خَطِياًً فِي نَقَاوَتِهِ . فَالْشَّرِيحَةُ الْوَاحِدَةُ تَزِيلُ تَقْرِيباً ٨٪ مِنَ الضَّوْءِ الْمُسْتَقْطَبِ فِي اتِّجَاهِ مَا ؛ وَبِاسْتِخْدَامِ عَشْرِ شَرَايِحَ يَتِمُّ اسْتَقْطَابُ الضَّوْءِ إِلَى نِسْبَةٍ ٦٧٪ ، وَبِعَشْرِينَ شَرِيحَةً تَرْتَفِعُ النِّسْبَةُ إِلَى ٨٠٪ ، وَتَرْتَفِعُ إِلَى ٩٥٪ بِأَرْبَعٍ وَخَمْسِينَ شَرِيحَةً . وَتُسْتَحْدَمُ هَذِهِ الطَّرِيقَةُ فِي أَيَّامِنَا هَذِهِ فِي الظَّلِيلَاتِ مُتَعَدِّدَةِ الطَّبَقَاتِ لِإِحْدَاثِ الاسْتَقْطَابِ فِي الطِّيفِ الْمَرْتِيِّ وَكَذَلِكَ فِي طِّيفِ الْأَشْعَةِ تَحْتَ الْحَمْرَاءِ حَيْثُ يُسْتَعَاضُ عَنِ الزَّجَاجِ بِأَفْلَامٍ رَقِيقَةٍ مِنَ السَّلِينِيُومِ selenium .

الاستقطاب بالتشتت Polarization by scattering

عِنْدَمَا يَمُرُّ الضَّوْءُ فِي حَجْمٍ يَحْوِي دَقَائِقَ صَغِيرَةً مُعَلَّقَةً فِيهِ ، فَإِنَّ الضَّوْءَ الْمَتَشَتِّ إِلَى الْجَوَانِبِ هُوَ - كَمَا وَجِدَ بِالتَّجَرِبَةِ - ضَوْءٌ مُسْتَقْطَبٌ جَزْئِيًّا ؛ إِذْ تَكُونُ الْاهْتِرَازَاتُ فِي الضَّوْءِ الْمَتَشَتِّ عَمُودِيَّةً عَلَى الْمُسْتَوَى الْمَحْدَدِ بِاتِّجَاهِ الضَّوْءِ السَّاقِطِ وَاتِّجَاهِ الضَّوْءِ الْمَتَشَتِّ - الشَّكْلُ ١١ .

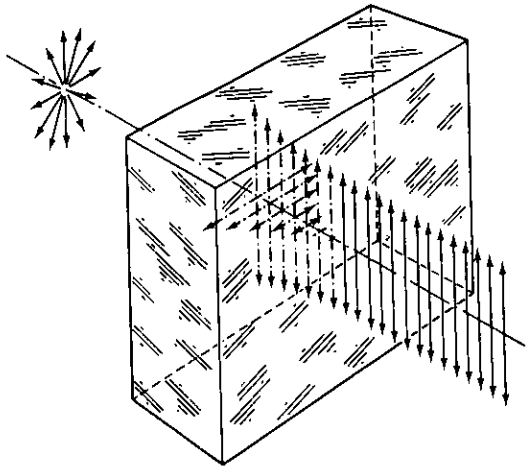


الشكل ١١: الاستقطاب بالتشتت

وكما دُكر سابقاً يُحدِثُ الضوءُ اهتزازاتٍ في كلِّ الاتجاهاتِ المتعامدة على اتجاه انتشاره. ولَمَّا كانت المادةُ المهتزة لا تُشعُّ في اتجاه اهتزازها لأنَّ أمواج الضوء مستعرضة لا طولية، فإنَّ المشاهدَ عندَ نقطة S لا يستقبلُ إلاَّ الضوءَ الصادرَ من المادة التي تهتزُّ إلى الأعلى وإلى الأسفل كما هو ظاهرٌ في الشكل. وهذا الضوءُ إذاً هو ضوءٌ مستقطبٌ خطياً. وتُظهرُ الدقائقُ الصغيرةُ نسبةً إلى الطول الموجي للضوءِ هذه الظاهرةَ بوضوح. أما الدقائقُ الكبيرةُ فإنَّ درجةَ استقطابِ الضوءِ المشتتِ منها أقلُّ. ويَظهرُ الاستقطابُ بالتشتتِ واضحاً في الضوءِ الذي تَستقبلُه من السماء، وهي ظاهرةٌ عرَفَها أراجو Arago في وقتٍ مبكرٍ عامَ ١٨١١، ويمكنُ التحققُ منها بسهولةٍ بالنظرِ إلى السماءِ عَبْرَ مِرْشَحةٍ استقطابٍ توضعُ أمامَ العينِ وتدارُ حيثُ تَبْدُو السماءُ ساطعةً ومعتمةً بصورةٍ دوريةٍ تبعاً لزاويةِ سَمَتِ المِرْشَحةِ، ويقعُ الاستقطابُ الأقصى في اتجاهٍ يبعدُ ٩٠° عن اتجاهِ الشمسِ.

الاستقطاب بالامتصاص الانتقائي Polarization by selective absorption

يشاهدُ الاستقطابُ بالامتصاصِ الانتقائي في بعضِ البلوراتِ التلوانية كالتورمالين tourmaline. فعندما يَسْقُطُ الضوءُ غَيْرُ المستقطبِ كما في الشكل ١٢ على شريحةٍ رقيقةٍ من



الشكل ١٢: الاستقطاب بالامتصاص الانتقائي

التورمالين المقطوعة بحيث يُوازي وَجْهَهَا المحورَ البصريَّ لِلْبَلُورَةِ، يَنْقَسِمُ الضوءُ إلى مكونتين متعامدتين مستقطبتين خطياً: إحداهما وهي المكونة ذات الاهتزاز الأفقي في الشكل تُمتَصُّ بقوة، بينما المكونة الأخرى تَنْقُذُ من دونِ خسارةٍ كبيرة. ومن ثَمَّ يَكُونُ الضوءُ الخارجُ من البلورة مستقطباً خطياً. وقد اكتشف هيراباث * Herapath عام ١٨٥٢ أنَّ بلورات فَوْقَ أيوديد كبريتات الكينين quinine sulfate periodide التي سميت بعد ذلك بالهيراباثيت هي بلورات تلوانية، وأنها تَمْتَصُّ تماماً الضوءَ المستقطبَ في اتجاه واحد إذا ما وُجِدَتْ في سُمْكِ مناسب. وقد انْتَبَهَ بروستر الذي كانَ يُعِدُّ وَقْتَهَا كِتَاباً عن الكاليدوسكوب إلى اكتشاف هيراباث. كذلك اهتمَّ أي. هـ. لاند E.H. Land الذي كانَ طالبا في ذلك الوقت في كلية هارفارد من خلال قراءة هذا المرجع بهذا الاكتشاف، وَتَمَكَّنَ بعدَ سنواتٍ قليلةٍ من إيجاد طريقةٍ لِتَثْبِيتِ بلورات الهيراباثيت الصغيرة ذات الشكل الإبري وترتيبها في نسيج من أَسِتات السليلوز أو البوليفينيك مُكوِّناً بذلك مادةً جديدةً تُعرَفُ الآنَ بالبولارويد Polaroid *** . وفي أيامنا هذه يَجِدُ البولارويد استخداماً واسعاً في مئات من التطبيقات وَهُوَ يُعرَفُ بأنَّه مستقطبٌ فعالٌ واقتصاديٌّ، وَتَصِلُ فعاليتهُ أَقصاها عِنْدَ كُلِّ من الضوءِ الأخضرِ والأصفرِ.

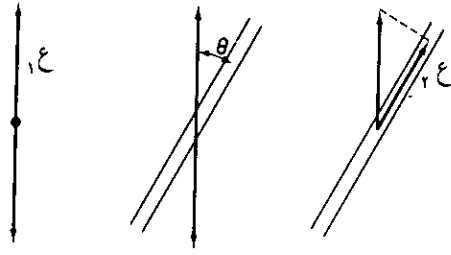
قانون مالوس Malus' Law

يُعْنَى قانونُ مالوس بالتغير الحاصل في شدة الضوء المار من محللة بدلالة الزاوية التي يصنعها مُستوى الإنفاذ للمحللة مع مستوى النَّفاذِ لِلْمُسْتَقْطَبَةِ. تَحَيَّلْ أَنَّكَ تَنْظُرُ مباشرةً إلى شعاعٍ ضوئيٍّ مستقطبٍ خطياً في الاتجاه الرأسي - الشكل ١٣ إلى اليسار. دَعْنَا نُسمِّعُ $\vec{E}$ سعة اهتزاز الضوء، ولنفترض أنَّ الضوءَ يَسْقُطُ على محللة مستوى إنفاذ الأشعة فيها يَصْنَعُ مع $\vec{E}$ زاوية θ - الرسم في الوسط. ولكي نَجِدَ سعة الضوء النافذ $\vec{E}'$ نَرْسُمُ من رأسِ سَهْمِ المتجه $\vec{E}$ عموداً على مستوى الإنفاذ كما في الرسم إلى اليمين - الشكل ١٣. وكما هو

*William Bird Herapath, "On the Optical Properties of a newly-discovered Salt of Quinine, which crystalline substance possesses the power of polarizing a ray of Light, like Tourmaline, and at certain angles of Rotation of depolarizing it, like Selenite," *Phil. Mag.* (4) 3 (1852), 161-73.

** لمزيد من التفاصيل عن هذا الاكتشاف انظر:

E. H. Land, "Some Aspects of the Development of Sheet Polarizers," *J. Opt. Soc. Am.* 41 (1951), 957-63.



الشكل ١٣ : اشتقاق قانون مالوس

واضح فعندما تكون $\theta = 0^\circ$ ، فإن $E_2 = E_1$ ؛ وعندما تكون $\theta = 90^\circ$ ، فإن $E_2 = 0$.
أما القيم المتوسطة لـ E_2 فتعطى بالمعادلة: $E_2 = E_1 \cos^2 \theta$ ولما كانت الشدة هي
مربع السعة، نجد أن:-

[٣-١:٣]

.....

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta$$

وهو قانون مالوس+. إن أي امتصاص بالمستقطبات سيضيف إلى المعادلة السابقة ثابتاً،
ولكنه لا يُغيّر من اعتماد الشدة النسبية على $\cos^2 \theta$ ؛ ولذا يصح في هذه الحال قانون
مالوس بصراية.

الاستقطاب بالانكسار المزدوج Polarization by double refraction

أعمل نقطة سوداء على ورقة ثم ضَع فوقها بلورة من السّبار الأيسلندي Iceland Aspar.
وإذا ما نظّرت إلى النقطة عبْر البلورة فانك ترى نقطتين بدلاً منها. وبإدارة البلورة تظل
إحدى هاتين النقطتين ثابتة وهي النقطة التي تتكوّن بالشعاع العاديّ ordinary، أما
النقطة الأخرى التي تتكوّن بالشعاع فوقّ العاديّ extraordinary فتدور حول النقطة
الثابتة.

وبهذه الكيفية اكتشف بارثولنوس Bartholinus عام ١٦٦٩ الانكسار المزدوج في
السّبار الأيسلندي التي هي بلورة شفافة من الكالسيّت $CaCO_3$. وقد وجد هيجنز فيما بعد

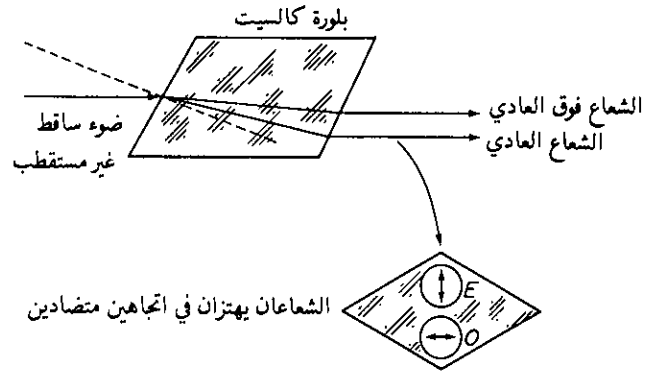
+ اتيان لويس مالوس (١٧٧٥-١٨١٤): مهندس في الجيش الفرنسي. لاحظ مالوس في إحدى
الامسيات وهو في بيته في شارع إنفر في باريس أن ضوء الشمس ينعكس مائلاً من نوافذ قصر
لوكسمبرج بوساطة قطعة من السّبار الأيسلندي، ووجد أن الصورتين المكونتين بالكالسيّت
(السّبار) تتغيران في شدتهما النسبية كلما ادار البلورة (السّبار) حول خط النظر.

• اراسموس بارثولنوس (١٦٢٥-١٦٩٨): استاذ الرياضيات والطب في جامعة كوبنهاجن. وقد

وصف اكتشافه هذا في نشرة من ٦٠ صفحة عام ١٦٧٠.

أنَّ الضوءَ الَّذِي يُكوِّنُ الصورتين هو ضوءٌ مُستقطَّبٌ خطياً في مستويين متعامدين . ويمكننا التأكد من ذلك بالنظرِ عبرَ مرشحةٍ مستقطِبةٍ تُضافُ الى بلورة الكالسيت . وتُظهرُ كثيرٌ من البلورات كالـتورمالين، الكوارتز، الميكا، السكر، والثلجِ هذه الظاهرة، وتسمى هذه البلوراتُ بلوراتٍ متباينة الخصائص anisotropic . وعلى خلاف ذلك فـللمادة ذات الخصائص المتجانسة isotropic معاملُ انكسارٍ واحدٍ لا يعتمدُ على الاتجاه . إنَّ معظمَ الغازاتِ، السوائل، والجوامد غير البلورية كالزجاج غير المُجهَّد Unstressed هي موادٌ متجانسة الخصائص .

وَيَكُونُ للضوء في البلورة الكاسرة الثنائية أو ذات الانكسار المزدوج سرعٌ مختلفةٌ تبعاً لاتجاهِ مُستوى الاهتزاز . وعندما يُمرَّرُ ضوءٌ عاديٌّ غيرُ مستقطَّبٍ عبرَ بلورةٍ كاسرةٍ ثنائيةٍ فإنه يُنْفَصِلُ إلى قِسْمَيْنِ : ينكسران انكسارين مختلفين وَيَصْبَحَانِ مستقطبتين بزوايتين سَمَتَيْنِ مختلفتين . وَيَقْدَمُ الشكلُ ١٤ مثلاً على ذلك .

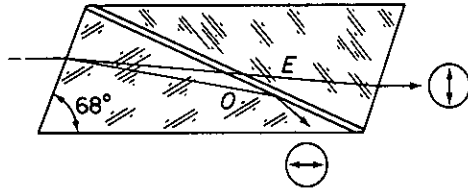


الشكل ١٤ : الانكسار المزدوج واستقطاب الضوء من بلورة الكالسيت

وَلَمَّا كَانَ قَلَمًا الأشعة الصادران من بلورة الكالسيت مستقطبتين خطياً في اتجاهين متعامدين، فإن هذه البلورة تَعْمَلُ مستقطِبةً جيدةً إذا ما أُمكِنَ فقط حذفُ أحدِ القلَمين، وهذا ما يتمُّ عملهُ تماماً في موشور نيكول Nicol prism .

موشور نيكول

يُصنَّع موشور نيكول* من السَّابَرِ الايسلندي الذي يُقَطَّع على مُستوى عمودي على المستوى الذي يحوي محور البلورة والعمود المقام على وجهيها الجانبيين، ثُمَّ يَصْقَلُ نِصْفَا البلورة وَيُلَحَمَانِ معاً بطبقة رقيقة من بِلْسَمِ كندا - الشكل ١٥. وعلاوة على ذلك يُنْقَصُ الوجهان



الجانبين بحيث يعمل كل منهما في المقطع الاساسي زاوية ٦٨° بدل الزاوية ٧١°. وكما قيل سابقاً تُفَصَّلُ حزمة الضوء غير المستقطب إلى شعاع عادي وشعاع فوق عادي. وَيُكْسَرُ الشعاع العادي (إلى الأسفل) أكثر من الشعاع فوق العادي، وهو يسقط على بِلْسَمِ كندا بزاوية أكبر من مثيلتها للشعاع فوق العادي. ولكن لما كان معامل انكسار بِلْسَمِ كندا يتوسط في قيمته مُعاملَي انكسار الكالسيت لكل من الشعاعين العادي وفوق العادي (وبالترتيب ١,٦٦، ١,٥٥، ١,٤٩)، فإن الشعاع فوق العادي يمر في حين أن الشعاع العادي لا يمر؛ اذ يعاني انعكاساً كلياً، ويُنْتَصَّ بالطلاء الأسود، وبالتالي لا يخرج من الموشور إلا الشعاع فوق العادي.

و موشورات نيكول مُستقطبات جيدة، إلا أنها غالية الثمن وذات مجال نظر محدود (٢٨)؛ ويُعزى ذلك، عندما يكون الضوء غير متوازٍ تماماً، إلى أن الشعاع العادي يسقط على بِلْسَمِ كندا بزاوية أقل من الزاوية الحرجة مما يتسبب في نفاذه من الموشور، أو إلى أن الشعاع فوق العادي ينعكس كلياً ومن ثم يضيع.

ولموشور جلان - ثومسون Glan-Thompson فتحة زاوية أوسع (٤٠) من موشور نيكول، ولكنه يستخدِم كمية أكبر من الكالسيت؛ وأما في موشوري روشون Rochon و وولاستون

* نسبة الى وليم نيكول William Nicol (١٧٦٨-١٨٥١): الفيزيائي الاسكتلندي.

wollaston فإنَّ كلا الشعاعين العاديَّ وفوقَ العاديَّ ينفذُ جنباً إلى جنب .

وتعرَّف القيمةُ العدديةُ للكسرِ المزدوجِ بأنها الفارقُ بينَ مُعاملَي الانكسارِ للشُعاعينِ العاديِّ وفوقَ العاديِّ، وهي تُساوي نسبةَ الإبطاء في الطورِ Γ إلى طولِ المسارِ الهندسيِّ لـ :-

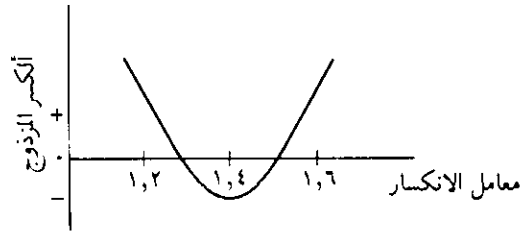
$$\text{ألكسرُ المزدوجُ} = \omega - \varepsilon = \frac{\Gamma}{L} \dots\dots [٤-١:٣]$$

الانكسار المزدوج البلّوري Crystalline birefringence

يُعزى الانكسارُ المزدوجُ البلّوريُّ أو الجوهريُّ إلى الترتيبِ غيرِ المتجانسِ للذراتِ أو الجُزئيات، وهو لا يتوقفُ على الوسطِ المُحيط. ومن الامثلةِ على ذلك البلوراتُ ذاتُ الخصائصِ غيرِ المتجانسةِ والعديدُ من الموادِّ الحيةِ كالكولاجين و السليولوز والألياف العضلية؛ إذ يُظهرُ التركيبُ الجزيئيُّ اتجاهاً تفضيلياً، وهي تتجمعُ بكثافةٍ عاليةٍ إلى درجةٍ أنَّ جزيئاتِ السائلِ لا تستطيعُ اختراقَ هذا التركيبِ.

الانكسار المزدوج الشكلي Form birefringence

وفي هذا النوع من الانكسارِ، تُوزعُ الوُحَدَاتُ الأساسيةُ (المُذَيَّلَاتُ micelles) التي لها معاملُ انكسارٍ معين في اتجاهاتٍ مفضّلةٍ داخلَ نسيجٍ ذي مُعاملِ انكسارٍ مختلفٍ، ولا يُشترَطُ أن يكونَ للوُحَدَاتِ الأساسيةِ أو النسيجِ كسرٌ مزدوجٌ - الشكل ١٦. ولمعرفة نوع الكسرِ



الشكل ١٦: منحنى الكسر المزدوج الشكلي، ويظهر هنا الكسر المزدوج الشكلي الموجب والبلوري السالب

المزدوج الحاصل، تُغمَرُ العينَةُ بالتعاقبِ في سوائِلٍ لها مُعاملاتُ انكسارٍ متزايدة؛ وإذا ما تَخَلَّلَ السائلُ الوُحَدَاتِ الأساسيةَ حالاً بذلك مَحَلَّ النسيجِ الأصليِّ يتغيَّرُ الكسرُ المزدوجُ

الشكلي. و يرسم الكسر المزدوج في مقابل مُعامل انكسار الوسط يظهر منحنى مقعر إلى الأعلى يدل على كسر مزدوج شكلي موجب كما في الشكل، ويدل المنحنى المحدب إلى الأسفل على كسر مزدوج شكلي سالب. وحيثما يقطع المنحنى المحور السيني، يكون للوحدات الأساسية نفس معامل الانكسار الذي للسائل، ويختفي الكسر المزدوج الشكلي. وفي الرسم المبين تظهر النهاية الصغرى أسفل المحور السيني دالةً بذلك على وجود مزيد من الكسر المزدوج البلوري (السالب)؛ ولَوْ كَانَ المنحنى خطاً أفقياً، لَمَا تَخَلَّلَ السائل الوحدات الأساسية، ولَمَا ظَهَرَ أَيُّ كَسْرٍ مزدوج شكلي.

الاستقطاب والتداخل

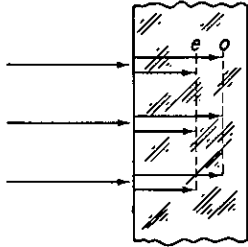
يُعطي الضوء المستقطب كذلك تداخلاً، ولكنه لا يحدث إلا تحت شروط محددة تُعرف بقوانين **فِرْنَل - أراجو (Fresnel-Arago)** :-

- ١ . لا تتداخل حزمتان ضوئيتان: كُلُّ منهما مستقطبةً خطياً، وَتَهْتَزُّ في مُستوى متعامدٍ على مستوى اهتزاز الأخرى .
- ٣ . تتداخل أية حزمتين ضوئيتين مستقطبتين خطياً وَتَهْتَزَّان في مستوى واحد .
- ٣ . لا تتداخل أية حزمتين ضوئيتين مستقطبتين خطياً حُصِلَ عليهما أضلاً من المكونين المتعامدين لضوء غير مستقطبٍ ثَمَّ جعلنا تهتزَّان في مستوى واحد .
- ٤ . تتداخل أية حزمتين ضوئيتين مستقطبتين خطياً حُصِلَ عليهما من أجزاء متحالفةٍ من الضوء ثَمَّ جُعِلتا تهتزَّان في مستويين متعامدين، وَمَعَ ذَلِكَ فَقَدْ يَنْتُجُ في هذه الحالة درجاتٌ مختلفةٌ من الإهليلجية كما سَتَرَى بَعْدَ قَلِيلٍ .

تحليل الضوء ذي الاستقطاب المجهول

إذا كَانَ الضوءُ مستقطباً خطياً تماماً وَسَقَطَ على مِرْشَحةٍ استقطابٍ تدورُ حولَ محورِها فَإِنَّ مقدارَ الضوءِ النافذِ يَتَغَيَّرُ مِنْ قِيَمَةٍ قُصْوَى إلى الصفر؛ ولكنْ إذا اشْتَمَلَ الضوءُ المارُّ من المِرْشَحةِ على بعضِ الضوءِ غَيْرِ المستقطبِ فلا نَجْدُ وضْعاً للمِرْشَحةِ يَنعَدُمُ فيه الضوءُ تماماً.

ويحدث نفس الشيء لو أضيف بدل الضوء غير المستقطب ضوء مستقطب دائرياً. فكيف يمكننا إذن أن نميز الضوء المستقطب دائرياً من الضوء الطبيعي غير المستقطب؟ إذ في كلا الحالتين لا يظهر دوران المرشحة حول محورها أي تأثير.



الشكل ١٧ : إبطاء الضوء
المر في بلورة كاسرة مزدوجة
موجبة كالكوارتز.

ونستطيع حل هذه المشكلة باستخدام جهاز بسيط نسبياً هو شريحة ربع الموجة $\lambda/4$ plate أو **مُعوَض سنار مونت Senarmont**. وتُصنع شريحة ربع الموجة $(\frac{\lambda}{4})$ التي يفيد استخدامها في أغراض عدة من مادة لها معامل انكسار تختلف قيمته لاتجاهين متعامدين للضوء. فكل الشعاين العادي وفوق العادي يسير في نفس الاتجاه، غير أن إحدى الجبهتين الموجيتين تتقدم على الأخرى بمسافة تغطم على سُمك البلورة - الشكل ١٧؛ ومن ثم يُختار السمك بحيث يتقدم الشعاع العادي لطول موجي معين (طول خط الصوديوم الأصفر عادة حيث $\lambda = 589$ nm) على الشعاع فوق العادي بـ 90° أو $\frac{1}{4}$ طول موجي. وإذا كان الفارق في المسار $\Gamma = \frac{1}{4} \lambda$ ، نحصل بدل شريحة ربع الموجة على شريحة نصف الموجة.

مثال:

يراد صنع شريحة ربع الموجة من الكوارتز؛ فما سُمك الشريحة إذا استخدمت مع ضوء الصوديوم؟ مُعاملا الانكسار لها هما $1,544$ ، $1,553$.

الحل:

لما كان طول المسار البصري $v = L$ ، فإن فارق المسارين الشعاعين العادي وفوق العادي بعد خروجهما من البلورة هو: $\Gamma = L(\omega - \epsilon)$ ، وفارق الطور هو: $\delta =$

$$L \frac{2\pi}{\lambda} (\omega - \epsilon).$$

وإذا كان قيمة فارق الطور المطلوبة هي: $\delta = \frac{\lambda}{4} = \frac{2\pi}{4}$ ، فإن:-

$$\frac{2\pi}{4} = L \frac{2\pi}{\lambda} (\omega - \epsilon), \text{ أي: -}$$

$$\frac{\lambda}{4} = L(\omega - \epsilon), \text{ أو: -}$$

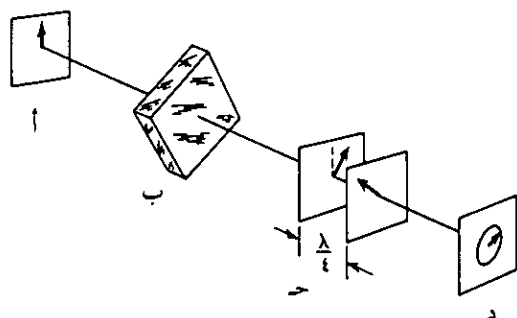
*Henri Hureau de Sénarmont (1808-1862), *Ann. Chim. Phys. Serié 2* 73 (1840),

$L = \frac{\lambda}{(\omega - \varepsilon)} ;$ وَبَتَعَوِيضِ الأرقامِ المعطاةِ نَحْصُلُ عَلَى سُمِكِهِ هُوَ:-

$$L = \frac{589 \times 10^{-6} \text{ م}}{(1,053 - 1,044)} = 0,016 \text{ م}$$

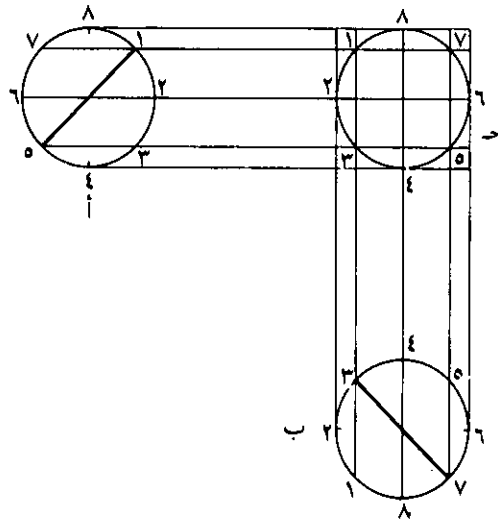
شريحة ربع الموجة Quarter-Wave Plate

يَمَكُنُ الحَصُولُ عَلَى فَهْمٍ أَفْضَلٍ لِعَمَلِ شَرِيحَةِ رُبْعِ المَوْجَةِ مِنَ المِثَالِ التَّالِيِ: افْتَرَضْ ضَوْءٌ مُسْتَقْطَباً فِي الاتِّجَاهِ الرَّأْسِيِّ - الرِّسْمُ أ فِي الشَّكْلِ ١٨، وَأَنَّهُ يَسْقُطُ عَلَى شَرِيحَةِ رُبْعِ المَوْجَةِ (ب). فَعِنْدَ خُرُوجِ الضَّوءِ مِنَ الشَّرِيحَةِ يَصُلُّ المُنْتَجَةُ الكَهْرَبَائِيَّةُ لِكَلَا الشَّعَاعَيْنِ العَادِيَّيْنِ وَفَوْقَ العَادِيَّيْنِ إِلَى سَعَتَيْهِ القَصْوَى فِي مَسْتَوَيْنِ يَبْعَدَانِ عَنْ بَعْضِهِمَا مَسَافَةً $\frac{\lambda}{4}$ ؛ وَلِذَا يَكُونُ لَنَا حَقِيقَةً حَزْمَتَانِ ضَوْئِيَتَانِ تَنْتَشِرَانِ فِي اتِّجَاهٍ وَاحِدٍ وَهُمَا مُسْتَقْطَبَتَانِ خَطِيئًا وَمُتَعَامِدَتَانِ وَمُزَاحَتَانِ فِي الطَّوْرِ بِمَقْدَارٍ $\frac{\lambda}{4}$ أَوْ ٩٠°.



الشكل ١٨: تفسير عمل شريحة ربع الموجة

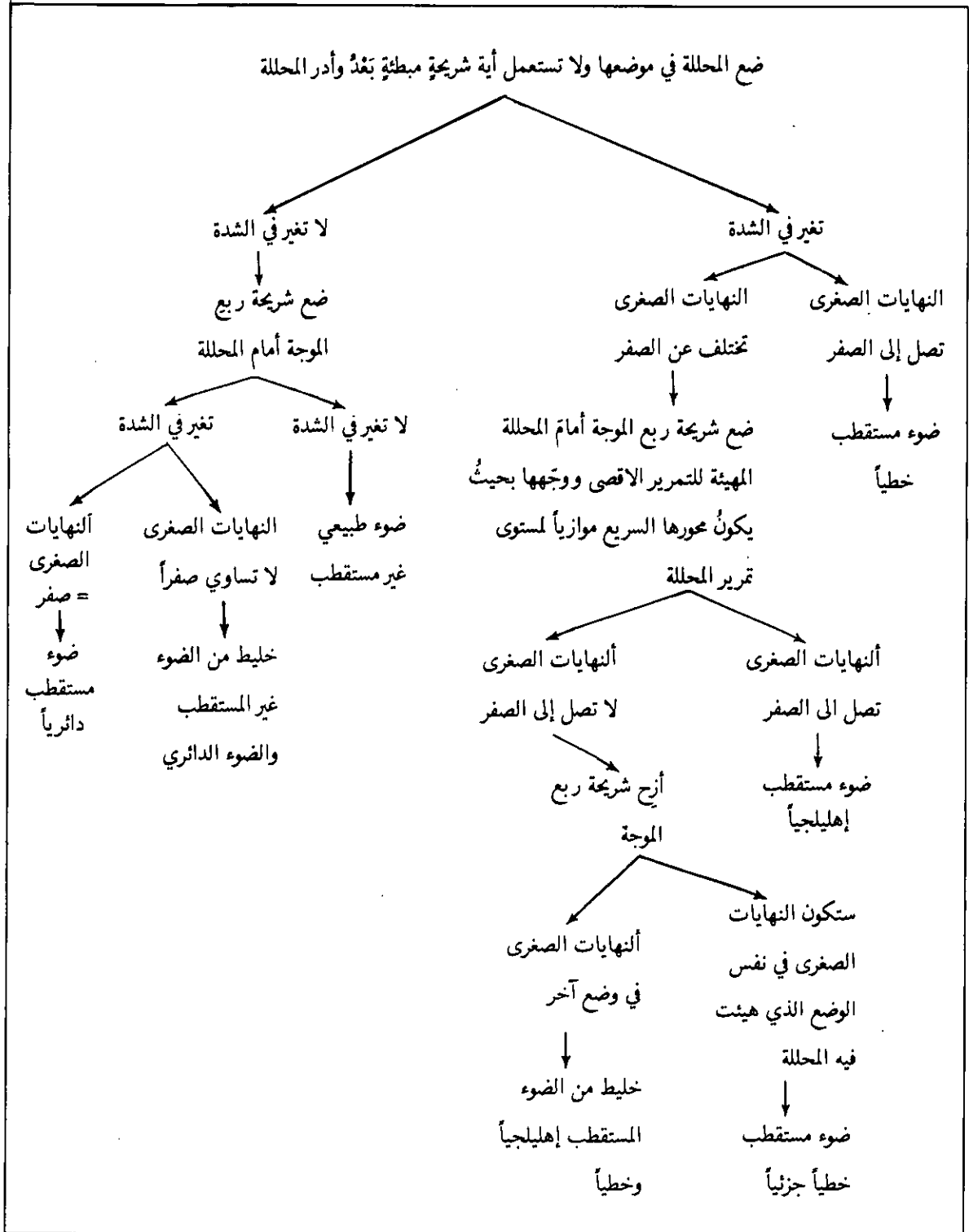
دَعْنَا نُمَثِّلُ الاهْتِزَازَاتِ فِي الحَزْمَتَيْنِ الضَّوئِيَّتَيْنِ بِدَائِرَتَيْنِ مَرْجِعِيَّتَيْنِ أ، ب فِي الشَّكْلِ ١٩. وَيُشَارُ إِلَى مَسْتَوِيي الاهْتِزَازِ فِي هَاتَيْنِ الحَزْمَتَيْنِ بِالْخَطَّيْنِ الغَامِقَيْنِ فِي أ وَ ب اللَّذَيْنِ هُمَا مُتَعَامِدَانِ. وَلِنَفْتَرِضَ بَعْدَ ذَلِكَ أَنَّ التَّشَكِيلَةَ المَوْجِيَّةَ تَبْدَأُ مِنَ النِّقْطَةِ رَقْمِ ١ فِي الدَّائِرَةِ أ الَّتِي تَتَزَامَرُ مَعَ السَّعَةِ القَصْوَى فِي اتِّجَاهٍ مَا وَأَنَّ المَوْجَتَيْنِ المَكُونَتَيْنِ تَتَفَصَّلَانِ مَسَافَةً $\frac{\lambda}{4}$ ؛ وَلِذَا لَا تَبْدُو النِّقْطَةُ رَقْمِ ١ فِي الدَّائِرَةِ ب فِي سَعَتَيْهَا القَصْوَى إِذْ أَنَّهَا تَنْفَصِلُ عَنْهَا بِمَسَافَةٍ $\frac{\lambda}{4}$ عَاطِلًا عَنِ الدَّائِرَةِ.



الشكل ١٩: ضم حركتين موجيتين متعامدتين: فارق الطور بينهما ٩٠°.

وَتُظْهَرُ مَحْصَلَةُ هَاتَيْنِ الْمَوْجَتَيْنِ فِي الدَّائِرَةِ جـ، حَيْثُ جُمِعَتِ النِّقَاطُ الْمُتَمَاثِلَةُ فِي الدَّائِرَتَيْنِ أ، ب: (١ + ١، ٢ + ٢، ... الخ) لِلْحَصُولِ عَلَى الدَّائِرَةِ جـ. وَيَعْنِي هَذَا أَنَّ تَرَاكُبَ اسْتَقْطَابَيْنِ خَطَّيْنِ مُتَعَامِدَيْنِ لِهَمَا سَعَةً وَاحِدَةً وَبَيْنَهُمَا فَارَقُ طَوْرِ مَقْدَارُهُ ٩٠° يُعْطِي ضَوْءً مُسْتَقْطَباً دَائِرياً، وَنَحْصِلُ عَلَى ضَوْءٍ ذِي إِهْلِيلِيَّاتٍ مُخْتَلِفَةٍ عِنْدَ اخْتِيَارِ اتِّجَاهَاتٍ أُخْرَى وَفَوَارِقَ فِي الطَّوْرِ مُخْتَلَفٍ عَنِ ٩٠°. وَنَذْكُرُ هُنَا تَارِكِينَ الْبَرْهَانَ لِلْقَارِئِ أَنَّ الضَّوْءَ الْمُسْتَقْطَبَ خَطِياً يُمَكِّنُ اعْتِبَارَهُ مَحْصَلَةَ اسْتَقْطَابَتَيْنِ دَائِرَتَيْنِ لِهَمَا سَعَةً وَاحِدَةً وَاتِّجَاهاً دَوْرَانِ مُتَعَاكِسَانِ؛ وَبَصُورَةٍ عَامَةٍ يُمْكِنُ اعْتِبَارُ أَيَّةِ مَوْجَةٍ مُسْتَقْطَبَةٍ إِهْلِيلِيَّاً أَنَّهَا مَحْصَلَةُ مَوْجَتَيْنِ مُسْتَقْطَبَتَيْنِ دَائِرِيَّاتٍ وَمُتَعَاكِسَتِي الْإِتِّجَاهِ وَبَسْعَتَيْنِ مُخْتَلِفَتَيْنِ. وَبِالْعُودَةِ إِلَى سَوَالِنَا الَّذِي ابْتَدَأْنَا بِهِ نَجِدُ أَنَّهَا نَسْتَطِيعُ بِاسْتِخْدَامِ مُسْتَقْطَبَةٍ وَشَرِيحَةٍ رُبْعِ الْمَوْجَةِ أَنْ نُحَلِّلَ أَيَّ ضَوْءٍ مَجْهُولِ الْاسْتَقْطَابِ. وَنَعْرِضُ فِي الْجَدْوَلِ (١) الطَّرِيقَةَ الصَّحِيحَةَ لِذَلِكَ.

الجدول رقم ١: تحليل ضوء ذي استقطاب مجهول



جبر مصفوفات الاستقطاب Matrix Algebra of Polarization

يُعينُ جَبْرُ المصفوفات كما في البصريّات الهندسيّة تماماً في وَصْفِ خصائصِ الضوءِ المستقطبِ وتفاعليهِ مع أنواعٍ متعدّدةٍ من المستقطباتِ والشرائحِ مُبطّئةِ الطورِ والعناصرِ المشابهةِ لَهَا؛ ويوجدُ هنالك منحنيان عامّان يتداخلان جزئياً ولكنهما معاً ذلك يُتَمَمَانِ بَعْضُهُمَا بعضاً. وَيُبنى حسابُ تفاضلي وتكاملي فيولر Mueller calculus على وَصْفِ ظاهراتي: فهو يشتملُ على الضوءِ غَيْرِ المستقطبِ، لكنّه يتطلبُ مصفوفاتٍ أكبرَ (4×4)؛ أمّا حسابُ تفاضلي وتكاملي جونز Jones فيُشتقُّ من الوصفِ الرياضي لِرتلٍ موجيّ مستقطبٍ أحاديّ الموجة، وله مصفوفاتٌ أصغرُ (2×2)، غَيْرُ أنّ بَعْضَهَا يَحْتَوِي على الأعدادِ المركبة.

حساب تفاضلي وتكاملي فيولر Mueller Calculus

في حسابِ فيولر تُلَخَّصُ كُلُّ الخصائصِ الضروريةِ للضوءِ في أربعةِ مُتجهاتٍ تُعرَفُ بِمتجهاتِ ستوكس Stokes' vectors، وهي المتجهاتُ I، M، C، S التي تُعرَفُ بالترتيبِ الشدّة، تَفْضِيلُ الاستقطابِ الأفقي، تَفْضِيلُ الاستقطابِ +٥٠°، وتَفْضِيلُ الاستقطابِ الدائريّ الأيمن. وتُكْتَبُ هذه المتجهاتُ في صيغةِ مُتجهٍ عمود Column vector :

$$\begin{bmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{bmatrix}$$

وتُكْتَفُ خصائصُ المستقطبةِ والشرحيّةِ مبطّئةِ المَوْجَةِ أو أيّ عناصرٍ أخرى في مصفوفةِ 4×4 تُعرَفُ بمصفوفةِ فيولر. وتحتوي هذه المصفوفةُ على (١٦) عنصراً، غَيْرُ أنّ معظمها لِحُسْنِ الحِظِ أصفارٌ. وكما هي الحالُ دائماً في عملياتِ المصفوفاتِ، تُكْتَبُ المصفوفةُ العموديّةُ التي تُمثّلُ الضوءَ الساقطَ على اليمينِ والمصفوفاتُ المتعاقبةُ التي تمثلُ العناصرَ المتعدّدةَ التي تَعْتَرِضُ الضوءَ بترتيبها الصحيح إلى اليسار.

مثال:

يَسْقُطُ ضوءٌ غيرُ مستقطبٍ شدّتهُ وَحْدَةٌ واحدةٌ على مستقطبةٍ خطيّةٍ مثاليّةٍ* : مَحْوَرُ تَمْرِيرِهَا

* توجد مصفوفات فيولر لعدد كبير من المستقطبات ولعناصر أخرى في كتيبات (مقالات) عن الضوء المستقطب، فعلى سبيل المثال انظر: و. إي. شيركلييف W. A. Shurcliff : «الضوء المستقطب: انتاجه واستخدامه» (كامبردج، مساشوستس: مطبعة جامعة هارفارد، ١٩٦٢).

أُفْقِيٌّ . وَنَحْصُلُ مِنَ الْيَسَارِ إِلَى الْيَمِينِ عَلَى :-

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

وَنُضْرِبُ هَاتَانِ الْمَصْفُوفَتَانِ بِضَرْبِ كُلِّ عُنْصُرٍ فِي الْمَصْفُوفَةِ الْعَمُودِيَّةِ بِالترتيبِ فِي كُلِّ عَمُودٍ فِي الْمَصْفُوفَةِ 4×4 . وَهَكَذَا نَحْصُلُ عَلَى :-

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \text{والتي تساوي} \quad \begin{bmatrix} (0)(0) + (0)(0) + (0)\frac{1}{4} + (1)\frac{1}{4} \\ (0)(0) + (0)(0) + (0)\frac{1}{4} + (1)\frac{1}{4} \\ (0)(0) + (0)(0) + (0)(0) + (1)(0) \\ (0)(0) + (0)(0) + (0)(0) + (1)(0) \end{bmatrix}$$

وَلأنَّ العنصرَ الأولَ يساوي $\frac{1}{4}$ ، فإنَّ الشعاعَ الخارجَ له شدةٌ تساوي $\frac{1}{4}$. إنَّ الحدَّ الثاني موجبٌ ويدلُّ على تفضيلٍ للاستقطابِ الأفقيِّ ؛ أمَّا الحدَّانِ الأخيرانِ فهما صفر . ويكون للشعاع الخارج $\frac{1}{4}$ شدة الشعاع الساقط ، وهو مستقطبٌ خطياً في الاتجاه الأفقي .

حساب تفاضل وتكامل جونز

يمكنُ استخدامُ حسابِ جونز في إحدى صيغَتَيْنِ تبعاً لحاجتنا إلى معرفة طَوْرِ الضوء ؛ وإذا لزمنا الطورُ يوصَفُ الضوءُ بِمُتْجِهَاتِ جونز الكاملة التي تُشْتَقُّ كما قيلَ سابقاً من التعبيرِ الأساسيِّ للموجةِ أحادية اللون . ولذا نَحْصُلُ للضوءِ المستقطبِ خطياً والمهتزِّ في اتجاهٍ أفقيٍّ على المصفوفةِ العمودية :-

$$\begin{bmatrix} E \text{ و } \delta i \text{ ع} \\ 0 \end{bmatrix}$$

وإذا لم تلزمنا معلومات عن طور الضوء، نقسم المتجه السابق على العدد المركب المناسب حاصلين بذلك على المتجه [١] للضوء المستقطب خطياً في اتجاه أفقي، وهو الصورة المبسطة أي الصورة المقلنة المسواة standard normalized لمتجه جونز. وكذلك يمثل المتجه [١] ضوءاً مستقطباً خطياً في الاتجاه الرأسي؛ أما المتجه [١/√٢] أو [١] فيمثل ضوءاً مستقطباً في اتجاه ٤٥° مع الأفقي. ويوصف الضوء الدائري بالمتجه [١] للاستقطاب الأيمن وبالمتجه [١] للاستقطاب الأيسر. وإذا ما جمع الضوء المستقطب دائرياً بدورانيه الأيمن والأيسر، نحصل على :-

$$[٥-١:٣] \dots \dots \begin{bmatrix} ١ \\ ٠ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ٢ \\ ٠ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ١+١ \\ i+i- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ١ \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ١ \\ -i \end{bmatrix}$$

و يستفاد من النتيجة السابقة أن الضوء الحاصل المستقطب خطياً له سعة تبلغ ضعف سعة أي من الضوء المستقطب دائرياً المكوّن له.

وكما في السابق يُكتب متجه جونز للضوء الساقط إلى اليسار، ثم تكتب المصفوفة أو المصفوفات المناظرة للعناصر الواقعة في طريق المسار الضوئي؛ فترتيب المصفوفات هام. ثم تضرب المصفوفات وينتج عن ضربها متجه يصف الضوء الخارج. لنفترض أن [١] الضوء الساقط، [١] تمثل الضوء الخارج؛ فإننا نحصل على :-

$$[٦-١:٣] \dots \dots \begin{bmatrix} ١ \\ ب \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ا \\ ب \end{bmatrix} \begin{bmatrix} د \\ هـ \end{bmatrix}$$

حيث المصفوفة ٢×٢ هي مصفوفة جونز للعنصر المُعتبر. ونورد في الجدول ٢ عدة أمثلة على مصفوفات جونز.

أُجْدول ٢: مصفوفات جُونز المثلثة لعناصر مستقطبة مختارة

$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ i & 0 \end{bmatrix}$	شريحة ربع الموجة - المحور الثابت أفقي و $i/p/4$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	المستقطبة الخطية - محور التمرير أفقي
$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ i & 0 \end{bmatrix}$	- المحور الثابت رأسي و $i/p/4$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	- محور التمرير رأسي
$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	شريحة نصف الموجة - المحور الثابت 45°	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{2}$	- محور التمرير 45°
		$\begin{bmatrix} i & 1 \\ 1 & i \end{bmatrix} \frac{1}{2}$	المستقطبة الدائرية - اليمنى
		$\begin{bmatrix} i & 1 \\ 1 & i \end{bmatrix} \frac{1}{2}$	- اليسرى

إنَّ معظم المصفوفات الواردة في الجدول السابق هي مصفوفات من النوع المُبسَّط (المقنن). ونوردُ مثلاً على مصفوفة جُونز الكاملة المصفوفة الخاصّة بمستقطبة خطية مثالية في الاتجاه الأفقيّ:-

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda \text{ و } i-2 \text{ ط م أ} = \begin{bmatrix} 0 & \lambda \text{ و } i-2 \text{ ط م أ} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

حيثُ م معامل الانكسار للمستقطبة، أ سُمك المستقطبة، و λ الطول الموجي للضوء؛ وواضح أنَّ الصيغة الأسية تحتوي على معلومات عن الطور.

مثال ١:

يسقط ضوءٌ مستقطب خطياً في اتجاه أفقيّ على شريحة نصف الموجة الموجهة في اتجاه 45° مع الأفقي، فما استقطاب الضوء الصادر منها؟

نَحْصُلُ على الجواب باستخدام [١] للضوء الساقط. وبالرجوع إلى الجدول رقم ٢ نَحْصُلُ على مصفوفة جونز لشريحة نصفِ الموجة، ثم نجرى الضرب على النحو التالي :-

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

فالضوءُ الصادرُ إذاً هو ضوءٌ مستقطبٌ خطياً في الاتجاهِ الرأسي.

مثال ٢ :

وضعتُ شريحة ربع الموجة التي محورها الثابت أفقيٌّ في مسارِ حزمة ضوئية مستقطبة خطياً في اتجاه ٥٤° مع الأفقي؛ ما استقطابُ الضوء المارَّ منها؟

نستخدمُ للضوء الساقط بقطع النظرِ عن سَعَتِهِ المتجه [١]. ومن الجدول ٢ نَحْصُلُ على مصفوفة جونز المناظرة، ثُمَّ نجرى الضرب التالي :-

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ i & 0 \end{bmatrix}$$

ويعني ذلك أنَّ الضوءَ الصادرَ هو ضوءٌ مستقطبٌ دائرياً.

وإذا ما وضع أكثرُ من عُنصرٍ لتكثيفِ الضوء، فمن الممكنِ تجميعُ مصفوفاتٍ كُلِّ تلك العناصرِ في مصفوفة رتل العناصر؛ ويلزمُ عندها فقط ضربُ متجهِ الضوء الساقط بتلك المصفوفة للحصولِ بصورةٍ ملائمةٍ على خصائصِ الضوء الخارجِ مِنْ منظومةِ العناصرِ البصرية.

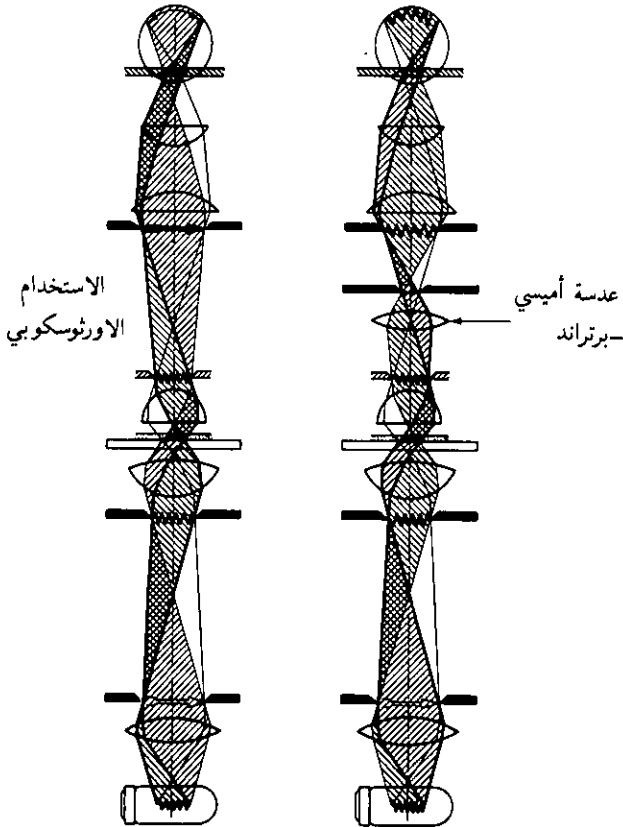
مِجَهَرَاتِ الاستقطابِ وَبَصَرِيَّاتِ البلورات

يُعَيَّنُ الوصفُ الموجزُ لبناءِ مجهرِ الاستقطابِ وعملِهِ في فَهْمٍ أَفْضَلٍ لأَوْجِهٍ عديدةٍ من الضوءِ المستقطبِ عُموماً، كذلك فَهوَ يُدْخِلُنَا إلى حَقْلِ بَصَرِيَّاتِ البلورات.

مجهر الاستقطاب The Polarization microscope

إنَّ إضافةَ عنصرين مستقطبتين: المستقطبة والمحللة ومنصة قابلة للدوران يُحوِّلُ الميكرسكوب (المجهر) المِخْبَرِيَّ إلى نوعٍ ابتدائيٍّ من مجهر الاستقطاب. وتوضع المستقطبة تحت المكثف، بينما توضع المحللة فوق الشيئية؛ وفي بعض الأحيان توضع المحللة ببساطة فوق العينية. كذلك يمكن إدارة إحدى المستقطبتين أو كليهما حيث تُقرأ درجة الدوران على مقياس خاص.

ويستخدم المجهر الاستقطابي كأي مجهر آخر للملاحظات الاعتيادية (الأورثوسكوبية)، وفحص المصدر الضوئي بدل الجسم (الفحص الكونوسكوبي) - الشكل ٢٠. ويلزم إضافة عدسة في منتصف المسافة بين العينية والشيئية تُسمى عدسة

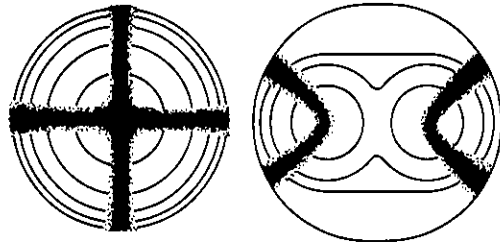


الشكل ٢٠: رسم شعاعي للاستخدام الاورثوسكوبي والاستخدام الكونوسكوبي لمجهر الاستقطاب.

أميسي-برتراند Amici-Bertrand * . وتبدو المادة المتجانسة في خصائصها معتمة عند وضعها بين مستطبتين متعامدين بغض النظر عن كيفية دورانها، أما المادة متباينة الخصائص أو الكاسرة المزدوجة فتمر في أربعة أوضاع من الانطفاء الأقصى: كل منها يبعد عن الآخر بمقدار ٩٠°.

الشكل المحوري البصري

تُلاحظُ الأشكالُ المحوريةُ البصريةُ في الترتيب الكونوسكوبيّ لمجهر الاستقطاب؛ إذ بعد التركيز على مجموعة من البلورات تدار المحللة للحصول على أقصى أعتام للخلفية أو الأرضية؛ ثم تحرك العينة المفحوصة ببطء، وعدسة أميسي-برتراند في موضعها، حتى يظهر شكل محوريّ بصريّ - كما في الشكل ٢١. ويفضل عادة استخدام شبيثة ذات فتحة عالية على الرغم من أنها تنقص قليلاً استقطاب الضوء. ما لم يُستخدم معها مقوّمَةٌ (مصححة) rectifier.



الشكل ٢١: تختلف الأشكال المحورية البصرية للبلورات الأحادية المحور والثنائية المحور اختلافاً واضحاً. الشكل إلى اليسار هو لبلورة أحادية مثل اليريل (حجر كريم أخضر) والشكل إلى اليمين هو لبلورة ثنائية مثل الميكا (المُسكوفيت).

وللبلورات ذات المحور الواحد معاملات انكسار أساسيان: ω ، ϵ ؛ أما البلورات ثنائية المحور فلها ثلاثة معاملات انكسار: α ، β ، γ (الجدول ٣). ويُعرّف الكسر المزدوج

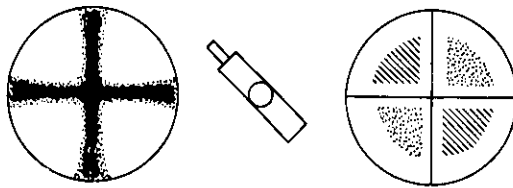
* جيوفاني باتيستا أميسي Giovanni Battista Amici (١٧٨٦-١٨٦٤): استاذ الرياضيات في جامعة مودينا (إيطاليا) الذي أصبح فيما بعد مدير المرصد الفلكي في المتحف الملكي للفيزياء والتاريخ الطبيعي؛ اخترع موشور السقف وموشور الرؤيا المباشرة وشبثيات القمر للميكروسكوبات.

بالفارق العدديّ يَتَنّ معاملي الانكسار الأكبر والادنى ، وَيَبْلُغُ هذا المقدارُ للبلورة الأحادية $\omega - \epsilon$ ، وللبلورة الثنائية $\alpha - \gamma$.

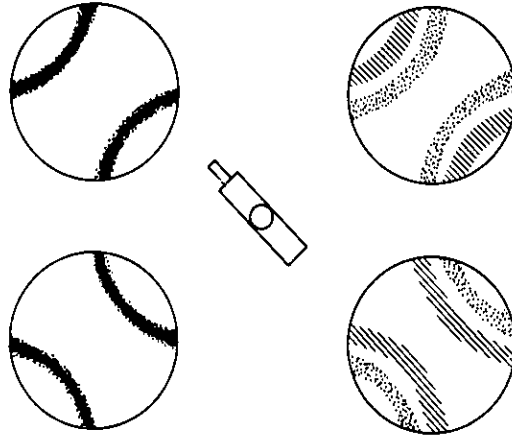
افترض أنَّ الفارقَ بين مُعَامِلَي الانكسارِ لبلورةٍ ما يُعَادِلُ فارقَ مسارٍ مقداره ٥٥٠ نم؛ وَلَمَّا كَانَ هذا هو أيضاً الطولُ الموجيُّ للضوءِ الأخضرِ، فَإِنَّ الضوءَ الأخضرَ يَخْرُجُ من البلورة مستقطباً خطياً ولا يَمُرُّ من محللةٍ متعامدةٍ؛ غَيْرَ أَنَّ كُلَّاً من الضوءِ الأزرقِ والاصفرِ والأحمرِ يَمُرُّ وهي تتضامُّ معاً لِتُعْطِيَ اللونَ الأرجوانيَّ. ولذا فنعمدُ ظهورَ بعضِ جوانبِ البلورةِ أرجوانيةً يَكُونُ فارقُ المسارِ فيها ٥٥٠ نم. وإذا ما أُديرَتِ المحللةُ ٩٠° يَظْهَرُ الجَانِبُ نَفْسُهُ مُخَضَّرَ اللونِ؛ ولذلك يَحْدُدُ الكسْرُ المزدوجُ والسمكُ اللونَ التداخليَّ الذي تَظْهَرُ فيه العينةُ المفحوصةُ أو جزءٌ منها. وَيَمَكُنُ الحُصُولُ على جداولٍ مرجعيةٍ بالعلاقاتِ بَيِّنُ هذه السماتِ (البارامترات) الثلاثِ مِنْ أَيِّ كِتَابٍ في علمِ المعادنِ.

الاشارة البصرية Optic Sign

يُمْكِنُ أَنْ يَكُونَ للمادةِ أحادية المحورِ أو ثنائيتيه اشارةً بصريةً موجبةً أو سالبةً. وفي البلورة أحادية المحورِ الموجبة، يَكُونُ معاملُ الانكسارِ للشعاعِ فوقَ العاديِّ ϵ أَكْبَرَ مِنْهُ للشعاعِ العاديِّ ω . وَيَمَكُنُ تحديدهُ الاشارةَ البصريةَ بوساطةِ شريحةٍ نصفِ الموجةِ من مادةِ الجبسِ أو شريحةٍ حمراءَ من الرتبةِ الاولى، ثُمَّ نَسْتَخِذُ الفحصَ المجهرِيَّ للضوءِ (الكونسكوبية) وَنَضْعُ شريحةَ الجبسِ. فإذا كانتِ البلورةُ أحادية المحورِ موجبةً فَإِنَّ الرُّبْعَيْنِ اللَّذَيْنِ يَقَعَانِ بَيْنَ فَرشَاتِي الحلقه في اتجاهاً موازٍ للاتجاهِ الثابتِ للشريحةِ الجبسيةِ يَكُونَانِ أَصْفَرَيْنِ؛ أما الرُّبْعَانِ بَيْنَهُمَا فَيَبْدَوَانِ أَزْرَقَيْنِ - الشكل ٢٢. وبالنسبةِ للبلورةِ



الشكل ٢٢: تعيين الإِشارة البصرية بشريحة الجبس. البلورةُ المبيَّنةُ هنا أحادية المحورِ موجبة؛ أُمساحاتُ المظللة صفراءُ أما المساحاتُ المنقطهُ فَهِيَ زرقاء. ظَلَّلُ هذه المساحاتِ إنْ شِئتَ.



الشكل ٢٣: تأثير وضع شريحة الجبس في بلورة ثنائية المحور موجبة: المساحات المظلمة صفراء والمساحات المنقطة زرقاء.

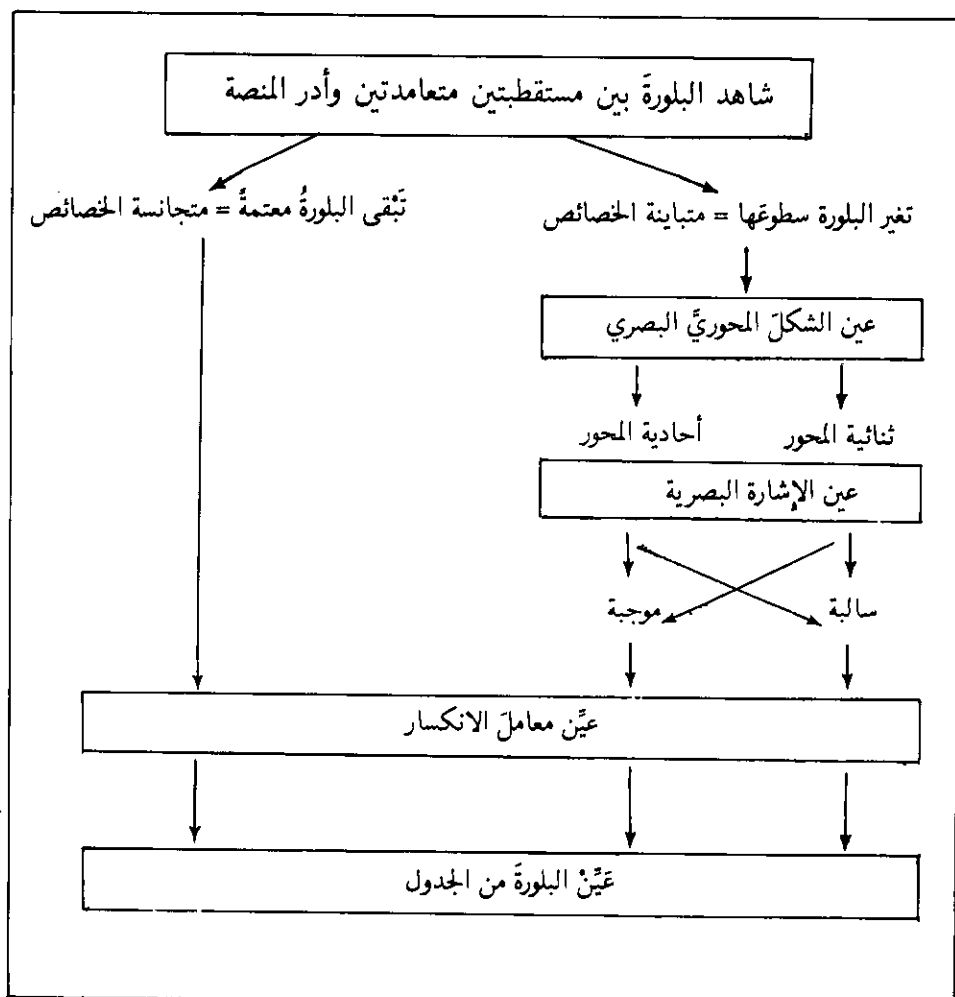
ثنائية المحور، تكون التغيرات الحاصلة مشابهة لتلك الحاصلة في البلورة أحادية المحور -
الشكل ٢٣.

الجدول ٣: الخصائص البصرية للبلورات

نوع المادة	المحور	عدد معاملات الانكسار	الرموز	المنظومة البلورية
متجانسة الخصائص		١	م	أيسومترية
متباينة الخصائص	أحادية	٢	ϵ, ω	رباعي وسداسي، موشوري سداسي
	ثنائية	٣	γ, β, α	معين مستقيم Orthorhombic أحادية الميل monoclinic ثلاثية الميل Triclinic

وبعد إيجاد الشكل المحوري البصري والإشارة البصرية، يُعيّن أخيراً معامل أو معاملات انكسار البلورة - الجدول رقم ٤. وَ يُمكنُ عملُ هذا بطرقٍ عدةٍ وَرُبما تكونُ طريقةُ **خطّ بك** Becke line method أكثرها مناسبةً: وَ يقومُ مبدأُ هذه الطريقة على غمرِ البلورة في وسطٍ معاملُ انكساره معلومٌ وملاحظةُ خطوطٍ محيطِ البلورة (الكونتورات) في الوقتِ الذي يُخَفَضُ فيه أو يُرَفَعُ أنبوبُ الميكروسكوب ببطءٍ. فإذا رُفِعَ الأنبوبُ وشوهدَ أنَّ خطَّ بك يتقلصُ ويتحركُ إلى داخلِ البلورة يكونُ معاملُ انكسارِ البلورة أعلى من معاملِ انكسارِ الوسط، وإذا حدثَ عكسُ ذلكَ يكونُ للسائلِ معاملُ انكسارٍ أعلى. وبعدَ تعيينِ جميعِ الخصائصِ المذكورة، يُمكنُ التعرفُ إلى البلورة من جدولٍ خاصٍّ، ونقدّمُ بعضَ الأمثلةِ الممثّلةِ في الجدول ٥.

الجدول رقم ٤: غرض لخطوات التعرف إلى البلورة



الجدول رقم ٥: معاملات الانكسار لبلورات مختلفة [إضاءة الصوديوم الأصفر D، حيث $\lambda = 589$ نم].

أ. متجانسة الخصائص		
م = ١,٥٢٣٠ الزجاج التاجي		
= ١,٧٥٤١ ألصوان الكثيف		
= ٢,٤١٧٣ ألماس		
ب. متباينة الخصائص: أحادية المحور		
$\omega = 1,6584$	$\epsilon = 1,4864$	ألكسر المزدوج = - ٠,١٧٢ ألكالسيث
$= 1,5442$	$= 1,5533$	= + ٠,٠٠٩ ألكوارتز
$= 1,5874$	$= 1,3361$	= - ٠,٢٥١ نترات الصوديوم
ج. متباينة الخصائص: ثنائية المحور		
$\alpha = 1,5601$	$\beta = 1,5936$	$\gamma = 1,5977$ أليكا (المُسكوفيت)
$= 1,3346$	$= 1,5006$	= ١,٥٠٦١ نترات البوتاسيوم
$= 1,4953$	$= 1,5353$	= ١,٦٠٤٦ حامض الترتريك

المرونة الضوئية Photoelasticity

إذا خضعت مادة متجانسة الخصائص شفافة مثل البلاستيك أو الزجاج لإجهاد ميكانيكي فإنها تُصبح كأسرة ثنائية محورها البصري في اتجاه الإجهاد. وتحت ضغط منتظم تكتسب المادة خصائص البلورة أحادية المحور السالبة؛ أما تحت الشد فتصبح متباينة الخصائص أحادية المحور موجبة. وتشكل هذه الظاهرة أساس تحليل الإجهاد بطريقة المرونة الضوئية، وهي طريقة تستخدم على نطاق واسع للكشف عن الإجهادات في المنظومات الميكانيكية وتقويمها. وفي التطبيق العملي، يُصنع نموذج للجسم المفحوص من

*M. M. Frocht, *Photoelasticity* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948).
L. Föppl and E. Mönch, *Praktische Spannungsoptik* (Berlin: Springer-Verlag Inc., 1950).

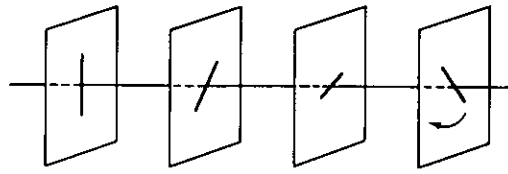
البلاستيك، ثم يوضع بين مستطبتين متعامدتين أو يُظلى الجسمُ المفحوصُ فعلاً بالبلاستيك فينعكسُ الضوءُ عنه؛ وعند إيقاع ثقلٍ معينٍ ينتقلُ الانفعالُ إلى الظلّةِ التي تُصيحُ بدورها كاسرةً ثنائيةً إلى درجةٍ تتناسبُ معَ مقدارِ الانفعالِ الحاصلِ.

الكسر المزدوج الجرياني Flow Birefringence

تصبحُ بعضُ السوائلِ التي هي عادةً متجانسةُ الخصائصِ كاسرةً مزدوجةً عند إخضاعها لإجهادٍ قصّ shearing stress ؛ ومن الأمثلة الجيدة على ذلك الدقائقُ المستطيلةُ المعلقةُ في سائلٍ. ويمكنُ مشاهدةُ الظاهرة بسهولة إذا وُضعَ السائلُ في الفراغَ الأسطوانيّ بين أسطوانتين مُتحدّتي المحورِ قطراهما مُختلفانِ قليلاً وإحدهما تدورُ بينما الأخرى ثابتةٌ؛ ثم يُشاهدُ المجالُ عبْرَ مستطبتين متعامدتين. وعندما تكونُ الأسطوانتان ثابتتين، يبدو المجالُ مُعتماً؛ إلا أنه يضيءُ عندما تدورُ إحدهما.

الدوران البصري Optical Rotation

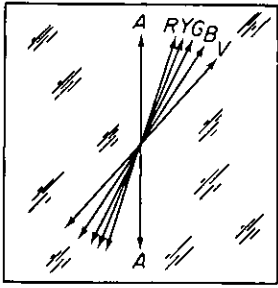
في العادة عندما تتعامدُ مستقطبةٌ ومحللةٌ، لا ينفذُ شيءٌ من الضوء؛ ولكن عند وضعِ محلولٍ من السكرِ أو شريحةٍ من الكوارتز بينهما، وُجدَ أنَّ المادةَ الموضوعةَ تُديرُ مستوى الاهتزاز. وبدورانِ المحللةِ نحصلُ على وضعٍ إطفاءٍ جديدٍ يختلفُ عن السابق، وتُسمى هذه الظاهرةُ بالنشاطِ البصريّ أو الدورانِ البصريّ أو الكسر المزدوج الدوراني - الشكل ٢٤. وتبعاً لاتجاهِ الدورانِ، وعند النظرِ في اتجاهِ مصدرِ الضوء، قد يكونُ الدورانُ في اتجاهِ



الشكل ٢٤: الدورانُ البصري الموجب

عقاربِ الساعة أو موجباً، ويُسمى الوسطُ عندها بالوسطِ النشطِ بصرياً جهةً اليمين؛ وإذا كانَ الدورانُ عكسَ عقاربِ الساعة أو سالباً سُميت المادةُ بالنشطةِ بصرياً جهةً اليسار.

وتتناسبُ الزاويةُ التي يدورها مستوى الاهتزازِ لطولٍ موجيٍّ معينٍ معَ طولِ المسارِ المقطوعِ في المادة، وفي المحلولِ تتناسبُ زاويةُ الدورانِ لطولٍ موجيٍّ وطولِ مسارٍ مُعَيَّنَيْنِ معَ التركيزِ. ومن الممكنِ فهمُ الدورانِ البصريِّ أَفْضَلَ فَهْمٍ بِتَذَكُّرِ أَنَّ الضوءَ الْمُسْتَقْطَبَ خَطِيًّا يُمْكِنُ اعتبارهُ مجموعَ استقطابتينِ دائريَّتينِ في اتجاهَيْنِ متعاكسَيْنِ. وإذا ما تحركَ أحدُ الاهتزازينِ في مادةٍ نشطةٍ بصرياً أبطأً من الآخرِ، فَإِنَّ الاستقطابَ الخطيَّ الناتجَ سَيُغَيَّرُ باستمرارٍ زاويةً سَمَتِهِ يَتَّبَعُ لَطولِ المسارِ المقطوعِ في المادة؛ وتُسَمَّى الأدواتُ المتقدمةُ لقياسِ الدورانِ البصريِّ بالمقاييسِ الاستقطابيةِ. وتستخدمُ المقاييسُ السكريةُ لمحلولاتِ السُّكَّرِ.



الشكل ٢٥: التحليل الدوراني

في شريحة كوارتز سمكها ١ مم.

ومن الصفاتِ الأخرى للدورانِ البصريِّ أَنَّ الضوءَ المختلفَ في طولِهِ الموجيِّ يدورُ بمقاديرَ مختلفةٍ؛ وكانَ بِيوتُ Biot أَوَّلَ مَنْ وَجَدَ أَنَّ الدورانَ يَتَنَاسَبُ تَقْرِيباً عَكْسِيّاً مَعَ مَرَبَعِ الطولِ الموجيِّ، وَيَعْنِي هَذَا أَنَّ الضوءَ الأزرقَ الباهتَ يدورُ تَقْرِيباً أَرْبَعَ مَرَاتٍ قَدْرَ الضوءِ الأحمرِ. ويوضحُ الشكلُ ٢٥ هذه الظاهرةَ تَخْطِيْطِيّاً للضوءِ الأبيضِ (أأ) الساقطِ عمودياً على شريحةِ كوارتز: فعندَ مروره عَبْرَ سُمْكٍ من الكوارتز مقداره ١ مم، يدورُ الضوءُ الأحمرُ ١٥° والبنفسجيُّ ٥٠°، يَتَنَمَّا الألوانُ الأخرى تدورُ زوايا مقاديرها بَيْنَ تلكَ القيمتين؛ ويُسمى الدورانُ الناتجُ عَنْ مَحْلُولٍ تركيزه ١ غم/ملتر عَبْرَ طولِ مسارٍ قدره ١٠ سم بالدورانِ النوعي

. Specific rotation

الاستقطابُ المتسبب من المجالات الكهربائية والمغناطيسية

تدومُ ظواهرُ الاستقطابِ من هذا النوعِ عُمُوماً طالما وُجِدَتْ المجالاتُ التي أُخِذَتْهَا. وَنَبْحُثُ هُنَا ظَاهِرَةَ كِرٍّ (الكهربوصرية) Kerr وظاهرةَ بوكِلز Pockels اللتين تَنَشَّانِ عَنِ المجالاتِ الكهربائِيَّةِ، كَمَا نَبْحُثُ ظَاهِرَةَ كوتون - موتون Cotton-Mouton وظاهرةَ كِرٍّ المغناطيسِيَّةِ البصريَّةِ، وَدَوْرَانَ فارادي المتسببةَ بِالْمَجَالِ المغناطيسي.

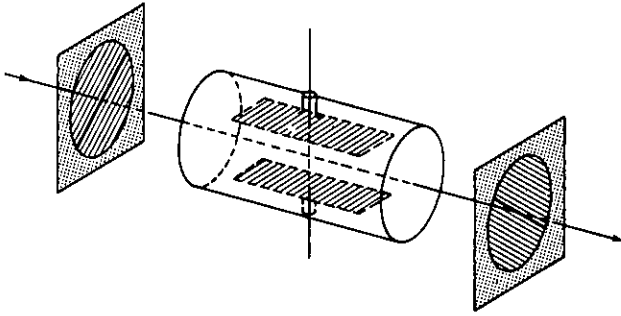
ظاهرة كِرٍّ Kerr effect

اكتشف كِرٍّ عامَ ١٨٧٥ هـ أَنَّ شَرِيحَةَ الزجاجِ التي تَخْضَعُ لِمَجَالٍ كهربائيٍّ قَوِيٍّ تَصْبِحُ

• جون كِرٍّ (١٨٢٤-١٩٠٧): الفيزيائي الاسكتلندي.

كاسرة مزدوجة. وتظهر هذه الظاهرة في السوائل وحتى في الغازات مما يدل على أنها ليست ناشئة عن الانفعالات الميكانيكية. وقد استخدم كير أضلاً قطعة زجاج مربوطاً بها سلكان واصلان إلى ملف تأثيري وموضوعة بين موشورين متعامدين من مواشير نيكول. وعندما يسري التيار يمر الضوء عبر القطعة، غير أن هذا التأثير ليس تأثيراً آنياً وإنما يأخذ عادة عدة ثوان ليصل قيمته القصوى. ولا تطفئ إدارة أحد موشوري نيكول الضوء المار الذي هو ضوء مستقطب إهليلجي، كما يمكن تبيان ذلك.

وتتألف خلية كير من وعاء زجاجي مملوء بسائل التثروبينزين ومن قطبين كهربائيين - الشكل ٢٦. إن الضوء الساقط هو ضوء مستقطب خطياً يميل بزاوية ٤٥° على اتجاه المجال



الشكل ٢٦: ظاهرة كير

الكهربائي. ولذا فاستخدام المستقطبة الثانية التي تتعامد مع المستقطبة الأولى يتسبب في إنطفاء الضوء. ولكن عند استخدام مجال كهربائي يبلغ عدة كيلوفولتات يصبح الضوء مستقطباً إهليلجياً ويمر جزئياً عبر المحللة أي المستقطبة الثانية. وتستخدم خلايا كير غالباً كغالقات سريعة جداً.

ظاهرة بوكيلز Pockels effect

وفي حين يكون اتجاه انتشار الضوء في ظاهرة كير عمودياً على المجال الكهربائي، فإنه يوازيه في ظاهرة بوكيلز+. وفي العادة توضع بلورة فوسفات البوتاسيوم الهيدروجيني

†F. Pockels, *Lehrbuch der Kristalloptik* (Leipzig: Teubner, 1906).

KH_2PO_4 (أو ف ب هـ اختصاراً) بَيِّنَ صَحيفَتَيْنِ مِنْ زجاجِ موصلٍ كهربائياً وَبَيَّنَ مستقطبتين متعامدتين . وفي البدء يُظْفَأُ الضوءُ الَّذِي يَمُرُّ مِنْ إِحْدَى الْمُسْتَقْطَبَتَيْنِ بِالْأُخْرَى . ولكن باستخدامِ مجالِ كهربائيٍّ يَبْلُغُ عِدَّةَ كيلوفولتاتٍ ، يَصْبَحُ الضوءُ الْمُسْتَقْطَبُ خَطِياً مرةً أُخْرَى إهليلجياً وَ يَمُرُّ عَبْرَ الْمُسْتَقْطَبَةِ الثَّانِيَةِ .

ظاهرة كوتون موتون Cotton-Mouton effect

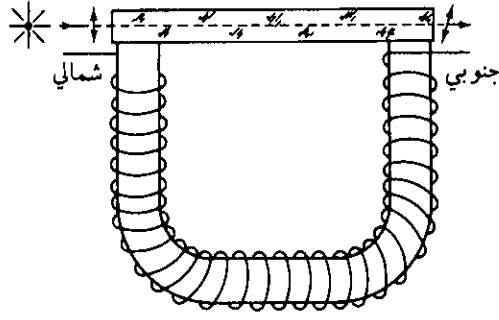
تعتبرُ هذه الظاهرةُ المكافئةُ المغناطيسيةُ لظاهرةِ كِرَّ الكهرو بصرية . فعندما يُعَرَّضُ سائلٌ كالنترو بنزين أو ثاني كبريتيد الكربون لمجالٍ مغناطيسيٍّ في اتجاهٍ متعامدٍ يُصْبَحُ السائلُ كاسراً مزدوجاً بِسَبَبِ إِعَادَةِ تَرْتِيبِ جُزَيْئَاتِهِ بِالْمَجَالِ المغناطيسي . وَ يَقِلُّ التأثيرُ بِسرعةٍ عِنْدَ درجاتِ الحرارة المرتفعة .

ظاهرة كِرَّ المغناطيسية البصرية Kerr magneto-optic effect

اكتشفَ كِرَّ عامَ ١٨٨٨ أَنَّ الضوءَ الْمُسْتَقْطَبَ خطياً الَّذِي ينعكسُ تقريباً عمودياً عَنِ قُطْبِ مصقولٍ لمغناطيسٍ كهربائيٍّ يُصْبَحُ مستقطباً إهليلجياً : محورهُ الأساسيُّ يَمِيلُ عَنِ اتجاهِ استقطابِ الضوءِ الساقطِ كَأَنَّهُ أَذِيرَ . وَعِنْدَ زوايا سُقوطٍ أُخْرَى يَكُونُ مَشَاهِدَةُ الظاهرةِ نَفْسِهَا إِذَا كَانَ الْمَتَجَهُّ الكهربائيُّ للضوءِ الساقطِ موازياً أَوْ متعامداً مَعَ مستوى السقوط . وَتَعْنِي حَقِيقَةُ كَوْنِ الضوءِ النعكسِ ضوءاً مستقطباً إهليلجياً أَنَّ الْمَجَالِ المغناطيسيَّ أَخَذَتْ مَتَجَهَا كَهْرَبائياً جَدِيداً (مُكَوَّنَةً كِرَّ) يَتَعَامَدُ عَلَى الْمَتَجِ الكهربائيِّ الموجودِ فِي غِيَابِ المغنطة . وَعِنْدَمَا يَكُونُ هَذَانِ الْمَتَجَهُانِ متحدي الطورِ فَإِنَّهُمَا يَتَضَامَانِ فِي الشَّعَاعِ النعكسِ لِيُكُونَا مَتَجَهاً جَدِيداً ، مِمَّا يَنْشَأُ عَنِ ذَلِكَ دَوْرَانُ مستوى الاهتزاز . وَ يُحْصَلُ عَلَى التأثيرِ الْأَقْصَى عِنْدَ زَاوِيَةِ سُقوطٍ ٦٠° وَفِي حَالَةِ كَوْنِ مستوى الاهتزازِ للضوءِ الساقطِ يُوَازِي مستوى السقوط ؛ وَلِذَلِكَ يَكُونُ مَقْدَارُ هَذَا التَّأثيرِ حَوَالِي ١٠ دَقَائِقَ قَوْسِيَّة . وَمَا يَدْعُمُ هَذَا التَّأثيرَ ظَلْمِي سَطْحِ المغناطيسِ بِفِلْمٍ مُتَعَدِّ الطَّبَقَاتِ يَتَسَبَّبُ فِي انْعِكَاسَاتٍ مُتَعَدِّة .

دوران فارادي Faraday rotation

إِذَا وُضِعَ وَسْطَ شَفَافٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ ، فَإِنَّ الضوءَ الْمُسْتَقْطَبَ خطياً وَالَّذِي يَمُرُّ فِي



الشكل ٢٧: تجربة فارادي الأصلية

الوسط موازياً لخطوط المجال يُعاني دورانياً في مستوى اهتزازهِ - الشكل ٢٧. وتُسمى هذه الظاهرة التي تُعتبر تاريخياً أوّل دليل تجريبيّ على تفاعل الضوء والقوى الكهرومغناطيسية بظاهرة فارادي أو دوران فارادي * . وفيما يلي عرض فارادي لهذه الظاهرة:-

[وُضِعَتْ قطعة من الزجاج الثقيل الذي يحوي بورات سيليكات الرصاص بين القطبين (الذين لم يُمَغْنَطَا بعدُ بالتيار الكهربائي) بحيث يمرُّ الشعاعُ المستقطبُ في اتجاه طولها... وعند إدارة العينية مُسبقاً إلى وضع يكون فيها الشعاعُ المستقطبُ مُنطَفِئاً، فإنَّ إدخالَ الزجاج لا يُغيّرُ أيّ تغييرٍ من هذه الناحية. وتحت هذه الظروف يُمَغْنَطُ المغناطيس الكهربائي...، فتظهرُ حالاً صورةً للهبِ المصباح التي تظلُّ طالما ظلَّت مَغْنَطَةُ المغناطيس الكهربائي. وعند إزالة المغنطة يختفي الضوءُ حالاً. ويُمكنُ تكرارُ هذه الظواهر في أيّ وقتٍ وأية مناسبة... إن طبيعة القوة المؤثرة في المادة الدّيامغناطيسية هي الدوران؛ فعندما ظَهَرَتْ صورةُ لهبِ المصباح تَسَبَّبَتْ إدارةُ العينية إلى اليمينِ أو اليسارِ تقريباً في إطفاءِ الصورة، كما أنَّ أية حركةٍ أخرى للعينية... تسبّبُ في إعادةِ ظهورِ الضوء...].

وَيستمرُّ فارادي في توضيح أنَّ الدورانَ الطبيعيَّ والدورانَ المغناطيسيَّ ليسا ظاهرةً واحدةً، ذلكَ لأنَّ اتجاهَ الدورانِ الطبيعيِّ يعتمدُ على اتجاهِ انتشارِ الضوءِ، بينما يعتمدُ اتجاهُ الدورانِ المغناطيسيِّ على اتجاهِ المجالِ المغناطيسيِّ. ولذا فإنَّ دورانَ الضوءِ الذي يمرُّ في وسطٍ

* مايكل فارادي Michael Faraday (١٧٩١-١٨٦٧): الفيزيائي البريطاني. لمعرفة تفاصيل وافرة

عن حياته، انظر:-

E. Scott Barr, "Men and Milestones in Optics, V: Michael Faraday,"

Applied Optics 6 (1967), 631-37.

نَشِطٌ بصرياً بشكل طبيعيٍّ ثمَّ ينعكسُ مُرتدّاً في الوَسْطِ سَيَكُونُ صِفْراً، لأنَّ الدورانَينِ يُلغِيانِ بَعْضَهُمَا بَعْضاً عِنْدَ مَرُورِ الضَّوئِ في اتِّجَاهَيْنِ مُتَضَادِّينِ. أما إذا كَانَ النِّشَاطُ البَصْرِيُّ صِنَاعِيّاً مِثْلَ الَّذِي يُنتِجُ بِمَجَالٍ مَغْنَطِيسِيٍّ، فَإِنَّ الدَّورَانَ يَتَضَاعَفُ.

وَيَتَنَاسَبُ مَقْدَارُ الدَّورَانِ المَشَاهِدِ لِمَادَّةٍ مَا (كَمَا وُجِدَ بِالتَّجَرِبَةِ) مَعَ شِدَّةِ المَجَالِ المَغْنَطِيسِيِّ H وَالمَسَافَةِ l الَّتِي يَقْطَعُهَا الضَّوْءُ فِي الوَسْطِ؛ وَإِذَا كَانَتْ ϕ هِيَ زَاوِيَةُ الدَّورَانِ، فَإِنَّ:-

$$[7-1:3] \quad \phi = H \cdot l \cdot V \text{ جتا } \theta$$

حَيْثُ V هُوَ ثَابِتُ فِرْدْتِ Verdet، وَ θ هِيَ الزَّاوِيَةُ الَّتِي يَصْنَعُهَا المَجَالُ المَغْنَطِيسِيُّ مَعَ اتِّجَاهِ الضَّوْءِ. وَعَمُوماً فَإِنَّ دَوْرَانَ فَارَادِي يُتْلَغُ أَقْصَاهُ فِي الأَوْسَاطِ ذَاتِ مَعَامِلَاتِ الانكِسَارِ العَالِيَةِ؛ وَأَيْضاً يَعْتَمِدُ ثَابِتُ فِرْدْتِ عَلَى الطَّوْلِ المَوْجِيِّ للضَّوْءِ مِمَّا يَتَسَبَّبُ فِي التَّحْلِيلِ الدَّورَانِيِّ المَغْنَطِيسِيِّ "Magnetic rotary dispersion".

اقتراحات لقراءات إضافية

- W. A. Shurcliff, *Polarized Light: Production and Use* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1962).
- W. A. Shurcliff and S. S. Ballard, *Polarized Light* (Princeton, N.J.: Van Nostrand, 1964).
- E. E. Wahlstrom, *Optical Crystallography*, 4th ed. (New York: Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc., 1969).
- H. T. Jessop and F. C. Harris, *Photoelasticity* (New York: Dover Publications, Inc., 1960).
- H. St. Bennett, "The Microscopical Investigation of Biological Materials with Polarized Light," *McClung's Handbook of Microscopical Technique*, 3rd ed., R. McC. Jones (New York: Hoeber, 1950), 591-677.

المسائل

١-١:٣ هل يمكنك تصور الدوران البصري لضوء مستقطب إهليلجياً؟ ولضوء مستقطب دائرياً؟ وضح إجابتك بالرسم.

- ٢-١:٣ هل يمكن إحداث استقطاب في أمواج الراديو والأشعة الكونية والأشعة السينية، والأمواج الصوتية وأمواج الجاذبية؟ وَضَحْ إجابتك.
- ٣-١:٣ جَذ زاوية السقوط للحصول على استقطاب تام عند انعكاس الضوء عن سطح فاصل بين الماء والزجاج الصُّوَانِيَّ (م = ١,٧٢).
- ٤-١:٣ زاوية الاستقطاب للضوء الأصفر الساقط على جامد شفاف صاف هي ٥٦,٧؛ احسب معامل الانكسار وحدد المادة من الجدول ٥.
- ٥-١:٣ مصدر ضوئي مغمور في الزيت (م = ١,٦٢): انعكس ضوؤه عن الوجه المستوي لماسية (م = ٢,٤٢)؛ جَذ زاوية السقوط التي يَحْدُثُ عَلَيْهَا الاستقطاب الأقصى وجَذ زاوية الانكسار.
- ٦-١:٣ انعكس ضوء عن سطح الماء الأملس عند زاوية الاستقطاب الأقصى، جَذ:-
(أ) زاوية السقوط (ب) زاوية الانكسار (ج) اتجاه المجال الكهربائي للضوء المنعكس بالنسبة إلى مستوى السقوط.
- ٧-١:٣ هُتِيَّ موشورا نيكول للإنفاذ الأقصى ثُمَّ أُديرَ أحدُ الموشورين بزاوية مقدارها ٣٠؛ جَذ النسبة المئوية لكلٍّ من السعة والشدة النافذتين. أَجِبْ عن السؤال إذا كانت الزاوية ٦٠ و ٩٠ على الترتيب.
- ٨-١:٣ تمرُّ حزمة ضوئية طبيعية في مستطبتين: مستويا تمريرهما متوازيان؛ جَذ الزاوية التي ينبغي أن تُدارَ بها إحدى المستطبتين لإنقاص الشدة إلى النصف؟
- ٩-١:٣ يمرُّ ضوء غير مستقطب عبر ثلاث مستطبات تلوانية تمتصُّ عند وضعها متوازية ٥٠% من الضوء؛ أُديرَت المستطبة الثانية ٢٠ بالنسبة إلى الأولى، والثالثة ٢٠ بالنسبة إلى الثانية، فجد النسبة المئوية من الطاقة الضوئية الساقطة التي تمرُّ عبر المستطبات الثلاث.
- ١٠-١:٣ تُحَدَّدُ حساسية فِلْم فوتوغرافي بتعريض أجزاء متتالية منه للضوء النافذ عبر موشورني نيكول، جَذ الزوايا التي يُدارَ بها أحدُ الموشورين لتعريض الفيلْم لشِدَات ضوئية بنسب ١,٠ : ٠,٨ : ٠,٦ : ٠,٤ : ٠,٢ : ٠,١.

١١-١:٣ بأيّ لونٍ تَظْهَرُ شَرِيحَةُ رَقِيقَةٍ مِنَ المِيكَا سُمْكُهَا ٠,٠١٢ مم عِنْدَ وَضْعِهَا بِزَاوِيَةِ ٤٥° بَيْنَ مُسْتَقْطَبَتَيْنِ مُتَعَامِدَتَيْنِ؟ عُدْ إِلَى الجَدْوَلِ ٥ لِلْحُصُولِ عَلَى مُعَامِلَاتِ انْكِسَارِ المِيكَا.

١٢-١:٣ جُعِلَتْ حَزْمَتَانِ ضَوْئِيَتَانِ مُسْتَقْطَبَتَانِ خَطِيَا وَمُتَعَامِدَتَانِ تَتَدَاخِلَانِ . مَثَلُ الإِسْهَامَيْنِ بِدَائِرَتَيْنِ مُرْجِعِيَتَيْنِ، وَعَيْنُ حَالَةِ الاسْتَقْطَابِ الحَاصِلَةِ: (أ) إِذَا لَمْ يَكُنْ بَيْنَ الحَزْمَتَيْنِ فَارَقٌ فِي الطَّوْرِ (ب) إِذَا كَانَ بَيْنَهُمَا فَارَقٌ فِي الطَّوْرِ مَقْدَارُهُ ٤٥°.

١٣-١:٣ قُطِعَتْ شَرِيحَةُ رَقِيقَةٍ مِنَ الكَالْسِيْتِ بِحَيْثُ يَكُونُ مَحْوَرُهَا البَصْرِيُّ مُوَازِيَا لِمَسْتَوَى الشَّرِيحَةِ. جَدِ السَّمَكِ الأَقْلَى الَّذِي يُلْزَمُ لِإِحْدَاثِ فَارَقٍ مَسَارٍ مَقْدَارُهُ $\frac{\lambda}{4}$ لِمُضَوِّ الصُّوْدِيَوْمِ.

١٤-١:٣ فِي الْمَسْأَلَةِ السَّابِقَةِ، مَا السَّمَكُ الأَقْلَى لِلشَّرِيحَةِ الَّذِي يُلْزَمُ لِإِحْدَاثِ نَهَايَاتِ التَّدَاخُلِ الصَّغْرَى؟

١٥-١:٣ بِدَلَالَةِ حِسَابِ جُونَز، صِفِ مُسْتَقْطَبَةً خَطِيَةً مَحْوَرُ تَمْرِيرِهَا أَفْقِيٌّ وَسَقَطَ عَلَيْهَا: (أ) ضَوْءٌ مُسْتَقْطَبٌ خَطِيًّا فِي الاتِّجَاهِ الأفْقِي (ب) ضَوْءٌ مُسْتَقْطَبٌ خَطِيًّا فِي الاتِّجَاهِ الرَّأْسِيِّ. مَا النَتِيجَةُ الَّتِي تَحْصُلُ عَلَيْهَا؟

١٦-١:٣ تَخِيلْ ضَوْءاً مُسْتَقْطَباً خَطِيًّا فِي الاتِّجَاهِ الأفْقِي يَسْقُطُ عَلَى مُسْتَقْطَبَةٍ خَطِيَّةٍ اتِّجَاهُهَا ٤٥°. (أ) إِذَا دَخَلَ الضَّوُّ بَعْدَ ذَلِكَ مُسْتَقْطَبَةً مَحْوَرُ تَمْرِيرِهَا رَأْسِيٌّ، فَبَيِّنْ مَاذَا يَحْدُثُ وَاصْفَاً مَا يَحْدُثُ بِحِسَابِ جُونَز (ب) مَاذَا يَحْدُثُ عِنْدَمَا تَتَقَدَّمُ المُسْتَقْطَبَةُ الرَّأْسِيَّةُ المُسْتَقْطَبَةَ ٤٥°؟

١٧-١:٣ يَمُرُّ ضَوْءٌ مُسْتَقْطَبٌ خَطِيًّا فِي بُلُورَةٍ كَاسِرَةٍ مُزْدَوِجَةٍ فِي اتِّجَاهٍ مُتَعَامِدٍ؛ (أ) إِذَا كَانَ سُمْكُ البُلُورَةِ بِحَيْثُ يَكُونُ الشَّعَاعَانِ العَادِيَّ وَفَوْقَ العَادِيَّ عِنْدَ خُرُوجِهِمَا مُتَسَاوِيَيْنِ السَّعَةِ وَمُزَاحَيْنِ بِمَقْدَارِ ١٨٠°، فَجِدْ حَالَةَ اسْتَقْطَابِ الضَّوْرِ الخَارِجِ (ب) وَإِذَا كَانَ فَارَقُ الطَّوْرِ ٩٠°، فَجِدْ حَالَةَ الضَّوْرِ. حُلِّ الْمَسْأَلَةُ تَحْلِيلِيًّا.

١٨-١:٣ افْتَرَضْ أَنَّ جِسْماً كَسَرَهُ المَزْدَوِجُ مَجْهُولٌ قَدْ غُمِرَ فِي مُتَسَلْسِلَةٍ مِنَ السَّوَائِلِ ذَاتِ مُعَامِلَاتِ انْكِسَارٍ مُتَزَايِدَةٍ. أَرَسِّمْ رَسْماً يَوْضَحُ العِلَاقَةَ بَيْنَ الكَسْرِ المَزْدَوِجِ

وَمعامل الانكسار في الحالات التالية: (أ) للجسم كسر مزدوج شكلي موجب وكسر مزدوج بلوري موجب (ب) كسر مزدوج شكلي سالب فقط (ج) كسر مزدوج بلوري سالب وكسر مزدوج شكلي موجب. أثير بسهم مزدوج غامق إلى مقدار الكسر المزدوج البلوري في حالة وجوده.

١٩-١:٣ ألدوران النوعي للكوارتز لضوء طوله الموجي ٥٨٩ نـم هو ٢١,٧°/مم. جد سُمْك الكوارتز الذي يُقَطَّع عمودياً على المحور البصري وَيَوْضَعُ في كاشف الاستقطاب (بِمَوْشُورِي نيكول متوازيين) بحيث لا يُعَرَّرُ أيُّ ضوء.

٢٠-١:٣ محلول جلوكوز تركيزه مَجْهُوْكَ ومَوْضُوعٌ في أنبوب طوله ١٢ سم. وَجِدْ أنَّ المحلول يُدِيرُ الضوءَ الْمُسْتَقْطَبَ خطياً بزاوية ١,٢٣°. جِدْ تركيز المحلول إذا كَانَ الدوران النوعي لَهُ ٢٠,٥°.

٢١-١:٣ جِدْ شدة المجال المغناطيسي إذا كَانَ دورانُ فارادي ٤° لطول مسار مقداره ١٠٠ سم وَثَابِتُ فِرْدْت ٨,٣×١٠^{-٤} وَكَانَ المجال المغناطيسي مُوَازِئاً للضوء. جِدْ الشدة إذا كَانَ المجال متعامداً مع الضوء.

٢٢-١:٣ يَمُرُّ ضوءٌ مُسْتَقْطَبٌ خطياً في مجال مغناطيسي في اتجاهٍ يُوَازِي خطوط المجال، ثُمَّ يَسْقُطُ سَقُوطاً عمودياً على مِرَاةٍ تَعْكِسُ الضوءَ عَنَّا المجال. جِدْ الدورانَ الصافي لمستوى الاهتزاز، وَبَيِّنْ بالاستعانة بالرسم اتجاه دوران الضوء في حَالَتَيْ مُرُورِهِ في المجال.

الفصل ٣ : ٢

السطوح الفاصلة البصرية Optical Boundaries

يُمَثِّلُ الاستقطابُ دوراً هاماً كلما أردنا أن نفكرَ على نحوٍ دقيقٍ جداً ببعضِ الظواهر البسيطة ظاهرياً كالانعكاسِ والانكسارِ، ويتطلبُ هذا الأمرُ فهماً لسلوكِ الضوءِ عندَ تفاعلِهِ معَ سَطْحٍ بصريٍّ؛ غيرَ أنَّه لا يمكنُ مناقشةَ شروطِ التفاعلِ هذهِ مناقشةً تامةً إلا بعدَ التعرفِ إلى نظريةِ ماكسويلِ Maxwell لِلْمَجَالِاتِ الكهرومغناطيسيةِ. ولسوءِ الحظِّ يتطلبُ تقديمُ نظريةِ ماكسويلِ معالجةً رياضيةً متقدمةً أكثرَ ممَّا استخدمناه إلى الآن؛ ولذلكِ نقتصرُ هنا على مُجردِ ذكرِ الحقائقِ مؤجِّلين اشتقاقها على نحوٍ كاملٍ إلى الفصلِ ٦ : ١. وتنبثقُ المادةُ المقدمةُ هنا مباشرةً من استقطابِ الضوءِ، وهي بذلكِ استمرارٌ للفصلِ السابقِ وتوسيعٌ له مع تركيزٍ على الجوانبِ الكميةِ.

نظرية ماكسويل Maxwell's Theory

يشاركُ الضوءُ والأمواجُ الميكانيكيةُ، كما دُكرَ من قبلُ، في بعضِ الخصائصِ، ويختلفان بصورةً أساسيةً في خصائصٍ أخرى: فعلى سبيلِ المثالِ لا يتطلبُ الضوءُ خلافاً للصوتِ وسطاً لانتشاره، الأمرُ الذي قد أثارَ لفترةٍ طويلةٍ صعوباتٍ عظيمةً في وجهِ محاولاتِ تفسيرِ طبيعةِ الضوءِ. وقد حَلَّ ماكسويلُ هذه المسألةَ فأظهرَ أنَّ الضوءَ ظاهرةٌ كهرومغناطيسيةٌ وليستَ ظاهرةً ميكانيكيةً.

* جيمس كلارك ماكسويل James Clerk Maxwell (١٨٣١-١٨٧٨): الفيزيائي النظري البريطاني وأستاذ الفيزياء التجريبية في جامعة كامبردج. تصوّرَ ماكسويل الأفكارَ الرئيسيةَ في نظريتهِ عندما كانَ طالباً جامعياً في كامبردج، وقَدَّمَ بحثَه الأولَ وعُمره ١٥ سنة أمامَ الجمعية الملكية. وقُرِئَ بحثُه (نظرية ديناميكية للمجال الكهرومغناطيسي) أمامَ الجمعية الملكية عامَ ١٨٦٤، وطُبِعَ في مجلةِ محاضراتِ الفلسفةِ للجمعية الملكية بلندن ١٥٥ (١٨٦٥)، ص ٤٥٩؛ أمّا عمله الرئيس =

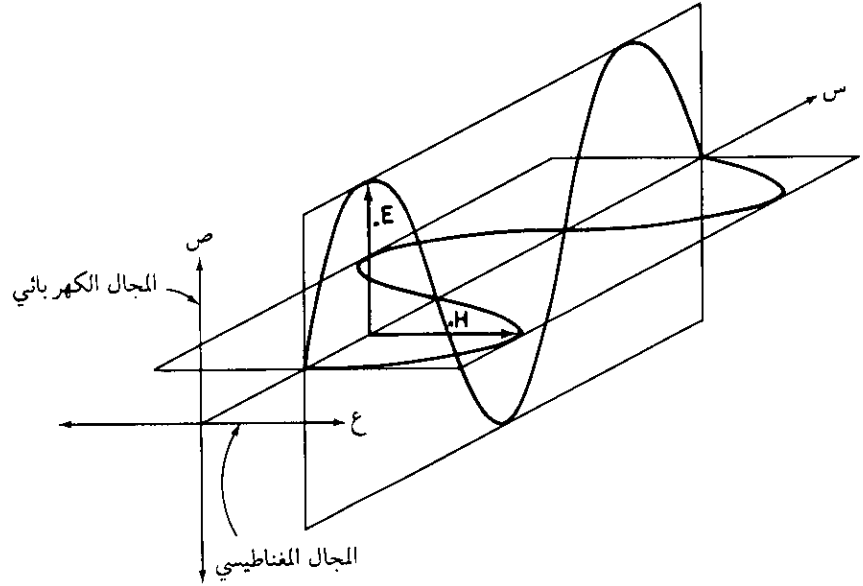
وَعَبَّرَ مَأكسَوِيلُ عَنْ نَتَائِجِ بَحْثِهِ الرَّئِيسَةِ فِي أَرْبَعِ مَعَادِلَاتٍ أُسَاسِيَةٍ تُعَرَّفُ بِمَعَادِلَاتِ مَأكسَوِيلٍ. وَقَدْ أُيِّدَتِ التَّجَرِبَةُ أَفْكَارَ مَأكسَوِيلٍ عِنْدَمَا اكْتَشَفَ هِرْتزُ Hertz + عَامَ ١٨٨٧ الأَمَوَاجَ الكَهْرُومَغْنَطِيسِيَّةَ الَّتِي تَنَبَّأَ بِهَا مَأكسَوِيلُ؛ وَفِي عَامِ ١٩٠١ نَجَحَ مَارْكَونِي Marconi فِي بَثِّ الأَمَوَاجِ الكَهْرُومَغْنَطِيسِيَّةِ عَبْرَ المَحِيطِ الأَطْلَسِيِّ.

وَبِالرَّغْمِ مِنَ الدَّلِيلِ التَّجْرِبِيِّ، فَقَدْ مَضَى وَقْتُ عَزِيرٍ قَلِيلٍ حَتَّى قُبِلَتْ نَظَرِيَّةُ مَأكسَوِيلٍ؛ إِذْ قَدْ دَعَمَ عُلَمَاءُ فِيزِيَاثِيُونَ مَشْهُورُونَ نَظَرِيَّةَ الجَامِدِ المَرِنِ elastic-solid theory إِلَى وَقْتٍ مُتَأَخِّرٍ حَتَّى عَامِ ١٨٨٠. وَقَدْ تَمَّ التَّخَلِّيُ عَنْ جَمِيعِ المَحَاوَلَاتِ لِتَفْسِيرِ مَجَالَاتِ مَأكسَوِيلٍ بِالنَّمَاذِجِ المِيكَانِيكِيَّةِ ببطءٍ، وَنَعَرُفُ فِي أَيَّامِنَا هَذِهِ أَنَّهُ لَا يُمْكِنُ اخْتِرَالُ هَذِهِ المَجَالَاتِ إِلَى شَيْءٍ أُبْسِطَ مِنْهَا.

وَيُمْكِنُ وَصْفُ مَجَالَاتِ مَأكسَوِيلٍ بِمُتَّجِهَيْنِ: شِدَّةُ المَجَالِ الكَهْرَبَائِيِّ E وَشِدَّةُ المَجَالِ المَغْنَطِيسِيِّ H اللَّذَيْنِ هُمَا دَالَّتَا مَكَانٍ وَزَمَانٍ؛ وَيَهْتَرُ هَذَانِ المُتَّجِهَانِ فِي مَسْتَوِيَيْنِ مُتَعَامِدَيْنِ - الشَّكْلُ ١، وَهُمَا لَا يُمْكِنُ فَضْلُهُمَا: فَالْمَجَالُ الكَهْرَبَائِيُّ المَتَغَيِّرُ يُنْتِجُ مَجَالًا مَغْنَطِيسِيًّا مُرْتَبِطًا بِهِ، كَمَا أَنَّ المَجَالَ المَغْنَطِيسِيَّ المَتَغَيِّرَ يُؤَلِّدُ مَجَالًا كَهْرَبَائِيًّا؛ وَلِذَلِكَ لَا يَلْزَمُ وَسَطٌ لِلتَّغْيِيرَاتِ فِي المَجَالَيْنِ الكَهْرَبَائِيِّ وَالْمَغْنَطِيسِيِّ، وَإِنَّمَا يَتَقَدَّمُ المَجَالُ بِنَفْسِهِ. وَلِنَحَاوِلَ الآنَ أَنْ نَفَكِّرَ فِي الَّذِي يَحْدُثُ عِنْدَمَا يَتَفَاعَلُ هَذَا المَجَالُ مَعَ السَّطْحِ الفَاصِلِ بَيْنَ وَسْطَيْنِ.

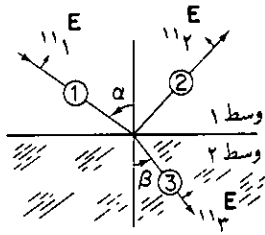
= الثَّانِي: «بَحْثٌ فِي الكَهْرَبَاءِ وَالْمَغْنَطِيسِيَّةِ» فَقَدْ نُشِرَ فِي أَوْكْسْفُورْدِ عَامِ ١٨٧٣. وَبِكَلِمَاتِ مَأكسَوِيلٍ: «تَمَّ طَبَقْتُ المَعَادِلَاتِ العَامَّةِ عَلَى الاضطرابِ المَغْنَطِيسِيِّ الَّذِي يَنْتَشِرُ فِي مَجَالٍ غَيْرِ مُوَصَّلٍ ... وَيُمْكِنُ ... إظهارُ أَنَّ الاضطراباتِ الوَحِيدَةَ الَّتِي يُمْكِنُ انْتِشارُهَا هِيَ تِلْكَ المُتَعَامِدَةُ (المُسْتَعْرِضَةُ) عَلَى اتِّجَاهِ الانْتِشَارِ ... إِنَّ سُرْعَةَ الانْتِشَارِ .. هِيَ تَقْرِيبًا سُرْعَةُ الضَّوئِ مِمَّا يُعْطِي سَبَبًا قَوِيًّا لِلِاسْتِنْتَاكِ بِأَنَّ الضَّوئَ نَفْسُهُ اضطرابٌ كَهْرُومَغْنَطِيسِيٌّ فِي هَيْئَةِ أَمَوَاجٍ تَنْتَشِرُ بِوَسَاطَةِ المَجَالِ الكَهْرُومَغْنَطِيسِيِّ وَفَقَّ القَوَانِينِ الكَهْرُومَغْنَطِيسِيَّةِ».

+ هِينْرِخُ رُودُلْفُ هِرْتزُ Heinrich Rudolf Hertz (١٨٥٧-١٨٩٤): أَسْتَاذُ الفِيزِيَاءِ فِي كَالْسِرُوةِ (جَامِعَةُ بُونِ فِيمَا بَعْدَ) فِي أَلْمَانِيَا. بَنَى هِرْتزُ دَوَائِرَ كَهْرَبَائِيَّةً مَهْتَرَةً لِإِنْتَاكِجِ الأَمَوَاجِ الكَهْرُومَغْنَطِيسِيَّةِ وَلِلْكَشْفِ عَنْهَا، وَقَاسَ سُرْعَتَهَا وَأَطْوَالَهَا المَوْجِيَّةَ، وَبَيَّنَ أَنَّهَا تَنْعَكِسُ وَتَنْكَسِرُ وَتُحِيدُ، وَتُسْتَقْطَبُ كَالضَّوئِ.



الشكل ١: المجال الكهرومغناطيسي ممثلاً بالمتجهين الكهربائي والمغناطيسي

معادلات فـرنـل Fresnel's Equations



نَفتَرضُ تبسيطاً للأُمُورِ أَنَّ الضوءَ أحاديَّ الموجةِ وَمُستَقْطَبٌ خَطِيئاً، وَأَنَّهُ قَدْ يَسْقُطُ عَلَى سَطْحِ فَاصِلٍ كَمَا فِي الشَّكْلِ ٢. وَنُشيرُ بِالرَّمْزِ السِّفْلِيِّ ١١ إِلَى جَمِيعِ الضَّوئِ الَّذِي يَكُونُ مُتَجَهِّهُ الكَهْرَبَائِيَّ مُوَازِئاً لِمُسْتَوَى السَّقُوطِ كَمَا فِي الشَّكْلِ ٢، وَبِالرَّمْزِ ٢ إِلَى جَمِيعِ الضَّوئِ الَّذِي يَتَعَامَدُ مُتَجَهِّهُ الكَهْرَبَائِيَّ مَعَ مُسْتَوَى السَّقُوطِ أَيْضاً.

وَيُرْمَزُ إِلَى الاتِّجَاهِ المُوَازِي بِالرَّمْزِ ١ وَالاتِّجَاهِ العَمُودِيِّ بِالرَّمْزِ ٢، أَمَّا زَاوِيَةُ α فَهِيَ زَاوِيَةُ السَّقُوطِ وَزَاوِيَةُ β هِيَ زَاوِيَةُ الانكِسَارِ. وَنَذْكُرُ هُنَا فَقَطْ مَعَادِلَاتِ فِرِنلِ * مِنْ دُونِ بَرَهَنَتِهَا. وَبِاسْتِخْدَامِ الشَّكْلِ ٢ يُمكنُ كِتَابَةُ مَعَادِلَاتِ فِرِنلِ عَلَى النِّحْوِ التَّالِيِ :-

$$\text{المعادلة ١:} \quad \frac{E_{12}}{E_{11}} = \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\cos(\beta + \alpha)} \quad \dots\dots [1-2:3]$$

$$\text{المعادلة ٢:} \quad \frac{E_{13}}{E_{11}} = \frac{\sin 2\alpha \cos \beta}{\sin(\beta + \alpha) \cos(\beta - \alpha)} \quad \dots\dots [2-2:3]$$

* اشتقها أُوغسطين فِرِنل عام ١٨٢٣.

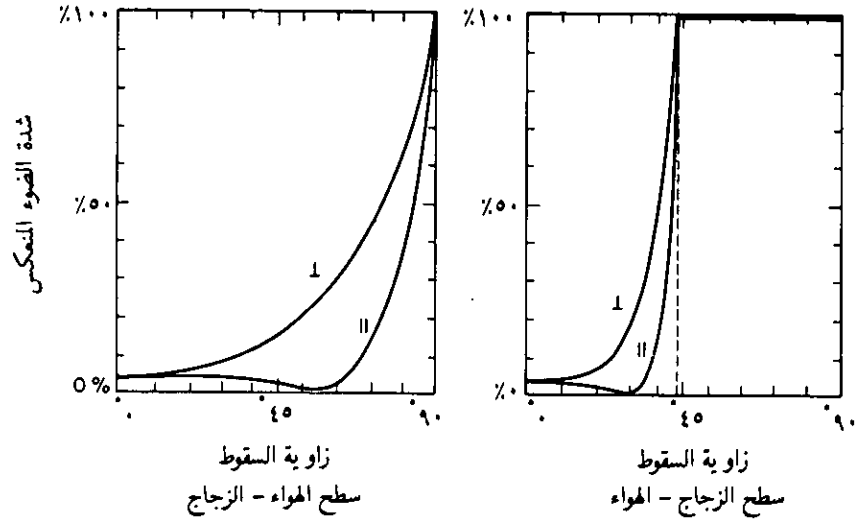
$$\text{المعادلة ٣ :- } \frac{\text{جا } (\beta - \alpha)}{\text{جا } (\beta + \alpha)} = \frac{\pm_2 E}{\pm_1 E} \dots\dots [٣-٢:٣]$$

$$\text{المعادلة ٤ :- } \frac{\alpha \text{ جا } \beta}{\text{جا } (\beta + \alpha)} = \frac{\pm_3 E}{\pm_1 E} \dots\dots [٤-٢:٣]$$

وَتَشِيرُ معادلتا فَرِنِلْ الأولى والثانيةُ إلى الضوءِ المستقطبِ خطياً الذي يوازي متجههُ الكهربائيُّ مستوى السقوط؛ أما للمعادلتين الثالثة والرابعة فيكونُ المتجهُ الكهربائيُّ E عمودياً على المستوى. وعلاوةً على ذلك، فالمعادلتان الأولى والثالثة تنطبقان على انعكاسِ الضوء، أما المعادلتان الثانية والرابعة فهما لانكسارِ الضوء. إنَّ نسبتي السعة في حالة الانعكاسِ هي $\frac{E_2}{E_1}$ وتُسَمَّيان مُعامِلَي فَرِنِلْ للانعكاسِ. $\rho_{\parallel}$ ، $\rho_{\perp}$ حَسَبَما يَتَطَلَّبُ الأمرُ؛ وبصورةٍ مماثلةٍ $\tau_{\parallel}$ ، $\tau_{\perp}$ لهما مُعامِلَا فَرِنِلْ للانكسارِ. وتُسَمَّى نِسَبَتَا الشدةِ اللتان لهما مُربَّعا مُعامِلَات فَرِنِلْ المناظرة بالانعكاسية ρ^2 ، والنفاذية τ^2 . وعموما تَقْتَضِي الانعكاسية والنفاذية على الطولِ الموجيِّ وحالة استقطابِ الضوءِ الساقِطِ واتجاه سُقوطِهِ.

الانعكاسية بدلالة الاستقطاب

دَعْنَا نَفَكِّرُ الآنَ بِمَزِيدٍ من التفصيلِ بكيفية تغيرِ شدةِ الضوءِ المنعكسِ عَنِ سَطْحٍ عازِلٍ بِتَغْيِيرِ استقطابِ الضوءِ؛ وَبتحديدِ أكثرُ نَساءلُ كيفَ تَتَغَيَّرُ الانعكاسيةُ reflectivity بدلالةِ زاويةِ السقوطِ في الحالتينِ التاليتين: (١) الضوءُ مُستقطبٌ خطياً في اتجاهٍ عموديٍّ على مُستوى السقوطِ (٢) الضوءُ مُستقطبٌ خطياً في اتجاهٍ موازٍ لمستوى السقوطِ. كذلك نَرغِبُ في أنْ نَعْرِفَ الفارقَ في الانعكاسيةِ بَيْنَ سقوطِ الضوءِ على سَطْحٍ فَاصِلٍ بَيْنَ الهواءِ والزجاجِ عِنْدَ سُقوطِهِ (١) من جهةِ الهواءِ، وَعِنْدَ (٢) سُقوطِهِ من جهةِ الزجاجِ. وَيَلْخُصُّ الشكْلُ ٣ هذه الحالاتِ الأربعة: فعِنْدَ السقوطِ العموديِّ لا يوجَدُ فرقٌ بَيْنَ الضوءِ ١١ والضوءِ $\perp$ باعتبارِ استقطائيهما بالنسبةِ إلى مستوى السقوطِ. وَبزيادةِ زاويةِ السقوطِ ينعكسُ مقدارٌ أكبرُ من الضوءِ $\perp$ وَيَنْقُصُ قدرٌ أكبرُ من الضوءِ ١١، يَقْطَعُ النظرُ عَنِ جِهَةِ سُقوطِ الضوءِ عَلَى السطحِ. لَكِنْ عِنْدَمَا تُصْبِحُ زاويةُ السقوطِ أكبرَ فأكْبَرُ، نُلَاحِظُ فُرُوقاً هَامَةً بَيْنَ الانعكاسِيَيْنِ الخارجِيِّ والداخِلِيِّ.



الشكل ٣: الانعكاسية بدلالة زاوية السقوط لاتجاهين من الاستقطاب

لنتناول الآن حالة الانعكاس الخارجي أي حالة سقوط الضوء على السطح من جهة الوسط ذي معامل الانكسار الأقل. إن الانعكاسية على السطح الفاصل (الهواء-الزجاج) في حالة السقوط العمودي هي ٤٪ كما بيّنا سابقاً. وتزداد هذه النسبة للمكونة $\perp$ تدريجاً حتى تصل إلى ١٠٠٪ عند السقوط المحاذي؛ في حين تقل الانعكاسية للضوء $\parallel$ قليلاً حتى نصل زاوية سقوط حيث $\alpha + \beta = 90^\circ$ ، وفي هذه الحالة يكون المقام في معادلة فرنل الأولى [ظا ($\beta + \alpha$)] مالا نهاية، ويكون:-

$$[5-2:3] \quad \text{عند } \alpha = 0, \quad R_{\parallel} = \left(\frac{E_{\parallel 2} - E_{\parallel 1}}{E_{\parallel 2} + E_{\parallel 1}} \right)^2 = \text{صفر}$$

ويعني هذا أن الضوء المنعكس عند هذه الزاوية لا يكون لجاليه الكهربائي مكونة في مستوى السقوط؛ وهذه الزاوية هي زاوية بروستر. ولسطح الهواء-الزجاج تكون زاوية بروستر كما يلي:

$$[6-2:3] \quad \alpha = \text{ظا}^{-1} \frac{21}{14} = \text{ظا}^{-1} \frac{1.5}{1.0} = 56.3^\circ \dots$$

وباختصار لا ينعكس أي من الضوء $\parallel$ عند هذه الزاوية، أي أن جميع الضوء المنعكس هو ضوء مستقطب خطياً في الاتجاه $\perp$.

وفي حالة الانعكاس الداخلي تزداد الانعكاسية للمكونة $\perp$ باستمرار؛ إلا أنها تصل ١٠٠٪ عند الزاوية الحرجة للانعكاس الداخلي الكلي:-

$$[٧-٢:٣] \quad \alpha = \text{جا}^{-١} \frac{٢٢}{١٢} = \text{جا}^{-١} \frac{١,٥}{١,٥} = ٤٢^\circ \dots\dots$$

وتبلغ المكونة || زاوية بروستر قبل بلوغ المكونة $\perp$ الزاوية الحرجة:-

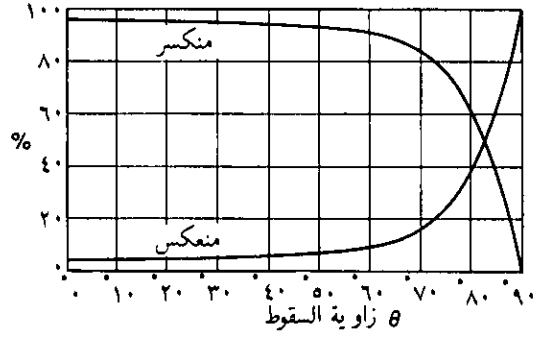
$$[٨-٢:٣] \quad \alpha = \text{ظا}^{-١} \frac{٢٢}{١٢} = \text{ظا}^{-١} \frac{١,٥}{١,٥} = ٣٤^\circ \dots\dots$$

ولزوايا سقوط أكبر تبلغ الانعكاسية للاتجاهين || ، $\perp$ النسبة ١٠٠٪ عند الزاوية الحرجة، وتثبت عند هذه القيمة بعد ذلك.

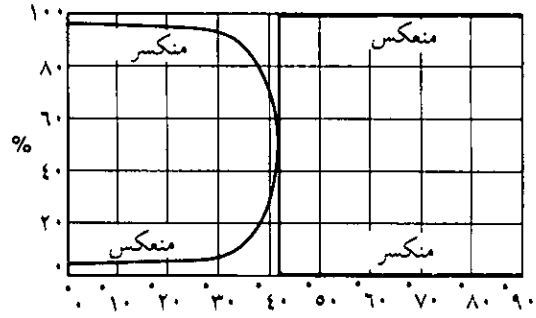
ولزوايا سقوط غير السقوط العمودي تزداد الانعكاسية بدلالة زاوية السقوط. ولا يهتم عند السقوط العمودي من أي اتجاه يمر الضوء في السطح الفاصل، إلا أن الضوء عند زوايا سقوط أكبر من ذلك يقترب من شرط الانعكاس الداخلي، ولا يحدث هذا إلا في حالة السقوط من الوسط الكثيف إلى الوسط الخفيف، وهو لا يحدث في الاتجاه المعاكس (حالة الانعكاس الخارجي). ولذلك تفرق المنحنيات عند زوايا سقوط أكبر، وتصل الانعكاسية بذلك إلى قيمة تزيد على ٥٠٪ بسرعة أكبر في حالة الانعكاس الداخلي - الشكل ٤.

ونلاحظ في حالة الانعكاس الخارجي ولزوايا سقوط تصل إلى ٥٠° أن أقل من ١٠٪ من الطاقة ينعكس، كما نلاحظ عند السقوط المحاذي (أي على زوايا سقوط تبلغ حوالي ٩٠°) أن السطح يعمل مثل عاكس ممتاز. أما في الانعكاس الداخلي فينعكس الضوء كله لجميع الزوايا فوق الزاوية الحرجة.

وتحتوي معادلة فرينل الثالثة على إشارة سالبة. فإذا كانت $\alpha < \beta$ أو $\alpha > \beta$ ، فإن اتجاه سعة الضوء المنعكس يصادف اتجاه سعة الضوء الساقط. وبعبارة أخرى فعندما ينتقل الضوء من وسط خفيف إلى وسط كثيف، يحدث تغير في الطور مقداره ط أو ١٨٠° للمتجه الكهربائي $E_{\perp}$. ونلاحظ من المعادلة الأولى [١-٢:٣] أنه لا يوجد للمتجه $E_{\parallel}$ أي تغير في الطور إذا كانت $(\alpha + \beta) > ٩٠^\circ$ ؛ بينما يوجد له تغير في الطور مقداره ط إذا كان $(\alpha + \beta) < ٩٠^\circ$. ويحدث التغير في الطور الذي مقداره ١٨٠° فقط في حالة $\alpha > \beta$ ولا يحدث عندما $\alpha < \beta$.



الانعكاس الخارجي

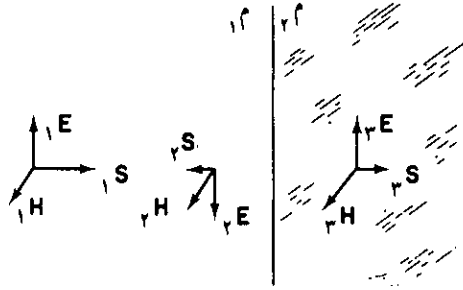


زاوية السقوط θ
الانعكاس الداخلي

الشكل ٤ : النسبة المئوية للطاقة المنعكسة والمنكسرة عند سقوط الضوء على السطح زجاج-هواء بزوايا سقوط مختلفة (م زجاج = ١,٥).

دَعْنَا نوضح هذه النقطة من وجهة نظر أخرى: وللتبسيط نتخيل أن الضوء يسقط عمودياً على السطح الفاصل من جهة اليسار كما في الشكل ٥، وهو يمثل بثلاثة اتجاهات: المتجه الكهربائي E ، المتجه المغناطيسي H ، ومتجه الطاقة S الذي يسمى متجه بوينتغ $Poynting$ * الذي سيبحث فيما بعد بمزيد من التفصيل. ونكتفي بالقول أن S عمودي على كل من E و H ، أي أنه في اتجاه الضرب المتجهي التقاطعي $H \times E$. إن جزءاً من الموجة يمر عبر السطح، وهذا الجزء المشار إليه بالرمز السفلي ٣ يحتفظ بالهيئة الأصلية للمتجهات الثلاثة، كذلك فإن جزءاً آخر من الطاقة ينعكس عن السطح الفاصل ويرتد إلى الوسط الأول، ويُرمز إلى هذا الجزء بالرمز ٢. ومن الواضح أن متجه بوينتغ في الضوء المنعكس

* نسبة إلى جون هنري بوينتغ John Henry Poynting (١٨٥٢-١٩١٤): أستاذ الفيزياء في جامعة بيرمنغهام في إنجلترا.



الشكل ٥: انعكاس الموجة الكهرومغناطيسية الساقطة ونفاذها على سطح فاصل: $m > m'$.

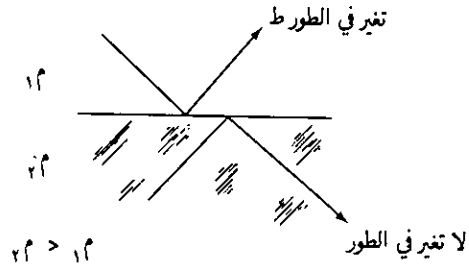
سَيَعَكْسُ اتِّجَاهَهُ . وَلَمَّا كَانَ S, E, H مرتبط بعضها ببعض في هيئة محددة، فعند ارتداد الضوء فإنَّ أحدَ المتجهين E, H وَلَيْسَ كلاهما سيغيِّرُ اتِّجَاهَهُ .

ونفترضُ في الشكل ٥ أنَّ E قد غَيَّرَ مِنْ اتِّجَاهِهِ أَيَّ أَنَّهُ عَانِيَ تَغْيِراً في الطَّوْرِ مقداره 180° بالنسبة إلى E وَلَيْسَ بالنسبة إلى H .

[ويمكنُ مقارنةُ هذا التَّغْيِيرِ في الطَّوْرِ عندَ السطح الخفيف - الكثيف بالمماثل الميكانيكيِّ البسيط للنَّبْضَةِ المتحرِّكةِ إلى أعلى على حَبْلٍ مربوط طرفه بحائط؛ ولأنَّ الحائط ثابتٌ، فتؤثِّرُ على الحَبْلِ قوَّةٌ سَحبٍ إلى أسفلَ بحيثُ أنَّ زخمَ الحَبْلِ momentum يَحْمِلُهُ إلى ما دونَ مستواه الصَّفْري، وبذلك تَتَقَلَّبُ النبْضَةُ عند اصطدامها بالحائط، وتعودُ النبْضَةُ المنعكسةُ منتقلةً في الجَانِبِ الآخرِ من الحبل، وهي ظاهرةٌ مكافئةٌ للتَّغْيِيرِ في الطَّوْرِ. وإذا كَانَ طرفُ الحبلِ حُرّاً في حَرَكَتِهِ، فَلَا يَحْدُثُ انْقِلَابٌ في النبْضَةِ، وتعودُ النبْضَةُ المنعكسةُ على نَفْسِ الجَانِبِ من الحبل].

وفي حالةِ الضوءِ يَحْدُثُ تَغْيِيرٌ في الطَّوْرِ مقداره π عندَ السطح الفاصِلِ الخفيف - الكثيف لا عندَ السطح الفاصِلِ الكثيف - الخفيف - الشكل ٦؛ وهذا المقدَّارُ يَحْدُثُ بالضَّيْبِ لكلِّ الأطوالِ الموجيةِ. أمَّا للمعادِنِ فإنَّ التَّغْيِيرَ في الطَّوْرِ يكونُ أَقَلَّ مِنْ π ، وَسَتُبْحَثُ هذه الحالةُ قريباً.

وَلَمَّا كَانَتِ الانعكاسيةُ ر هي النسبةُ بين شدَّتَيْهِ، فَمِنْ الممكِنِ تَرْبِيعُ معادلاتِ فِرِنلِ المناسبةِ وَضَمُّهَا إلى بعضها بعضاً على النحو التالي :-



الشكل ٦: لا يحدث التغير في الطور إذا كان الضوء الآتي من وسط خفيف ينعكس على السطح الفاصل.

$$[٩-٢:٣] \quad \dots\dots \frac{(\beta - \alpha)^2 \text{ ظا}^2}{(\beta + \alpha)^2 \text{ ظا}^2} + \frac{(\beta - \alpha)^2 \text{ جا}^2}{(\beta + \alpha)^2 \text{ جا}^2} = \frac{\text{ش}^2}{\text{ش}^2} = \text{ر}$$

وبتجزئة المعادلة الأخيرة الى الجزئين الخاصين بنوعي الضوء المستقطب ١١، $\perp$ تبعاً لمستوى اهتزاز كلٍ منهما بالنسبة إلى مستوى السقوط، نحصلُ على :-

$$[١٠-٢:٣] \quad \dots\dots \frac{(\beta - \alpha)^2 \text{ جا}^2}{(\beta + \alpha)^2 \text{ جا}^2} = {}_{11} \left(\frac{\text{ش}^2}{\text{ش}^2} \right) = {}_{11} \text{ر}$$

$$[١١-٢:٣] \quad \dots\dots \frac{(\beta - \alpha)^2 \text{ ظا}^2}{(\beta + \alpha)^2 \text{ ظا}^2} = {}_{\perp} \left(\frac{\text{ش}^2}{\text{ش}^2} \right) = {}_{\perp} \text{ر}$$

ويمثلُ الرسمُ في الشكل ٣ مُثَنِّيَّ هَاتين المعادلتين .

ولا تتأتى قيمة الانعكاسية عند السقوط العمودي مباشرةً من المعادلتين [١-٢:٣] و [٣-٢:٣] بوضع $\alpha = 0$ ؛ لأنَّ وضع هذه القيمة يُعطي نتيجةً غيرَ مُحددة. وَعوضاً مِنْ ذلك فَيُمْكِنُ إيجادها كما يلي :- لأنَّ α ، β تُصَيِّحَان صغيرَتَيْن عندما نَقْتَرِبُ من السقوط العمودي فَيُمْكِنُ الاعتياضُ عن الظلِّ بالجيب :-

$$\frac{(\beta - \alpha) \text{ جا}}{(\beta + \alpha) \text{ جا}} = \frac{{}_{\perp 2} E}{{}_{\perp 1} E} = \frac{(\beta - \alpha) \text{ ظا}}{(\beta + \alpha) \text{ ظا}} = \frac{{}_{11 2} E}{{}_{11 1} E}$$

$$[١٢-٢:٣] \quad \dots\dots \frac{\beta \text{ جا } \alpha - \beta \text{ جتا } \alpha}{\beta \text{ جا } \alpha + \beta \text{ جتا } \alpha} =$$

و يتغير مستوى اهتزاز المتجه المحصلة resultant vector بدلالة زاوية السقوط . وَ بِقِسْمَةِ كُلِّ من البَسْطِ والمقامِ في المعادلة السابقة على جا β وبالاختياضِ عَنْ جا α / جا β بالمقدارِ م نحصلُ على :-

$$[13-2:3] \dots \frac{1-m}{1+m} \approx \frac{m \cos \alpha - \cos \beta}{m \cos \alpha + \cos \beta} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{E_{12}}{E_{11}}$$

وَعِنْدَ السقوطِ العموديِّ $\alpha = \beta = 0$ صفر، يصبحُ التقريبُ في المعادلة السابقة مساواةً صحيحةً، وَلذا تُصبحُ الانعكاسيةُ :-

$$[14-2:3] \dots r = \frac{E_2}{E_1} = \frac{1-m}{1+m}$$

وَعِنْدَ سطحِ فاصلٍ يَفْصِلُ بينَ وَسْطَينِ عازِلَينِ Dielectric تكونُ الانعكاسيةُ :-

$$[15-2:3] \dots r = \frac{E_2}{E_1} = \frac{1-m}{1+m}$$

وفي المعادلة [15-2:3] تَحْتَفي الإشارةُ السالبةُ عِنْدَ تربيعِها، وَلذا تَقْلُ الانعكاسيةُ واحدةً في حالةِ سُقوطِ الضوءِ على السطحِ الفاصلِ مِنْ أَيِّ مِنَ الجهتين .

وَعِنْدَ النظرِ في معادلةِ فَرِنَلِ الثالثة نجدُ أَنَّ المقدارَ $\frac{E_2}{E_1}$ يكونُ دائماً سالِباً للمكونةِ E_1 ، ويعني هذا أَنَّهُ يوجَدُ في حالةِ الانعكاسِ الخارجِيِّ تغيرٌ في الطورِ مقداره ط زاويةُ نِصْفِ قطرية، أما للمكونةِ E_2 فالنسبةُ $\frac{E_2}{E_1}$ (من المعادلة 1-2:3) تكونُ موجبةً كُلِّما كانت α صغيرة؛ ولكن عندما تكونُ $\alpha + \beta = 90^\circ$ ، تُغَيِّرُ النسبةُ $\frac{E_2}{E_1}$ مِنْ إِشارَتِها مِمَّا يَدُلُّ على أَنَّهُ سَيَكُونُ هُنَاكَ تَغْيِيرٌ في الطورِ مقداره ط للشعاعِ المنعكسِ يَبْدَأُ عِنْدَ زاويةِ الاستقطابِ . ولا يَنْطبقُ هذا الأمرُ بالطبعِ إِلَّا على الانعكاسِ الخارجِيِّ، أما في حالةِ الانعكاسِ الداخليِّ فلا يحدثُ أَيُّ تَغْيِيرٍ في الطورِ.

وعندما ينعكس الضوء المستقطب خطياً عن مادة ما عند سقوطه سقوطاً غير عمودي، فإن المكونتين $\parallel$ و $\perp$ للشعاع الساقط تنعكسان بتغير في الطور مما ينشأ عن ذلك الاستقطاب الإهليلجي. ومن الواضح أن الضوء المستقطب يُمكن أن يسقط على السطح الفاصل في أي اتجاه بين $\parallel$ و $\perp$ ، ويوصف هذا الاتجاه بزاوية السميت ψ المحصورة بين مستوى الاهتزاز ومستوى السقوط. ويكون ظل هذه الزاوية كما في المعادلة التالية:-

$$\text{ظا } \psi = \frac{E_{\parallel 2}}{E_{\perp 2}} = \frac{E_{\parallel 1} \text{ جتا } (\beta + \alpha)}{E_{\perp 1} \text{ جتا } (\beta - \alpha)} \dots\dots\dots [3:2-16]$$

الانعكاس الفلزي Metallic Reflection

الانعكاسية والتوصيلية Reflectivity and Conductivity

إن انعكاسية الفلزات عموماً مرتفعة، وهي تتوقف على الطول الموجي وبدرجة أقل على زاوية السقوط. إن السمة الرئيسة التي يختلف فيها الانعكاس عن الفلز عن الانعكاس عن عازل كهربائي هي أن انعكاسية الفلز تتناسب مع توصيلته الكهربائية: فالفلزات خلافاً للعازلات تحتوي على إلكترونات حرة تستطيع تحت تأثير مجال كهربائي أن تتحرك في الفلز متسببة بذلك في إكبات الضوء بسرعة داخل الفلز. وهذه التيارات التوصيلية المتولدة التي تهدر بعض طاقاتها في شكل حرارة تُشع في الوقت نفسه الطاقة في صورة أمواج منعكسة قوية؛ ومن ثم فإن الفلزات هي أفضل المرايا، وهذه الخاصية هي التي تجعل من الانعكاس الفلزي موضوعاً مثيراً في البصريات.

الانعكاسية والامتصاصية Reflectivity and absorptivity

إن نسبة الشدة الضائعة بالامتصاص إلى الجذر التربيعي للمقاومة الكهربائية لك هي تقريباً واحدة لجميع الفلزات:-

$$\frac{\text{ش ممصنة}}{\sqrt{ك}} = \text{ثابت} \dots\dots\dots [3:2-17]$$

ولعازِل كهربيائي يَمَكُن وَصَفُ صِفَةِ كَسْرِه للضوء من طَوِيل موجي بصورة تامّة بثابت واحدٍ هو مُعامل الانكسار m لذلك الطَوِيل المَوْجِيّ؛ وَلَكِنْ لَمَّا كَانَت الفلزاتُ تحتوي على الكِثْرُوناتِ حرةً فإنَّ لها امتصاصيةً عاليةً، الأمرُ الذي يَتطلَّبُ إضافةً ثابتٍ آخَرَ هو مُعاملُ الامتصاصِ k . ولذا يَتغيَّرُ قانونُ سِنِيلٍ من: $\alpha \text{ جا } / \beta \text{ جا } = m$ إلى الصيغة التالية :-

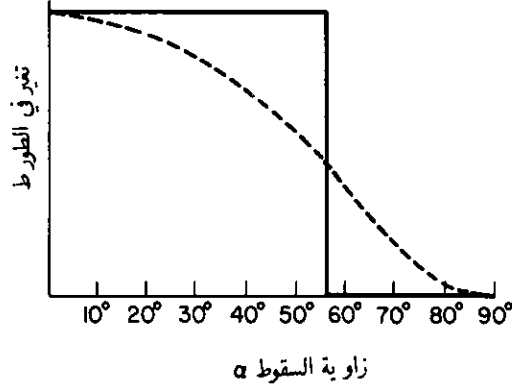
$$[18-2:3] \quad \dots\dots (k_i + 1) = \frac{\alpha \text{ جا}}{\beta \text{ جا}}$$

وَيُسَمَّى المقدارُ $m (k_i + 1)$ بِمُعاملِ الانكسارِ المركَّبِ؛ فزَاوِيَةُ الانكسارِ β هي عَدَدُ مركَّبٍ لِكُلِّ قِيَمٍ α ، وَلَيْسَ فَقَطْ لِقِيَمٍ α التي تَزِيدُ عَلَى الزَاوِيَةِ الحرجة α الكليّة كما في الانعكاسِ الداخليّ. وَتَبْلُغُ الانعكاسيةُ لموصلٍ جيّدٍ تقريباً القيمةَ ١ (١٠٠٪).

وَلَمَّا كَانَ من المستحيلِ تقريباً قياسُ الموجةِ المنكسرةِ في فِلْزٍ بسببِ الامتصاصِ العالي، فَإِنَّهُ يَمَكُنُ الاستدلالُ على الصفاتِ البصريةِ لفلزٍّ من الانعكاسية. وَبصورةٍ عامّةٍ فإنَّ الضوءَ المستقطَّبَ خطياً الذي ينعكسُ عَنْ سَطْحٍ فلزيٍّ لَا يَتَعَكَّسُ مِثْلَ ضوءٍ مستقطَّبٍ خطياً إِلَّا إِذَا كَانَ اهتزازُهُ في اتجاهِ مُستوى السقوطِ أَوْ متعامداً عَلَيْهِ. وعلاوةً على ذلك فَإِذَا انعكسَ الضوءُ المستقطَّبُ عَنْ فِلْزٍ في حالةِ السقوطِ غَيْرِ العموديِّ، فَإِنَّ مكوّنِي المتجهِ الكهربائيِّ الساقِطِ تَتَعَكَّسَانِ بَتَغْيِيرٍ في الطُورِ مِمَّا يُكَوِّنُ الاستقطابَ الإهليلجيّ. وَتَبْلُغُ الاهليلجيةُ أَقصاها للضوءِ المنعكسِ عِنْدَ زَاوِيَةِ السقوطِ التي يقابلُها فارقُ طُورٍ مساوٍ لـ 90° أَوْ $\frac{\pi}{2}$ ، فعِنْدَ هَذِهِ الزَاوِيَةِ التي تُسَمَّى زَاوِيَةَ السقوطِ الأساسيِّ يَتَحَوَّلُ الضوءُ المستقطَّبُ دائرياً إِلَى ضَوْءٍ مُستَقْطَبٍ حَقْطِيٍّ. وَمِنْ قِيَاسِ الإهليلجيةِ واتجاهِ الاهليج، يَمَكُنُ تعيينُ عِدَّةِ خصائصِ (بارامترات) لِلْفِلْزِ بما في ذلك مُعاملِ الانكسارِ المُركَّبِ. وَتُسَمَّى هَذِهِ الطَرِيقَةُ بِقِيَاسِ الاهليلجيةِ ellipsometry. أَمَّا التَغْيِيرُ الفجائيُّ في الطُورِ مِنْ ط إِلَى صَفْرِ الذي يَحْدُثُ عِنْدَ انعكاسِ الضوءِ عَنْ عازِلٍ شفافٍ عِنْدَ زَاوِيَةِ الاستقطابِ فيصْبِحُ تَغْيِيراً تدرِيجياً في حالةِ الفِلِزَّاتِ - الشكل ٧.

• يعودُ مبدأُ هَذِهِ الطَرِيقَةِ إِلَى بولِ كارلِ لُدْفِيخِ ذُرود Paul Karl ludwig Drude (١٨٦٣-١٩٠٦): أستاذُ الفيزياءِ في جيسِن (برلين) بِأَلْمَانِيَا. أنظر: ب. ذُرود في «سجلات فيدمان» ٦٤ (١٨٩٨) ص ١٥٩. وللاطلاع على التقنيّة الحديثة، انظر كتاب: هـ. يِنْت وَجـ. م. يِنْت: «القياسات الدقيقة في بصريات الفلم الرقيق»، المجلد الرابع من «فيزياء الفلم الرقيق» (نيويورك: المطبعة الأكاديمية، ١٩٦٧)، ص ١-٩٦.

$$\sqrt{1 - \gamma} = i \dots$$



الشكل ٧: تغير الطور بالانعكاس عن الزجاج (الخط غير المتقطع) وعن فلز (الخط المتقطع) بدلالة زاوية السقوط. لاحظ ان الزاوية ٥٦° هي زاوية بروستر للاستقطاب الاقصى

الانعكاسية وخشونة السطح

ان انعكاسية السطح هي قياس حساس لخشونته. وقد رأينا من قبل أن الضوء الساقط على سطح يُرَدُّ جزئياً بالانعكاس المنتظم وجزئياً بالانعكاس المنتشر. ولا يعطي السطح المثالي الا انعكاساً منتظماً، ومن ثمَّ فهو لا يُرى. وبسطح أكثر خشونة تزداد بسرعة نسبة الضوء المنعكس بالانتشار؛ ولكنَّ العلاقة بين الانعكاس المنتظم والانعكاس المنتشر تتغير تبعاً للطول الموجي ولخشونة السطح. فـلضوء ذي طول موجي أطول يبدو سطح ذو خشونة ما أكثر ملوَّساً ممَّا يبدو لطول موجي أقصر.

خذ سطحاً خشناً يُضاء بالـضوء الأبيض: فعند السقوط العمودي ولقَدَّار معين من الخشونة، فقد لا يحدث انعكاس منتظم ولا تُرى أية صورة للمصدر الضوئي. ولكن بزيادة زاوية السقوط يبدو السطح أقلَّ خشونة للـضوء، ومن ثمَّ تزداد نسبة الانعكاس المنتظم. وهذا يُفسر لنا لماذا تتحوَّل الصور المتكونة والتي تبدو أول الأمر حمراء اللون إلى صور ذات لون أبيض بزيادة زاوية السقوط. ويمكن التغاضي عن مكونة الانعكاسية الناشئة عن الانتشار عند الأطوال الموجية الطويلة إلى درجة كافية؛ ولذا تُوفَّر قياسات الانعكاسية المنتظمة على الطول الموجي الطويل طريقة بسيطة وحساسة لقياس صقل السطح +.

+ هـ. بيت و جـ. بورتس: «العلاقة بين خشونة السطح والانعكاسية المنتظمة عند السقوط العمودي»، مجلة الجمعية البصرية الأمريكية ٥١ (١٩٦١)، ١٢٣-١٢٩.

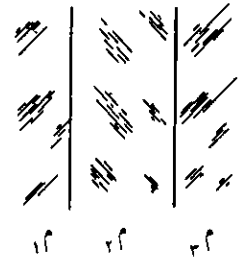
*H. E. Bennett and J. O. Porteus, "Relation Between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence," *J. Opt. Soc. Am.* 51, (1961), 123-29.

اقتراحات لقراءات اضافية

- C. L. Andrews, *Optics of the Electromagnetic Spectrum* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1960).
 R. S. Longhurst, *Geometrical and Physical Optics*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967).
 G. Kortüm, *Reflectance Spectroscopy* (New York: Springer-Verlag, Inc., 1969).

المسائل

- ١-٢:٣ جد الانعكاسية لضوء ساقط عمودياً على سطح الماء-الزجاج إذا كان الزجاج: (أ) تاجياً (م = ١,٥٢٣) (ب) صَوَانِيّاً (م = ١,٧٢١).
- ٢-٢:٣ أنبوبٌ مملوءٌ بالهواء: جانبه مستويان ومُتَوَازيان ومَصْنُوعٌ مِنْ زجاج (م = ١,٦)، غمر في الماء. ما النسبة المئوية للضوء المار في الأنبوب والذي يضيع بسبب الانعكاس عن السطح الأربعة المَعْيَنَةِ، وما النسبة المئوية من الضوء الذي يخرج من الأنبوب؟
- ٣-٢:٣ (أ) إذا كان م_٢ في الشكل ٨ أعلى من كلٍّ من م_١، م_٣ (أو كما يُكْتَبُ اختزالاً $١ > ٢ > ٣$)، فهل يحدث تغير في الطور مقداره ١٨٠° بالانعكاس؟ وإذا حدث هذا فعند أيٍّ من السطحين ١-٢ أو ٢-٣ يحدث هذا التغير؟ (ب) عند أيٍّ سطح يحدث التغير في الطور إذا كان $١ > ٢ > ٣$ (ج) إذا كان $١ < ٢ < ٣$ ؟ (د) إذا كان $١ < ٢ < ٣$ ؟
- ٤-٢:٣ افترض سطحاً فاصلاً بين الهواء والزجاج وضوءاً مستقطباً خطياً يسقط من جهة الزجاج بزاوية ٣٠°. عَيِّنْ باستخدام معاملات فِرْنَلْ نِسْبَتَي سَعَةِ الضوء المنعكس إلى الضوء الساقط وكذلك نِسْبَتَي شِدَّتَيْهِمَا باعتبار أن الضوء الساقط يتعامد مع مستوى السقوط.
- ٥-٢:٣ أَرَسِّمْ شِدَّةَ الضوء المنعكس لكلٍّ من المكونتين: الموازية والعمودية لضوء مستقطب خطي عند انعكاسه عن سطح الماء-الزيت باعتبار أن الضوء يسقط من جهة الزيت (م للزيت = ١,٧٢).
- ٦-٢:٣ عَيِّنْ زاوية بروستر في حالي الانعكاس الداخلي والانعكاس الخارجي عن سطح الزجاج-الزيت (م زجاج = ١,٥٢، م زيت = ١,٨٤).



الشكل ٨

الفصل ٣ : ٣

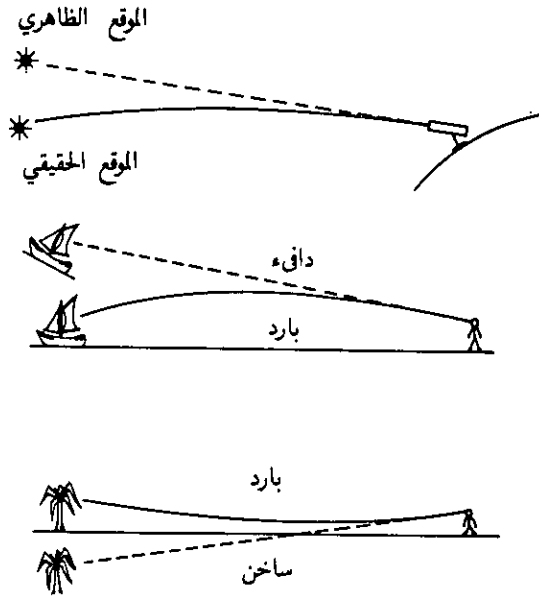
البصريّات الشليرنية (بصريات المواد غير المتجانسة)

Schlieren Optics

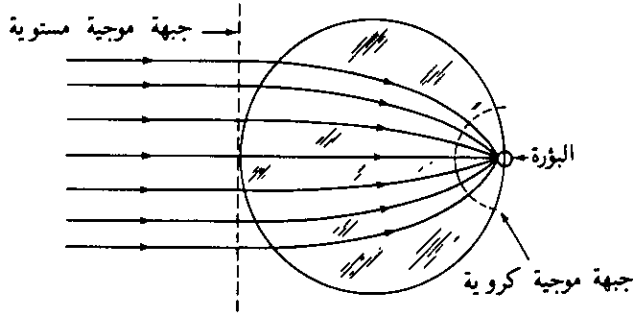
تتناول البصريّات الشليرنية انتشار الضوء في الأوساط غير المتجانسة. ويحدث عدم التجانس أو الشليرنية عند مزج الماء الساخن بالبارد وعند توليد أمواج الصدمة في غاز، وعند فصل الخلوط السائلة إلى مكوناتها ذوات معاملات الانكسار المختلفة كما في الفصل الكهربائي (الألكتروفورسية) أو الطرد المركزي العالي، وفي العديد من الظواهر التي تنطوي على تحذرات ضغط أو درجة حرارة أو كثافة.

ويمكن مشاهدة الآثار الشليرنية في العديد من الظواهر الطبيعية: فعلى سبيل المثال يتناقص معامل انكسار الغلاف الجوي للأرض بالارتفاع، ولذلك يتقوس الضوء الآتي من النجم نحو الأرض، ويكون الارتفاع الحقيقي للنجم أقل من ارتفاعه الظاهر - الشكل ١؛ ويُسمى هذا التأثير بالانكسار الجوي المنتظم. وعلى خلاف ذلك فالانكسار العشوائي random refraction يُعزى إلى الاضطرابات الجوية (الدوامات الجوية)، وهي التي تتسبب في تلؤلؤ النجوم.

ومن الظواهر الأرضية المماثلة ظاهرة الظهور فوق الأفق looming «التي تُرى فوق حقول الثلج أو فوق الماء البارد» والتي تبدو فيها الأجسام الموضوعة على الأرض كأنها معلقة في الهواء - الشكل ١ - الرسم في الوسط. ويمكن رؤية الظاهرة المضادة «السراب» mirage في الأيام المشمسمة الساخنة عندما يكون الهواء فوق الصخر أو الطريق خارج المدن مباشرة أكثر سخونة وبشكل بارز من الهواء الذي يعلوه؛ ولذا يكون معامل انكسار



الشكل ١ : الانكسار الجوي المنتظم (الرسم العلوي) ، الظهور فوق الأفق (الوسط) ، والسراب (الرسم السفلي) : الخطوط المتقطعة تُشير إلى المواقع الظاهرة ، أما الخطوط التامة فتدل على المواقع الحقيقية .

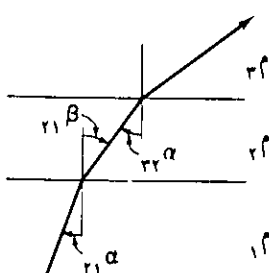


الشكل ٢ : عدسة لونيبرج

الهواء القريب من الأرض أقل من ذلك للهواء البعيد ، فينكسر الضوء إلى أعلى ، الأمر الذي يتسبب في ظهور الأجسام البعيدة تحت الأفق كما لو أنها انعكست في بركة ماء .

وفي عدسة لونيبرج Luneberg lens يُحدث معامل الانكسار المتغير تدريجاً انحناء متواصلاً للحزمة الميكروويفية - الشكل ٢ ، خلافاً للعدسة الاعتيادية حيث يحدث الانكسار عند السطح فقط . وتُصنع مثل هذه العدسات من مواد عازلة كهربائية : من البلاستيك الرغوي على سبيل المثال الذي يتغير ثابت عزله dielectric constant بدلالة المسافة من مركز الكرة .

نظرية البصريات الشليرنية



الشكل ٣: انكسار الضوء في وسط مُتَطَبِّق: و يوجد معامل الانكسار الأعلى عند الطبقة السفلى.

افترض أن معامل انكسار الوسط يتغير بدلالة الارتفاع - الشكل ٣؛ فمثل هذا الوسط يُمكن أن يُصنَّع من محلول الملح الثقيل بإضافة الماء إليه بحرص وبدون تحريك. وافترض كذلك أن الضوء يَدْخُلُ الوسط من الأسفل.

فإذا كانت α_1 هي زاوية السقوط على السطح ١-٢، فإننا نجد من قانون سنيل أن:-

$$[1-2:3] \quad \alpha_1 \text{ جا } n_1 = \alpha_2 \text{ جا } n_2 = \alpha_3 \text{ جا } n_3 \dots$$

$$\text{ولكن:-} \quad \alpha_2 = \alpha_3$$

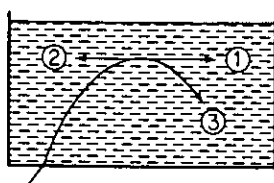
ولذلك نجد لانتقال الضوء من الطبقة الثانية إلى الثالثة أن:-

$$\alpha_2 \text{ جا } n_2 = \alpha_3 \text{ جا } n_3$$

وللطبقة ص، نجد أن:-

$$\alpha_1 \text{ جا } n_1 = \alpha_2 \text{ جا } n_2 = \alpha_3 \text{ جا } n_3 \dots \text{ ولذا فلزاوية سقوط ابتدائية نحصل على:-}$$

$$[2-3:3] \quad m \text{ (ص) جا } \alpha \text{ (ص) = ثابت } \dots$$



الشكل ٤: مسارات افتراضية للضوء في مجال مُتَحَدِّر كاسير.

ويعني هذا أن α تتغير إذا ما تغيرم باستمرار مع الارتفاع. ووفق مبدأ فرمات يختار الضوء مسار الزمن الأقل، وينتقل في مسار قطع مكافئ؛ ولكن إلى أين ينتقل الضوء بعد أن يبلغ أعلى نقطة في القطع المكافئ؟ يُقدِّم الشكل ٤ بعض الامكانات التي تستوفي جميعها المعادلة [٢-٣:٣]: فالمسار (٢) يُطرح بسهولة، ويمكن إجراء الاختيار بين (١) و (٣) إذا ما استكمل المنحنى الهندسي بإنشاء الجبهات الموجية وفق مبدأ هيجنز. وإذا ما تم ذلك، فإننا نرى أن الموجات الثانوية في الوسط الأكتف ستكون ذات أنصاف أقطار أقصر، ولذلك ينحني الضوء إلى أسفل منتقلاً في المسار (٣)، ويشبه هذا المسار حقيقة مسار قذيفة في المجال الجاذبي، وهي مُماثلة ليست عَرَضِيَّة.

وفي الفراغ ذي الابعاد الثلاثة يمكن أن يتغير m في أي اتجاه؛ ولذا نحتاج إلى مجموع ثلاث مشتقات جزئية لوصف التحدر وصفاً تاماً:-

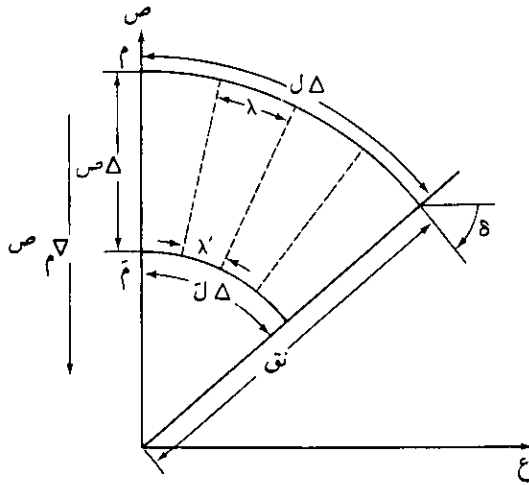
$$\frac{1}{s} \text{ دس} + \frac{1}{s_v} \text{ دص} + \frac{1}{s_e} \text{ دع}$$

وباستخدام متجهات الوحدة نحصل على :-

$$[3-3:3] \quad \nabla = \frac{1}{s} \hat{s} + \frac{1}{s_v} \hat{v} + \frac{1}{s_e} \hat{e} \dots\dots$$

و يوضح تحدر معامل الانكسار ∇m معدل التغير في معامل الانكسار عندما يُقَطَّع الوسط في أي اتجاه.

افترض أن الضوء يسقط على الوسط من اليسار، وأن معامل الانكسار يتناقص في اتجاه v كما في الشكل ٥. وتُمثِّل الجبهات الموجية بالخطوط المتقطعة. فإذا كانت هنالك N جبهات موجية داخل المساحة المشار إليها، فإن طول القوس العلوي يكون:-



الشكل ٥ : انحراف الضوء الساقط من اليسار والمار في وسط متطبق.

$$[4-3:3] \quad \frac{\lambda}{m} N = \lambda N = L \Delta \dots\dots$$

كما يكون طول القوس السفلي :-

$$\dots \frac{1}{\hbar} \mathcal{U} \Delta = \frac{\lambda}{\hbar} N = \lambda N = \mathcal{U} \Delta$$

ويعتمد طولاً هذين القوسين على نصف قطر التكوين وعلى الزاوية الشليرية δ

$$\dots \Delta l = \text{نق } \delta$$

$$\Delta \bar{L} = (\Delta \text{نق} - \Delta \text{ص}) \delta \dots\dots$$

$$\delta(\Delta \text{ ص}) = \bar{\Delta} - \Delta$$

وَلَمَّا كَانَ: $\frac{f-f}{f} \cdot \lambda \quad N = \frac{\lambda}{f} \quad N - \frac{\lambda}{f} \quad N = \Delta - \Delta$

$$J \Delta_m = N : \lambda$$

$$J \Delta \left(\frac{f}{\tilde{f}} - 1 \right) = \frac{f - \tilde{f}}{f \tilde{f}} J \Delta f = J \Delta f - J \Delta \tilde{f} \therefore$$

ولذا فإن :

$$\int \Delta \frac{\bar{m} - \bar{m}}{\bar{m}(\Delta \text{ ص})} = \int \Delta \left(\frac{\bar{m}}{\bar{m}} - 1 \right) \frac{1}{\Delta \text{ ص}} = \delta$$

$$\dots \Delta \frac{1}{\bar{m}} \frac{\Delta}{\Delta \text{ص}} =$$

وفي الفراغ ذي الأبعاد الثلاثة نجد أن :-

$$\frac{1}{m} = \left| \delta \right| \left(\frac{1}{s_6} \hat{s} + \frac{1}{v_6} \hat{v} + \frac{1}{s_6} \hat{s} \right) \cdot \frac{1}{\epsilon_6} \cdot \text{د}$$

$$\dots\dots\dots = \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \overleftarrow{m} \cdot \overleftarrow{d}$$

وللضوء الذي ينتقل في اتجاه المحور ع ، يكفي أن نُحلَّل δ إلى مكوَّنتيها : δ س ،
 δ ص اللتين تتغيَّران في مقدارهما مع الإبقاء على صيغة دالتهما الرياضية Covariant .
 وَ يُمكنُ الحصولُ عليهما من دورانِ المنظومةِ المحورية حَوْلَ المحورِ ، ولذا نَحصلُ على :-

$$\delta = \frac{1}{m} \nabla m \text{ دل} ; \delta = \frac{1}{m} \nabla m \text{ دل} \dots\dots [10-3:3]$$

وَيُمْكِنُ إيجادُ كُلِّ من المكوَّنتين في التقريب الأول بحساب التكامل على طول المسار على النحو التالي :-

$$\delta = \int \frac{1}{m} \frac{m}{s} \text{ دل} ; \delta = \int \frac{1}{m} \frac{m}{s} \text{ دل} \dots\dots [11-3:3]$$

وَإذا كانت العينةُ المفحوصة متجانسةً في الاتجاه ع ، فَمِن السهلِ حلُّ هذين التكاملين :-

$$\delta = \frac{1}{m} \frac{m}{s} \text{ دل} ; \delta = \frac{1}{m} \frac{m}{s} \text{ دل} \dots\dots [12-3:3]$$

وَيُحصلُ على نِصْفِ قُطرِ التكوُّرِ نق بِضَمِّ المعادلتين [5-3:3] و [7-3:3] معاً :-

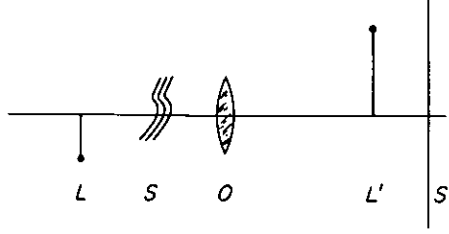
$$\Delta \text{ دل} = \frac{1}{m} (\text{نق} - \Delta \text{ ص})$$

وَبتعويضِ قيمةِ $\Delta \text{ دل}$ في المعادلة [6-3:3] نَحصلُ على :-

$$\text{نق} \delta = \frac{1}{m} (\text{نق} - \Delta \text{ ص})$$

وَبحذفِ δ ، وَحَلِّ المعادلةِ لإيجادِ نق نَحصلُ على :-

$$\text{نق} = \frac{\Delta \text{ ص}}{\frac{1}{m} - 1} = \frac{1}{m} \nabla m \dots\dots [13-3:3]$$



الشكل ٦: مبدأ المنظومة الشليرية مكونة الصور.

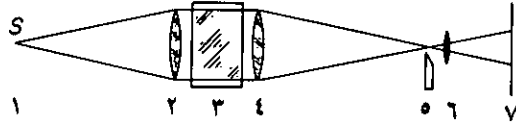
أبصريات الشليرية التجريبية

طريقة توبلر Töpler's method

تقوم المنظومات الشليرية الاعتيادية المكونة للصور على المبدأ التالي: تخيل مصدراً ضوئياً ممتداً محدوداً من الأسفل بطرف حادٍّ ما - الشكل ٦ ، وأنَّ عدسةً شبيّهةً O تقوم بتكوين صورةٍ لكلٍّ من المصدر الضوئي والطرف والجزء غير المتجانس S على النحو التالي: L إلى المستوى المترافق L' ، و S إلى S . ثم تخيل أنه وضع عند L طرفٌ حادٌّ آخر عُذِّل موضعه بحيث لا يغطي إلا صورة المصدر الضوئي . وإذا كان الطرفان الحادَّان متوازيين ، فلا تمرُّ في الطرف الثاني إلا حزمة ضيقة من ضوء المصدر موفرةً بذلك إضاءةً منتظمةً للشاشة .

وسَيَكُونُ لأَيِّ «عدم تجانس» يَحْرِفُ الضوء في اتجاه عموديٍّ على الطَرَفَيْنِ صورة ذات لمعان أقوى أو أضعف . وهكذا يَكُونُ لأَيِّ نقطةٍ في مَجَالِ «عدم التجانس» يَتَحَرَّفُ عندها الضوء عن اتجاهه العاديِّ نقطةً مترافقةً في مستوى الصورة ؛ وَيَكُونُ تَأَلَّفُ هذه النقاطِ صورةً حقيقيةً لَعَدَمِ التجانس . وهذا هُوَ مبدأ طريقة توبلر* : فَمَلَمَحْهَا الأساسيُّ هُوَ تركيب عمليتين لتكوين الصورة : إحداهما «توقُّرُ الإضاءةِ العامَّةِ وتَدُلُّ على مُجَرَّدِ وجودِ عدم التجانس» ، والثانية تُكَوِّنُ صورةً حقيقيةً لِمَجَالِ عَدَمِ التجانسِ بِعَزَلٍ عن الانحرافِ الزاويِّ الذي يُحْدِثُهُ عَدَمُ التجانسِ .

*A. Töpler, "Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode," Bonn, 1864. Also *Pogg. Ann. Physik u. Chem.* 127 (1866), 556-80. Actually, Foucault was first (Foucault's knife edge test); L. Foucault, "Mémoire sur la construction des télescopes en verre argenté," *Ann. de l'Observatoire Imp. de Paris* 5 (1859), 197-237.



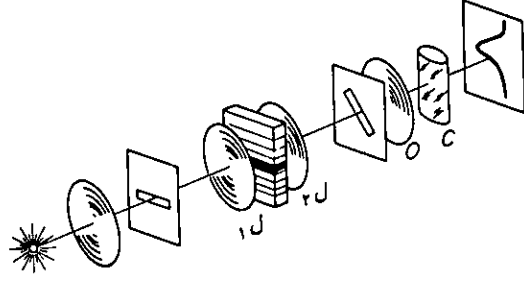
الشكل ٧ : طريقة تولبر الشليرنية

وَعَمَلِيَا يَمُرُّ الضَّوُّ مِنْ الشَّقِّ (١) عَبْرَ العدستين (٢) وَ (٤)، ثُمَّ يُرَكَّزُ عَلَى طَرَفٍ حَادٍّ (٥)، وَهَذَانِ الإِجْرَاءَانِ مَعًا يَشْكِلَانِ الْعَمَلِيَّةَ الْأُولَى. وَعِلَاوَةً عَلَى ذَلِكَ تَقُومُ عَدْسَةُ الْكَامِيرَا أَوِ الشَّيْئَةُ (٦) بِإِسْقَاطِ التَّفَاصِيلِ فِي «مَجَالِ عَدَمِ التَّجَانُسِ» (٣) عَلَى سِتَارَةٍ (٧) - الشَّكْل ٧. وَ يَنْبَغِي أَنْ تَكُونَ الْعَدْسَةُ أَوِ الْعَدْسَاتُ الْقَرِيبَةُ مِنَ الْمَجَالِ كَبِيرَةً لِتُغَطِّيَ الْمَجَالَ بِكَامِلِهِ، كَذَلِكَ يَنْبَغِي أَنْ تَكُونَ أَيْضًا مِنْ نَوْعِيَّةٍ بَصَرِيَّةٍ عَالِيَةٍ وَخَالِيَةٍ مِنْ عَيُوبِ الصَّقْلِ أَوْ كَسُورِهِ؛ وَإِلَّا فَإِنَّ تِلْكَ الْعَيُوبَ سَتُظْهِرُ. وَتُعْتَبَرُ شَيْئَاتُ التَّلَسُّكُوبَاتِ الْفَلَكَيَّةِ مُنَاسِبَةً تَمَامًا لِهَذَا الْغَرَضِ. وَتَزْدَادُ حَسَاسِيَّةُ الْمَنْظُومَةِ بِازْدِيَادِ الْبَعْدِ الْبُؤْرِيِّ لِرَأْسِ عَدَمِ التَّجَانُسِ، وَمِنْ جِهَةٍ أُخْرَى يُلْزَمُ أَنْ تَكُونَ الْعَدْسَةُ (٦) أَوْسَعَ قَلِيلًا مِنْ بُؤْرِ الْخُرُوجِ.

وَعَادَةً يُعَدَّلُ الطَّرْفُ الْحَادُّ بِحَيْثُ لَا يَكُونُ مَجَالُ الصُّورَةِ كُلُّهُ مُعْتَمًا، الْأَمْرُ الَّذِي يَسْمَحُ لِلْمُرءِ بِمُشَاهَدَةِ عَدَمِ التَّجَانُسِ الَّذِي يَحْرِفُ الضَّوُّ إِلَى أَسْفَلَ بِدَلِّ حَرْفِهِ إِلَى الْأَعْلَى مِمَّا يُوْدِّي إِلَى جَعْلِ «عَدَمِ التَّجَانُسِ» مُعْتَمًا بِدَلِّ كَوْنِهِ سَاطِعًا. وَغَالِبًا يُسْتَعَاذُ عَنْ الْعَدْسَاتِ وَاسِعَةِ الْقَطْرِ اللَّازِمَةِ لِلْمَسَدَّةِ وَلِرَأْسِ الْمَجَالِ بِمَرَايَا مُقَعَّرَةٍ سَطُوحُهَا مِنْ نَوْعِيَّةٍ فَائِقَةٍ.

المنظومات الشليرنية الراسمة

يُمْكِنُ أَنْ تُبْنَى الْمَنْظُومَاتُ الرَّاسِمَةُ ذَاتِيًّا مِنْ أَجْزَاءٍ مُتَحَرِّكَةٍ أَوْ مِنْ دُونِهَا. فَالْمَنْظُومَاتُ بِدُونِ الْأَجْزَاءِ الْمُتَحَرِّكَةِ هِيَ الْمُشِيرَةُ، لِأَنَّهَا تَسْتَخْدِمُ وَسَائِلَ بَصَرِيَّةً لِلرَّسْمِ الذَّاتِي. وَتُمَثِّلُ الْمَنْظُومَاتُ الشَّليرنِيَّةُ مِنْ هَذَا النَّوعِ دَوْرًا فِي تَجَارِبِ الْإِنْتِشَارِ diffusion وَالطَّرْدِ الْمُرَكَّزِي الْعَالِي وَالْفَصْلِ الْكَهْرَبَائِي. وَتُمَثِّلُ الْمِيزَةُ الرَّئِيسَةُ لِهَذَا النَّوعِ فِي اسْتِخْدَامِ بُعْدٍ وَاحِدٍ لِتَكْوِينِ صُورَةٍ مَا، بَيِّنَتَا يُنْزَكُ الْبَعْدُ الْآخَرُ حُرًّا لِيُظْهِرَ مَقْدَارَ التَّحْدُرِ. وَ يُغَطِّي الْجِسْمُ عَادَةً بِشَقٍّ: اتِّجَاهُهُ فِي اتِّجَاهِ التَّحْدُرِ.



الشكل ٨ : المنظومة الشليرنية الراسمة ذاتياً والمسماة باسم فيلبوت وسفينسون.

وَيَتِمُّثَلُ المنحنى الكلاسيكي للرسم الشليريني الذاتي في طريقة العدسة الأسطوانية لفيلبوت وسفينسون * Philpot and Svensson . ويُظهِرُ الشكل ٨ مبدأ هذه الطريقة : إذ يأتي الضوء مِنْ شَقٍّ أَفْقِيٍّ إِلَى اليَسَارِ موضوع في المستوى البؤري للعدسة ل_١ ، ثُمَّ يَمُرُّ الضوءُ الْمَسْدُودَ عَبْرَ الْمَجَالِ الشليريني الذي يَحْوِي التَحْدُرَ ، وَ يُرَكَّزُ بَعْدَ ذَلِكَ بِالْعَدْسَةِ ل_٢ فِي مُسْتَوَى الشَّقِّ الْمَائِلِ . وَ يَقَعُ خَلْفَ الشَّقِّ وَقَرِيباً مِنْهُ عَدْسَةٌ أُخْرَى O تُسَقِّطُ صُورَةَ الْمَجَالِ الشليريني عَلَى سِتَارَةٍ إِلَى اليمين ، وَأخيراً تُكَوِّنُ الْعَدْسَةُ الْأَسْطَوَانِيَّةُ C صُورَةً لِلشَّقِّ الْمَائِلِ عَلَى السِتَارَةِ أَيْضاً .

وَلَوْ كَانَ الشَّقُّ الْمَائِلُ وَالْعَدْسَةُ الْأَسْطَوَانِيَّةُ غَيْرَ موجودين لتكونت صورة لعدم التجانس على السِتَارَةِ ؛ وَبوجودِهِمَا وَبِدُونِ تحْدُرٍ كَاسِرٍ تُكَوِّنُ الْعَدْسَتَانِ ل_١ ، ل_٢ مَعاً صُورَةً لِشَقِّ الدخولِ عَلَى الشَّقِّ الْمَائِلِ . وَبوجودِ تحْدُرٍ كَاسِرٍ فِي الْمَجَالِ يُخَرِّفُ جُزْءٌ مِنَ الضوءِ إِلَى اسفَلٍ بَحَيْثُ تَظْهَرُ صُورَةٌ أَضَافِيَّةٌ لِشَقِّ الدخولِ فِي أَسْفَلِ الشَّقِّ الْمَائِلِ ، الْأَمْرُ الَّذِي يَتَسَبَّبُ فِي انْتِفَاحِ المنحنى الَّذِي يُرَى فِي الصُّورَةِ ؛ وَيمكنُ تَعْيِينُ تحْدُرِ الْمَجَالِ مِنْ مَقْدَارِ الانْتِفَاحِ . وَيمكنُ الِاعْتِيَاضُ عَنِ الشَّقِّ بِسَلْكٍ مَائِلٍ بِزَاوِيَةٍ مِمَّا ثَلَاةٍ ، وَعندها يَكُونُ الحُطُّ عَلَى السِتَارَةِ مَعْتَمَماً بِدَلِّ كَوْنِهِ سَاطِعاً .

المنظومات الشليرنية ذات البعدين

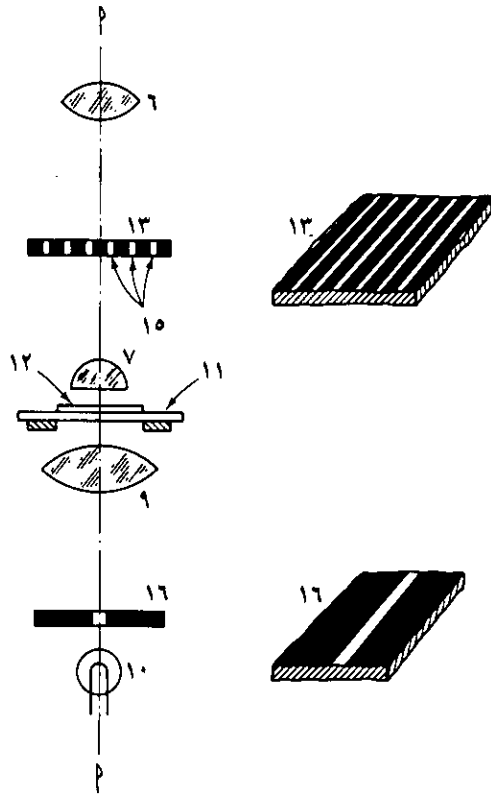
وَتَعْمَلُ هذه المنظوماتُ فِي وَقْتٍ وَاحِدٍ عَلَى :-

(١) تَكْوِينِ صُورَةٍ ذاتِ بُعْدَيْنِ لِلْمَجَالِ الَّذِي يَحْوِي عَدَمَ التَّجَانُسِ . (٢) الدَّلَالَةِ عَلَى

*H. Svensson, "Direkte photographische Aufnahme von Elektrophorese-Diagrammen," *Kolloid-Z.* 87 (1939), 181-86.

مقدار و/أو اتجاه التحدرات المكوّنة لعدم التجانس . وللصورة الاعتيادية بُعدان ، وكلاهما لازم لإظهار موضع الجسم ؛ ولذا يلزم بُعد آخر لتوضيح مقدار التحدرات ، ويمكن أن يكون هذا البُعد الإضافي لوناً أو تشوهات محلية لِنقطة منتظمة أو نمطاً خطياً . وإذا ما أُرْدنا استخدام مُشبك grid ، فإنّ محزوز رونشي الذي له تواتر مكاني منخفض هو الاختيار الأفضل .

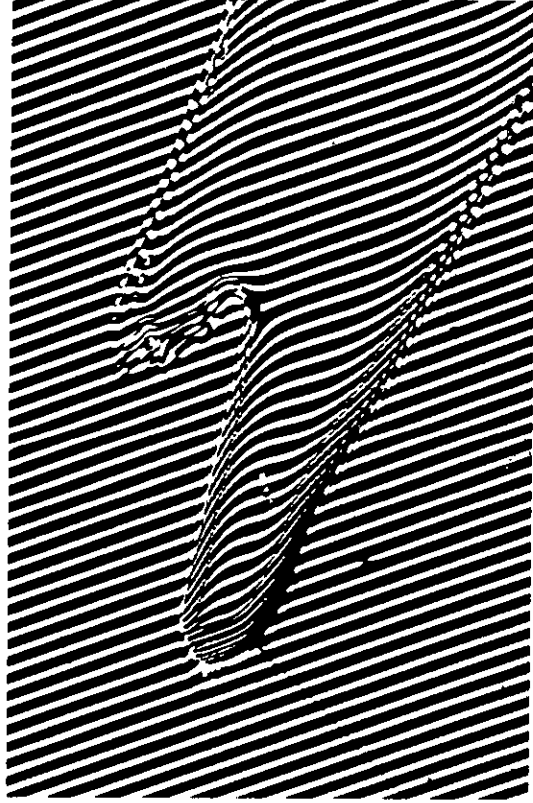
وفي الميكروسكوب الذي يقوم على هذا المبدأ - الشكل ٩ ، يوضع المشبك في منتصف المسافة تقريباً بين المستوى البؤري الخلفي للشبيبة والمستوى البؤري الخلفي للعينية ، ولا تُعتبر دقة الموقع هامة . وعندما يكون المشبك قريباً من العينية فإنّ الظل الذي تكونه يكون



الشكل ٩ : ميكروسكوب (مجهر) محزوز عدم التجانس : أ - أ المحور البصري ، (٦) العينية ، (٧) الشبيبة ، (٩) المكثف ، (١٠) المصدر الضوئي ، (١١-١٢) عينة الفحص ، (١٣) مشبك رونشي ، (١٦) غشاء مشقوق قابل للدوران . [من ج. ر. ماير - أرندت : « المنظومة البصرية للميكروسكوبات أو الاجهزة المماثلة » ، براءة الاختراع الامريكية رقم ٢,٩٧٧,٨٤٧ ، ٤ نيسان ،

[. ١٩٦١

عالياً في دقته، إلا أنَّ الحساسية تكونُ في أقلّها. وعندما يكونُ المشبكُ قريباً من الشيئية فالعكسُ هو الصحيحُ. وإذا ما أديرَ الشقُّ موازياً للمشبكِ فإنَّ الصورةَ الظاهرةَ تتكونُ من مُتسلسلةٍ من الخطوطِ المتوازية والمتساوية في بُعْدِها والتي تتراكبُ عليه. وبدونِ وجودِ عدمِ التجانسِ تكونُ هذه الخطوطُ مستقيمةً، إلا أنَّ أيَّ تحدراتٍ في معاملِ الانكسارِ تَتَسَبَّبُ في إحداثِ تشوهاتٍ مُميّزة - الشكل ١٠.



الشكل ١٠ : صورة فوتوغرافية ميكروية لطبقة رقيقة من الإسمنت اللائتي الذي يُغطّي جزئياً شريحة زجاجية . لقد تسببت تحدرات السُمكِ قريب حد الطبقة في تشوهاتٍ مميّزة للنمط الخطي .

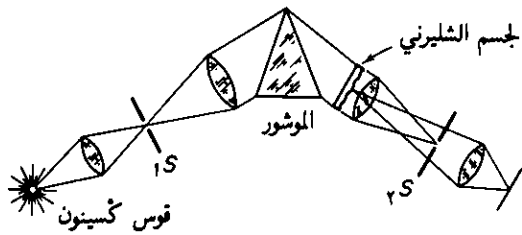
ومن المثيرِ ملاحظة أنه يمكنُ الاعتياضُ عن شِقِّ الدخولِ بِمُشبكٍ رونشي الثاني الذي يتميزُ بالسماجِ لِمزيدٍ من الضوءِ بالمرورِ عَبْرَ المنظومة، ولا يلزَمُ أن يكونَ المُشبكُان متآلفَيْن : فكلُّ ما يلزَمُ أن يكونا متوازيين، ولا يشترطُ حتّى أن يكونا في مُستويين مترافقين . ويُعزى التَّمَطُّ الناتجُ إلى ظاهرةٍ فواري ؛ وهي حقيقةٌ يمكنُ التحققُ مِنْها بسهولةٍ بإزالةِ إحدى المشبكين ؛ إذ يختفي النمطُ عندئذٍ .

ومرة أخرى ، وفي غيابِ عَدَمِ التجانسِ ، يتكوَّن النمطُ التموجيُّ من حُطوطٍ مستقيمةٍ متوازيةٍ ؛ ووجودُ تحذراتٍ في المجالِ تُصَبِّحُ الخطوطُ التموجيةُ مشوهةً بطريقةٍ مميزةٍ .

ولا يوجدُ هنالك سببٌ لِحَضَرِ لَفِظِ الشليرينِ أو عَدَمِ التجانسِ في الاضطراباتِ التي تَحْرِفُ الضوءَ المارَّ في وسطٍ ما ؛ وإذا انعكسَ الضوءُ عَنْ سطحٍ غَيْرٍ منتظمٍ فإنَّ عَدَمَ الانتظامِ هذه تُسَمَّى عَدَمَ تجانسٍ أيضاً . وفي الحقيقة فقد استُخدمَتِ المنظوماتُ الشليرينيةُ لِفَحْصِ المرايا الكبيرة نظراً لِسُهولةِ تَعْدِيلِها .

المنظومات الشليرينية اللونية Color schlieren systems

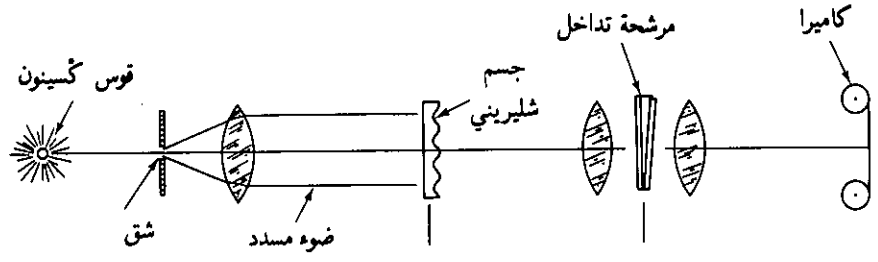
يمكنُ بناءُ هذه المنظوماتِ بطرقٍ عدةٍ : ففي بعضها تُستخدَمُ مَصَفوفاتٌ غيرُ متصلةٍ من مرشحاتِ اللونِ إمَّا في صورةِ حلقاتٍ متحدةٍ المركزِ أو مناطقٍ أو في صورةِ قطاعاتٍ ؛ أمَّا المنظوماتُ اللونيةُ المتصلةُ فتُبنى غالباً مثلَ كاشِفِ الطيفِ الموشوريِّ-الشكل ١١ . يُسَقَطُ



الشكل ١١ : المنظومة الشليرينية اللونية المبنية على هيئة كاشِفِ الطيفِ الموشوريِّ .

الضوءُ من مصدرٍ ضوءٍ أبيضٍ عَلَى الشقِّ ١S (الى اليسار) ، ثُمَّ يَسَدُّ ، ثُمَّ يَمُرُّ الضوءُ عَبْرَ موشورٍ وَعَبْرَ الجسمِ الشليرينيِّ ، فيكوَّن طيفاً في مُستوى الشقِّ الثاني ٢S . وَ يَوْضَعُ خَلْفَ ٢S شِنيَّةٌ كاميرا أو أيَّةُ عدسةٍ تُكوِّنُ صورةً للجسمِ الشليرينيِّ في مستوى الصورة . وَ يُعَمِّلُ الاتجاهُ الاعتياديُّ في غيابِ الجسمِ الشليرينيِّ بِلَوْنٍ يُخْتَارُ اعتباطاً ؛ إِلاَّ أَنَّ وجودَ الجسمِ الشليرينيِّ سَيَحْرِفُ الضوءَ ، وَ يَظْهَرُ الجسمُ الشليرينيُّ لذلك بِلَوْنٍ مغايرٍ يتبعاً لمقدارِ التحديرِ واتجاهِهِ .

ومن المضاَرِّ اللازمةٍ لمعظمِ المنظوماتِ الشليرينيةِ كوَّنُ جزءٍ من الضوءِ يُحَجَّبُ ما بَيْنَ العدسةِ التي تَكوِّنُ الصورةَ وَمُستوى الصورةِ ؛ ومن الواضحِ أَنَّ هذا الأمرَ يُفْسِدُ نوعيةَ الصورةِ .



الشكل ١٢ : المنظومة الشليرينية اللونية باستخدام مرشحة تداخل من النوع الإسفيني.

لكن إذا ما أُدخل اللون عوضاً من ذلك بمرشحة تداخل من النوع المتصل أو الإسفيني، فإن من الممكن تجنّب معظم تقييدات الحزمة. ويوضح الشكل ١٢ هذه التركيبة.

وتحدث ثلاث عمليات في وقت واحد:-

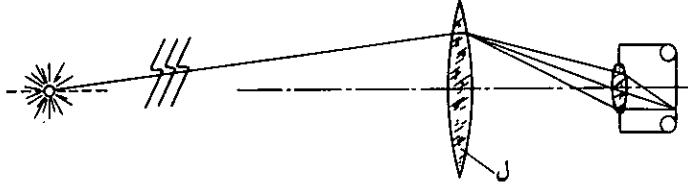
١. يُكوّن الرأس الشليريني الذي هو مجموعة من عدستين صورة حقيقية للجسم.
٢. وبغياب الجسم الشليريني يُكوّن ظلّ لمرشحة التداخل، ويظهر هذا الظلّ مثل طيف في الأرضية.
٣. وإذا ما وضع الجسم الشليريني فإنّ الفعل الموشوريّ على أيّ جزء من حجيّه سيحرف الضوء عبّر أجزاء مختلفة من المرشحة؛ وتكون النتيجة أنه يمكن التعرف إلى أجزاء الجسم التي تعطي انحرافات معينة بواسطة الألوان المختلفة.

الإسقاط الظلي Shadow projection

إنّ «عدم التجانس» هو تحدّرات محلية لمعامل الانكسار مثل $\frac{f}{s}$ وعلى خلاف ذلك تُستخدم في الإسقاط الظلي المشتقة الفراغية الثانية لمعامل الانكسار $\frac{f^2}{s^2}$.

ويمكن تحقيق الإسقاط الظلي بالتجربة بسهولة؛ وكلّ ما يلزم هو السماح للضوء من مصدر نقطيّ بالمرور عبّر الحجم إلى ستارة بعيدة. وبغياب «عدم التجانس» تكون الستارة منتظمة الإضاءة. وتتسبّب التغيرات الموضعية في الكثافة أو معامل الانكسار (كما ذكر سابقاً) بتغيرات مناظرة في إضاءة الستارة.

وَيُحْصَلُ عَلَى صُورَةٍ فُوتُوغَرَفِيَّةٍ لِأَنْمَاطِ الظِّلِّ الشَّلِيرِنِيِّ غَالِباً بِالاعْتِيَاظِ عَنِ السِتَارَةِ
بَعْدَسَةِ ذَاتِ قَطْرِ كَبِيرٍ (لِ فِي الشَّكْلِ ١٣) وَلَيْسَ بِتَصْوِيرِ السِتَارَةِ، إِذْ تُرَكَّزُ الْكَامِيرَا عَلَى
الْعَدْسَةِ بَدَلِ تَرْكِيزِهَا عَلَى الْمَجَالِ الشَّلِيرِنِيِّ .



الشكل ١٣ : أخذ صورة للظلال الشليرينية

اقتراحات لقراءات اضافية

- H. Schardin, "Die Schlierenverfahren und ihre Anwendungen," *Erg. exakt. Naturwiss.* 20 (1942), 303-439.
- N. F. Barnes and S. L. Bellinger, "Schlieren and Shadowgraph Equipment for Air Flow Analysis," *J. Opt. Soc. Am.* 35 (1945), 497-509.
- J. R. Meyer-Arendt and C. B. Emmanuel, "Optical Scintillation," Natl. Bur. Standards Technical Note 225, Washington, 1965.
- F. P. Kapron, "Geometrical Optics of Parabolic Index-Gradient Cylindrical Lenses," *J. Opt. Soc. Am.* 60 (1970), 1433-36.

المسائل

- ١-٣:٣ قطعة بلاستيك شفافة أبعادها ٦٠×١٠×٢ مم. فإذا كان معامل انكسار القطعة يتغيرُ بازديادٍ في اتجاه الطول من ١,٤ الى ١,٥٦. فكَمْ تَنَحَرُفُ حَزْمَةٌ مِنَ الضَّوءِ الْمَسْدَّدِ السَّاقِطِ عَمُودِيًّا عَلَى بُعْدِ ١ م مِنَ الْقِطْعَةِ؟
- ٢-٣:٣ لِقِطْعَةٍ زُجَاجٍ طَوَّلُهَا ٥ سَم وَمَسَاحَةُ مَقْطَعِهَا ١×١ سَم خِصَائِصُ كَاسِرَةٍ بَحِيثُ يَنْحَرِفُ شُعَاعُ مُسَدَّدٍ مِنَ الضَّوءِ مَرًّا خِلَالَهَا بِأَقْصَرِ مَسَافَةٍ ٤ سَم عَلَى مَقْيَاسٍ يَبْعُدُ مَتْرَيْنِ. فَإِذَا كَانَ مُعَامِلُ انْكَسَارِ الزُّجَاجِ عِنْدَ أَحَدِ طَرَفَيْهَا ١,٥١ فَجَدْ مُعَامِلَ الانْكَسَارِ عِنْدَ الطَّرَفِ الْآخَرِ.

٣-٣:٣ يزيد معامل الانكسار لمحلولي ملح راكذ من $m = 1,3$ عند الوجه العلوي إلى $m = 1,7$ عند القاع. فإذا كانت المسافة بينهما 10 سم، وكان طول المسار في المحلول 1 سم، فجد زاوية رأس الموشور الزجاجي ($m = 1,5$) الذي يُعطي نفس الانحراف.

٤-٣:٣ تخيل أن الجليسرين والماء اللذين لهما مُعاملَا انكسار مُختلفان ويمتزان قد وُضعا بحريص في أنبوب شفاف بحيث يكون أحدهما فوق الآخر. فإذا فُحص المحلول بالمنظومة الشليرية ذات العدسة الاسطوانية ليفلبوت وسفينسون، فما التأثير الذي يُرى : أ) حالاً بعد أن يُملأ السائلان في الأنبوب ب) بعد أن يبدأ الانتشار ج) عند خلط السائلين تماماً؟

٥-٣:٣ جُعِلت قطعة كبيرة من البلاستيك ذات معامل انكسار غير منتظم في هيئة فطيرة حلقيّة: أقطر الداخلي للفجوة في الفطيرة $= 3,4$ سم، والقطر الخارجي $4,6$ سم، والقطر الحلقي 6 سم. فإذا كان متوسط معامل انكسار البلاستيك $1,6$ ، فما تحدّر معامل الانكسار في اتجاه يُضف قطر الفطيرة كُلّها الذي يلزم للمحافظة على انتقال حزمة الضوء في اتجاه مركز القطعة. عبّر عن التحدر بدلالة مُعامل الانكسار على السطحين الخارجي والداخلي.

٦-٣:٣ تخيل كرة جامدة من مادة شفافة: أقصى مُعامل انكسار لها في المركز ومُعامل انكسارها على السطح $1,4$: أ) جد معامل الانكسار الأقل في المركز حتى يبقى الضوء بعد قذفه إلى الكرة منتقلاً داخل دائرة كبيرة من دون أن يَمَسَّ السطح. ب) جد قطر الكرة اللازم.

الفصل ٣ : ٤

سرعة الضوء

Velocity of Light

ينتقلُ الضوءُ بسرعةَ فائقةٍ إلى درجةٍ أنه لا يوجدُ شيءٌ في خبرتنا اليومية يدلُّ على أنَّ سرعةَ الضوءِ ليستَ غيرَ متناهيةٍ. وقد ظنَّ دميانوس ابنُ هليودور لاريا أنَّ انتشارَ الضوءِ آنيٌّ، ذلك لأنَّ الضوءَ يصلُّنا في نفسِ اللحظةِ التي تَظْهَرُ فيها الشمسُ من السحابِ. ومن الطبيعيِّ أنَّا لا نستطيعُ رؤيةَ الشمسِ وهي تنفُذُ من السحابِ قَبْلَ أنْ يصلَنا ضوءُها، ولذلك لا تَسْتَتِيعُ هذه المحاكمةُ أيةَ نتيجةٍ. واشترطَ كِبْلَر Kepler موافقاً دميانوس أنَّ الضوءَ لا كتلةٌ لَهُ ولا وزنٌ.

وكانَ جاليلو من أوائلِ الذين اقترحوا أنَّ الضوءَ يستغرقُ زمناً محدوداً عند الانتقالِ من نقطةٍ إلى أخرى؛ ففي كتابه «Discorsi» يبحثُ نظريتهُ في سرعةِ الضوءِ مستعيناً بشخصيتينِ وهميتينِ: ساجريدو، ورجُلٍ غيبيٍّ بقصِّ الشيءِ سمبليسيو. وفيما يلي بَعْضُ ممَّا يقولانه:-

سمبليسيو:

تُبَيِّنُ لنا الخبرةُ اليوميةُ أنَّ انتشارَ الضوءِ آنيٌّ، ذلك لأنَّا حينما نرى قذيفةً من مسافةٍ بعيدةٍ فإنَّ وميضَها يصلُّنا من دونِ انقضاءِ زمنٍ؛ لكنَّ الصوتَ لا يصلُّ أذنَّا قطُّ إلاَّ بَعْدَ فترةٍ زمنيةٍ ملحوظةٍ.

ساجريدو:

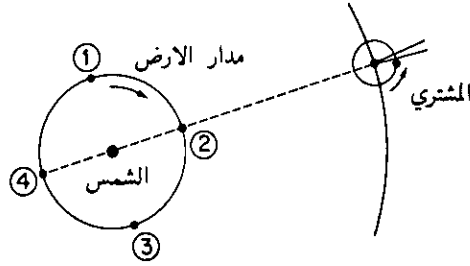
حَسَناً، سمبليسيو. إنَّ الشيءَ الوحيدَ الذي أَقْدِرُ على استدلالِهِ من قولك إنَّ الصوتَ إذْ يصلُّ أذنَّا يَنْتَقِلُ ببطءٍ أَكْثَرَ من الضوءِ. إنَّ قولك لا يخبرُنِي عَمَّا إذا كانَ الضوءُ يَنْتَقِلُ آنياً أو أنَّه يستغرقُ زمناً مع أنَّه سريعٌ للغاية.

ثم يقترح ساجريدو، وواضح أنه هوجاليلو نفسه، طريقة لقياس سرعة الضوء: ففي الليل يقف رجلان متقابلين على مسافة ما، وكلُّ منهما يحمل مصباحاً وستارة لحجب الضوء، ويُزيل أحد الرجلين الستارة عن مصباحه، وفي اللحظة التي يراه فيها الرجل الآخر يفعل نفس الشيء بمصباحه. ويلاحظ الرجل الأول الزمن المنقضي من لحظة كشفه المصباح وحتى لحظة رؤيته الضوء من مصباح الآخر. ولا حاجة بنا الى القول إنَّ زمن ردِّ الفعل عند الانسان أكبر بكثير من الزمن الذي يستغرقه الضوء لإكمال رحلته كاملة وذلك لمعظم المسافات الارضية؛ ولذا ينبغي أن تفشل التجربة.

الطرق الفلكية لقياس سرعة الضوء

طريقة رومر Romer's method

قام رومر عام ١٦٧٥ بأول تعيين لسرعة الضوء بملاحظة خسوف قمر المشتري (جوبيتر) الأقرب. ولهذا القمر دورة مُدَّتْها ٤٢,٥ ساعة، وهو يُظهر خسوفاً على فترات منتظمة مُدة كُلِّ منها ٤٢,٥ ساعة لو كانت الأرض ساكنة. ولكن الأرض تدور حول الشمس، وفي دورانها تأخذ المواقع ١، ٢، ٣، ٤ في الشكل ١.



الشكل ١ : طريقة رومر لقياس سرعة الضوء.

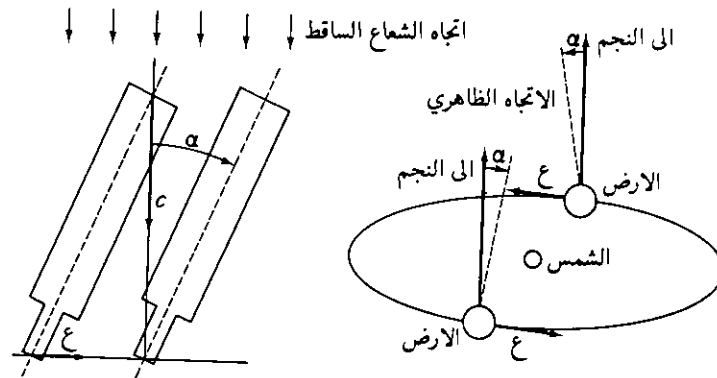
لاحظ رومر أنَّ الخسوف يحدث قبل $\frac{8}{1}$ دقيقة تقريباً من الزمن المُتتَابِع استناداً إلى المعدلات السنوية وذلك عندما تكون الأرض قريبة من المشتري (جوبيتر) - الموقع ٢، كما وَجَد أنَّ الخسوف يتأخر بنفس المقدار عندما تكون الأرض في الموقع المقابل (الموقع ٤). واستنتج رومر أنَّ ضعف هذا الفارق هو الزمن الذي يستغرقه الضوء في قطع قطر مدار

• أولاف رومر Olaf Romer (١٦٤٤-١٧١٠): ألباني والفلكي الدانمركي.

الأرض حول الشمس (3×10^8 كم)؛ وبذلك حصل على الرقم ٣٠٣,٠٠٠ كم/الثانية لسرعة الضوء.

ألزوغان النجمي Stellar aberration

بعد حوالي ٥٠ سنة، قام برادلي Bradley * بنوع مختلف كلية من المشاهدات الفلكية التي استنتج منها سرعة الضوء. لقد رأى جميعنا أن قطرات الماء التي تسقط على نافذة عربة سكة حديد تنحدر رأسياً إلى أسفل إذا كان القطار ساكناً، وتنحدر في اتجاه مائل إذا كان القطار متحركاً. وعلى نحو مماثل فإذا نظرنا إلى نجم قريب من السميت، فإننا نقدر أن نُصوّب التلسكوب نحو النجم لو كانت الأرض ساكنة. ولكن الأرض تتحرك بسرعة c ، ومن ثم فلا بد من إمالة التلسكوب قليلاً بزاوية مقدارها α ، بحيث يمر الضوء الذي يدخل طرفه العلوي بالعينية. وبعد نصف سنة تكون الأرض في الموضع المقابل لموضعها السابق في مدارها، وتكون سرعتها أيضاً ولكن في الاتجاه المعاكس، كذلك يكون موقع النجم الظاهري قد تغير بمقدار α (الشكل ٢).



الشكل ٢ : الامالة اللازمة لتلسكوب متحرك بسبب الزوغان (الى اليسار)؛ والرسم (الى اليمين) يظهر التغير في الاتجاه الظاهر لنجم.

* جيمس برادلي (١٦٩٣-١٧٦٢): الفلكي البريطاني وأستاذ الفلك في جامعة أوكسفورد. ج.
برادلي: «محاضرات الجمعية الملكية اللندنية» ٣٥ (١٧٢٨)، ٦٣٧. انظر أ. ب. ستوارت:
«اكتشاف الزوغان النجمي»، الامريكية العلمية Scientific American ٢١٠ (آذار ١٩٦٤)،
١٠٠-١٠٨.

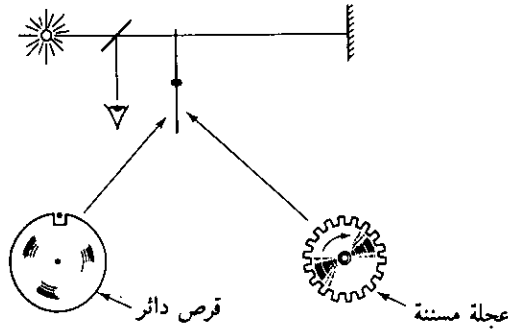
وقد وُجِدَ أَنَّ المقدارَ الفعليَّ للزوغانِ يَبْلُغُ ٢٠,٤٨. وَلَمَّا كَانَ ظَا $\alpha = \frac{c}{c}$ ، وَسُرْعَةُ الأرضِ المداريةُ ١٠×٣ م/ث، فَإِنَّ سُرْعَةَ الضوءِ هي: $c = \frac{١٠ \times ٣}{١٠ \times ٩,٩٣} = ٨١٠ \times ٣$ م/ث.....

الطرق الارضية لتعيين سرعة الضوء

طريقة فيزو Fizeau's method

قام فيزو* عام ١٨٤٩ بأول تعيين أرضي لسرعة الضوء، وباستخدام المساريتين مُنمارتر وسورسنس الذي طوله ٨٦٣٣ م وكذلك عجلة مسننة تحوي في حافتها ٧٢٠ سنًا، وتدور بسرعة ١٢,٦ دورة/ث، حصل على قيمة لسرعة الضوء تبلغ ٣١٣,٠٠٠ كم/ث.

ومن السهل فهم طريقة فيزو إذا تخيلنا قرصاً دائراً بين واحدة - الشكل ٣؛ فعندما يكون القرص ساكناً أو دائراً ببطء فإن المشاهد الذي ينظر إلى مرآة بعيدة من شاطئ شعاعي يرى مصدر الضوء. ولكن عندما تزداد سرعة دوران القرص فإن الجزء المغلق من القرص يقطع النبضة الضوئية عند عودتها إلى القرص. ولذا يبدو المصدر أكثر غمّة حتى يختفي تماماً من النظر. وفي الحقيقة نستعمل العجلة المسننة بدل القرص.

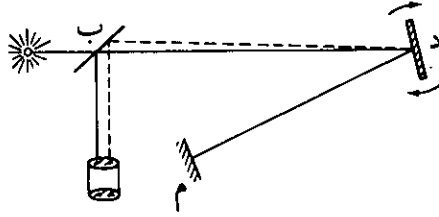


الشكل ٣: تجربة العجلة المسننة لفيزو.

* أرماند هيبوليت لويس فيزو Armand Hippolyte Louis Fizeau (١٨١٩-١٨٦٨): الفيزيائي الفرنسي.

طريقة فوكو Foucault's method

اقترح ويتسون Wheatstone أن من الممكن استخدام مرآة تدور بدل العجلة المسننة، وهي فكرة طوّرها فوكو عام ١٨٥٠ هـ. فإذا كانت المرآة في الشكل ٤ ساكنة أو دائرة ببطء فإن الضوء ينعكس إلى الشاطر الشعاعي ب منتقلاً في مسار الخط المتصل. ولكن عندما تدور المرآة بسرعة يُزاح الضوء المنعكس إلى الخط المتقطع. ومن ثم يَرى المُشاهد الذي ينظر من عينية الميكرومتر مقدار الإزاحة، ويستطيع قياسها. وقد وجد فوكو من السرعة الزاوية للمرآة ومن المسافة بين المرآة الدائرة والمرآة الثابتة م أن سرعة الضوء تبلغ ٢٩٨,٠٠٠ كم/ث؛ وهو رقم قريب من القيمة المقبولة.



الشكل ٤ : تجربة المرآة الدائرة لفوكو.

طريقة ميكلسون Michelson's method

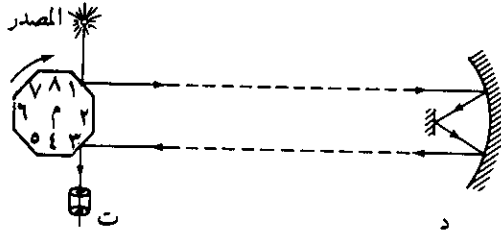
قام ميكلسون هـ، بأدق قياسات سرعة الضوء التي استخدمت جهازاً مبنياً على طريقة فوكو؛ حيث زيد عدد السطوح العاكسة للمرآة الدائرة التي تُحرّك بتيار هوائي نفّاث إلى ثمانية سطوح، كما زيدت المسافة إلى أكثر من ٣٥ كم.

ومع أن الشكل هـ مبسّط بعض الشيء إلا أنه يمثّل طريقة ميكلسون جيداً. يَسْقُطُ الضوء الصادر من المصدر على أحد سطوح المرآة المثلثة م، و ينعكس عنها إلى المرآة البعيدة د، حيث يعود منها الضوء إلى المرآة م منعكساً عنها إلى التلسكوب ت. وبدوران المرآة م، لا يَسْقُطُ الضوء المرتد من د عادة على السطح ٣ بزاوية سقوط تبلغ ٤٥° تماماً، ومن ثم فلا

• ج. ل. فوكو J. L. Foucault (١٨١٩-١٨٦٨) : الفيزيائي الفرنسي.

• للحصول على عرض جيد لأعمال ميكلسون ارجع الى : ب. جافي B. Jaffe : «ميكلسون وسرعة

الضوء» (جاردن ستي، نيويورك : مؤسسة ديلدي ورفاقه، ١٩٦٠).



الشكل ٥ : طريقة ميكلسون لقياس سرعة الضوء .

يَدْخُلُ التلسكوب . وَمَعَ ذَلِكَ فَإِذَا أُدِيرَت الْمِرَاةُ م بِسَرْعَةٍ كَافِيَةٍ بَحَيْثُ يَأْخُذُ السَّطْحُ (٢) مَوْقِعَ السَّطْحِ (٣) السَّالِفِ، أَمَكْنَ اسْتِقْبَالُ الضَّوئِ بِالتَّلَسُّكُوبِ ت ؛ وَهَكَذَا يَمَكُنُ حِسَابُ سُرْعَةِ الضَّوئِ مِنَ الْمَسَافَةِ بَيْنَ م ، د وَمِنَ السَّرْعَةِ الدَّوْرَانِيَّةِ لِلْمِرَاةِ م .

وَفِي التَّجَرِبَةِ الْفَعْلِيَّةِ الَّتِي أُجْرِيتْ عَامَ ١٩٢٤ ، وُضِعَتِ الْمِرَاةُ الدَّائِرَةُ فِي مَرَصِدِ جَبَلِ وِلْسُونِ وَالْمِرَاةُ د عَلَى جَبَلِ سَانْ أَنْطُونِيُو الَّذِي يَبْعُدُ ٣٥,٤ كَمَ عَنِ الْجَبَلِ الْأَوَّلِ . وَقَدْ عَيَّنَتِ الْمَسَافَةُ بَيْنَ الْجَبَلَيْنِ إِلَى دَقَّةٍ تَزِيدُ عَلَى جُزْءٍ وَاحِدٍ مِنْ ١١ مِلْيُونًا مِنْ قِبَلِ مَكْتَبِ الْمَسْحِ الْأَرْضِيِّ وَالسَّاحِلِيِّ الْأَمْرِيكِيِّ . وَقَدْ وُجِدَ مِنْ أَكْثَرِ مِنْ ١٧٠٠ قِيَاسٍ أَنَّ مَعْدَلَ الزَّمَنِ اللَّازِمِ لِلضَّوئِ لِيَقْطَعَ رَحْلَةً تَامَةً بَلَغَ ٠,٠٠٠٢٣٦ ثَانِيَةً . وَقَدْ حُسِبَ مِنْ هَذَا الزَّمَنِ سُرْعَةُ الضَّوئِ فَوُجِدَتْ ٢٩٩,٧٢٨ كَم/ث فِي الْهَوَاءِ أَوْ ٢٩٩,٧٩٦ كَم/ث فِي الْخَلَاءِ التَّامِّ .

وَحَاوَلَ مِيكَلْسُونُ بَعْدَ ذَلِكَ أَنْ يَقِيَِسَ مَبَاشَرَةً سُرْعَةَ الضَّوئِ فِي الْخَلَاءِ التَّامِّ . وَلِهَذَا الْغَرَضِ مُدَّ أَنْبُوبٌ طَوْلُهُ ١,٦ كَمَ وَتَمَّ تَفْرِيفُهَا مِنَ الْهَوَاءِ إِلَى مَا يَقْرُبُ مِنْ ٠,٥ مِمَّ زُنْبُقٍ ؛ أَمَّا الْمِرَاةُ الْمُسْتَعْدَمَةُ فَكَانَ لَهَا ٣٢ وَجْهًا (سَطْحًا) . كَذَلِكَ فَإِنَّ مَسَارَ الضَّوئِ الْحَقِيقِيِّ بِسَبَبِ الْأَنْعِكَاسَاتِ الْمُتَعَدِّدَةِ دَاخِلَ الْأَنْبُوبِ بَلَغَ ١٦ كَمَ . وَمَاتَ مِيكَلْسُونُ عَامَ ١٩٣١ قَبْلَ اكْتِمَالِ الْمَشْرُوعِ . وَأَعْطَتِ الْقِيَاسَاتُ لِسُرْعَةِ الضَّوئِ فِي الْخَلَاءِ شَبِيهَ النَّاتَمِ وَالَّتِي أُجْرِيتْ بَعْدَ مَوْتِهِ الْقِيَمَةُ ٢٩٩,٧٧٤ كَم/ث . وَفِي عَامِ ١٩٣٣ حَقَّظَ زَلْزَالُ الْجِهَازِ بِأَكْمَلِيهِ .

نَتَائِجُ الْقِيَاسَاتِ الْحَالِيَةِ

تَسْتَخْدِمُ الْقِيَاسَاتُ الْحَدِيثَةُ لِسُرْعَةِ الضَّوئِ الْغَالِقَاتِ الْكَهْرُوضَوِّيَّةَ كَخَلَايَا كِرْزِ . وَلَا

تختلف طرقُ القياسِ عدا ذلك عن الطرق الكلاسيكية (السالفة). وفي قياساتٍ أخرى استُخدمت المِرَنَاتُ resonators ذاتُ الفجوات والرادارُ وتداخلُ أمواج الميكروويف والطبوفُ الدورانية لقياسِ سرعةِ الضوءِ بدقةٍ أكبر. وباستخدامِ أوزانٍ تتناسبُ عكسياً مع الجذور التربيعية لأخطاء القياس، فإنَّ القيمةَ المقبولةَ حالياً لسرعةِ الضوءِ في الخلاءِ التام هي:-

$$c = 299792458 \pm 0.3 \text{ كم/ث} \dots\dots [3:4-2]$$

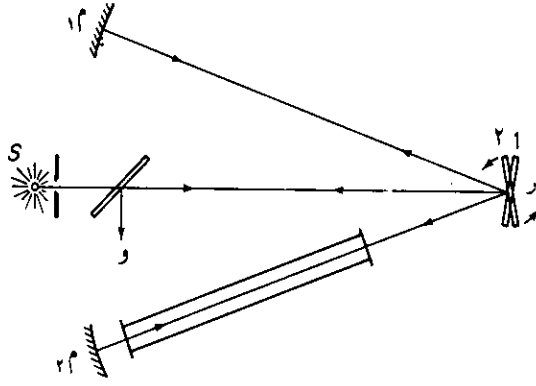
ويمكنُ تعيينُ سرعةِ الضوءِ أيضاً من نسبةِ مقاديرِ بعضِ الوَحَدَاتِ الكهرومغناطيسية والالكتروستاتيكية (انظر الفصل ١:٦): ومَعَ أنَّ هذه القياساتِ بالغةُ الاهمية جداً لتصديقِ النظريةِ الكهرومغناطيسية، إلا أنَّ دقتها أقلُّ مما يُستطاعُ الحصولُ عليه بالطرقِ المباشرة.

سرعة الضوء في المادة

المادة الساكنة

أجرى فوكو التجربةَ الاولى لقياسِ سرعةِ الضوءِ في مادةٍ أكثفَ بكثيرٍ من الهواءِ عامَ ١٨٥٠. واعتبرت هذه التجربةُ في وقتها ذاتُ أهميةٍ مصيريةٍ للمفاضلةِ بينَ نظريةِ نيوتنِ الجُسيمية ونظريةِ هينجزِ الموجية. فوفقَ نظريةِ نيوتنِ، ينبغي أن تتناسبَ سرعةُ الضوءِ معَ معاملِ الانكسارِ؛ أما نظريةُ هينجزِ فتنبأُ بأنَّ سرعةَ الضوءِ تتناسبُ عكسياً معَه (أي مَعَ معاملِ الانكسارِ).

وفي تجربةِ فوكو، يَنقُطُ الضوءُ من مصدرٍ S على مِرآةٍ رتدورُ، ثُمَّ ينعكسُ عنها إلى إحدى المِرَاتين المتساويتين في بُعْدَهما عن المِرآةِ الدائرية: م_١، م_٢. وعندما تكونُ ر في الوضعِ ١ ينتقلُ الضوءُ إلى م_١، ثُمَّ يعودُ في نفسِ المسارِ، وَيُشَاهَدُ من النقطةِ وبوساطةِ شاطرٍ شعاعيٍّ. وعندما تكونُ ر في الوضعِ ٢، ينتقلُ الضوءُ عُبْرَ المسارِ السفليِّ في الشكلِ ٦ ماراً مرتين في أنبوبٍ مملوءٍ ماءً. وبدورانِ المِرآةِ سَتَرَا حُ الصورتان المكونتانِ بالمِرَاتين. ولاحظَ



الشكل ٦ : تعيين فوكو لسرعة الضوء في الماء .

فوكو أنَّ الضوء المنعكس من م_٢ يُزاح أكثر، وهي نتيجة تؤيد النظرية الموجية . وفيما بعد أجرى ميكلسون قياسات أكثر دقة . وبهذه الطرق المباشرة جميعها نحصل على السرعة الزمرية للضوء لا على سرعته الطورية .

المادة المتحركة

إن السؤال الذي يدور حول جرّ الضوء بالمادة المتحركة سؤال ذو أهمية بالغة في نظرية النسبية، وسنبحث هذا الأمر بالتفصيل في الفصل ٦: ٢.

اقتراحات لقراءات إضافية

- L. Essen and K. D. Froome, *The Velocity of Light* (New York: Academic Press, Inc., 1969).
- E. Bergstrand, "Determination of the Velocity of Light," *Fundamentals of Optics*, Vol. 24, *Encyclopedia of Physics*, ed. S. Flügge (Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag Inc., 1956), 1-43.
- C. L. Andrews, *Optics of the Electromagnetic Spectrum* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1960).
- B. Jaffe, *Mitchelson and the Speed of Light* (Garden City, N.Y.: Doubleday & Company, Inc., 1960).

المسائل

- ١-٤:٣ إذا كانت سرعة الضوء 3×10^8 م/ث. فما الزمن الذي يستغرقه ليقطع مسافة ٣٠ سم؟ وهل يمكن قياس هذه الفترات الزمنية؟ كيف؟
- ٢-٤:٣ باستخدام فكرة رومر في قياس سرعة الضوء، أرسم منحنى يبين العلاقة بين الفوارق الزمنية Δ التي تُرى فيها خسوفات قمر المشتري على المحور الصادي والزمن بالسنوات على المحور السيني، ثم بيّن على المنحنى أربعة مواقع مميزة على الأقل للأرض في مدارها بالنسبة إلى المشتري.
- ٣-٤:٣ إذا كانت سرعة الضوء $299,793$ كم/ث ونصف قطر مدار الأرض $1,497 \times 10^8$ كم، فاحسب مقدار الزوغان النجمي.
- ٤-٤:٣ إذا عرفت سرعة الضوء فإنه يمكن استخدام الزوغان النجمي لتحديد السرعة المدارية للأرض. فباستخدام قيم الزوغان والقيمة المقبولة لسرعة الضوء كما هي معطاة في هذا الفصل، جد السرعة المدارية.
- ٥-٤:٣ استخدم فيزو في تجربته الأصلية عجلة مسننة عدد أسنانها ٧٢٠، وتدور بسرعة زاوية $\omega = 12,6$ دورة/ث، ومرآة بعيدة تقريباً مسافة $L = 8,6$ كم. كيف حَسَب فيزو سرعة الضوء من هذه البيانات؛ أعد حسابه خطوة خطوة.
- ٦-٤:٣ قد ترغب في أن تعيد تجربة فيزو لتحديد سرعة الضوء مستخدماً مرآة على بُرج يبعد ٤,٢ كم. فإذا كان لديك عجلة مسننة بـ ٥٠٠ سن، فما العدد الأقل للدورات في الثانية الواحدة التي ينبغي أن تدورها العجلة لتُحجب الضوء العائد من المرآة؟

الفصل ٣ : ٥

قياسُ الإشعاع

Radiometry

نُغْنِي في قياس الإشعاع بقياس الطاقة الكهرومغناطيسية بغض النظر عن إمكان رؤيتها لها. وعلى خلاف ذلك فإنَّ القياس الضوئي يُحصَرُ في ذلك الجزء من الطيف الكهرومغناطيسي الذي تدركه عين الإنسان كإحساس بالضوء. أمَّا قياسُ الإشعاع فهو الحالة الأكثرُ عُموماً.

لقد تمَّ الخلط طويلاً بين قياس الإشعاع وقياس الضوء باستخدام وفرة من التعابير والوحدات؛ فأحياناً تستخدمُ ألفاظٌ مختلفةٌ لكمياتٍ متماثلة: فبعضُ التعابير كالشمعة يُساء فهمها، كذلك فإنَّ تعابير أخرى مثل نوكس Nox، فوت phot، لَمِرج lumerg، هيليوس helios، .. قد تَهْمُ المؤرخ لا غير.

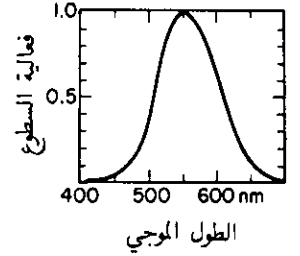
وقد حَدَثَ تقدُّمٌ بهذا الصدد في السنوات الأخيرة ولا سيما منذ تمَّ التوصلُ بالاتفاقات العالمية إلى تبني وحدات بسيطة منطقية قابلة للتحويل بسهولة ومبنية على نظام الوحدات العالمي (SI اختصاراً)؛ ومن المؤمل أن تحلَّ وحدات هذا النظام تدريجاً محلَّ الوحدات التي ما زالت تُستخدَم.

تعريفات قياس الإشعاع ووحداته

باديء ذي بدء، علينا أن نتذكَّر دائماً الفارق الأساسي بين الألفاظ الخاصة بالقياس الإشعاعي والقياس الضوئي. إن مجرد بيان أنَّ الطاقة الكهرومغناطيسية توجد في المدى المرئي اللطيف لا يؤكد شيئاً عن فعاليتها البصرية؛ فالمصباح الأزرق مثلاً قد يُصدِرُ نفس

القدرة الإشعاعية (بالواط) في المدى المرئي كالتي يصدرها مصباح أخضر؛ إلا أن الأخير سيبدو أكثر سطوعاً، لأن العين أكثر حساسية للضوء الأخضر منها للضوء الأزرق.

وتنطبق الألفاظ الخاصة بالقياس الإشعاعي على كل أجزاء الطيف الكهرومغناطيسي؛ أما التعابير الخاصة بالقياس الضوئي فتتطبق على جزئه المرئي فقط. وإذا ما رغبتنا في تحويل القيم الخاصة بالقياس الإشعاعي إلى قيم خاصة بالقياس الضوئي أو عكس ذلك، وجب علينا أن نأخذ بعين الاعتبار وضوح الرؤية النسبي للضوء ذي الطول الموجي المعين Visibility. إن المنحنى الناتج (الشكل ١) هو منحنى فعالية السطوع luminous efficiency. وتُعرف نسبة وحدة القياس الضوئي إلى وحدة القياس الإشعاعي المكافئة لها بتأثيرية السطوع luminous efficacy.



الشكل ١ : حساسية العين الانسانية المكيفة للسطوع.

وتمثل ذروة المنحنى عند ٥٥٥ nm الطول الموجي الذي تبلغ عنده حساسية العين أقصاها، ولذا فهي نقطة الوضوح الأقصى أو هي تأثيرية السطوع الأقصى للرؤية البصرية. وفي نظام الوحدات العالمي، نستخدم نفس مجموعة الرموز للكميات الخاصة بالقياس الإشعاعي والضوئي شريطة أن نستخدم الرمز السفليين ش و ص على التوالي للتمييز بينهما حيثما تنشأ الحاجة إلى ذلك؛ وعلاوة على ذلك فإن الرمز السفلي λ سيستخدم للإشارة إلى الكثافة الطيفية، أما الرمز λ قوسين (λ) فيخصص لدالة الطول الموجي.

الطاقة الإشعاعية Radiant Energy

تُعرف الطاقة الإشعاعية طر بأنها الطاقة المنتقلة في صورة أمواج كهرومغناطيسية (الشكل ٢). ووحدة الطاقة الإشعاعية هي الجول الذي يرمز له بالرمز ج.



الشكل ٢ : الطاقة الإشعاعية (تمثيل رمزي)

طاقة السطوع Luminous Energy

إن ألفاظ القياس الضوئي تتصف جميعها بصفة (السطوع)؛ ولذا فعوضاً من الطاقة الإشعاعية نستخدم طاقة السطوع ط_ص. إن وحدة طاقة السطوع هي التالوت talbot. لاحظ

أنه لا يوجد (بالتعريف) ضوء خارج المدى المرئي للظئف؁ ولذلك فلا تنطبق على خارج المدى المرئي ألفاظ القياس الضوئي ووحداته وكمياته .

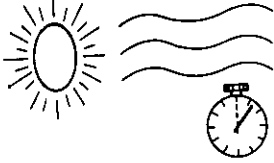
كثافة الطاقة الإشعاعية Radiant energy density

تعرّف كثافة الطاقة الإشعاعية w بالطاقة الإشعاعية لكل وحدة حجم :-

$$w = \frac{E}{V} \text{ } [3-5-1]$$

ووحدة كثافة الطاقة الإشعاعية هي الجول / المتر المكعب أوج م^٣ .

أما اللفظ المكافيء في القياس الضوئي فهو كثافة طاقة السطوع luminous energy density .



الشكل ٣ : القدرة الإشعاعية

القدرة الإشعاعية Radiant power

تعرّف القدرة الإشعاعية ϕ التي تُسمى أيضا الفيض الإشعاعي radiant flux بأنها

الطاقة الإشعاعية المنقولة في وحدة الزمن (الشكل ٣) :-

$$\phi = \frac{E}{t} \text{ } [3-5-2]$$

وتقاس القدرة الإشعاعية بنفس الوحدات التي تقاس بها القدرة عموما .

ولما كانت القدرة = الشغل / الزمن؁ والشغل = طاقة الوضع = القوة × المسافة ؛ فإن وحدة

القدرة هي $\frac{1 \text{ جول}}{1 \text{ ثانية}} = 1 \text{ واط}$ ؛ أي و = ج ز-١ .

قدرة السطوع Luminous power

ان قدرة السطوع أو فيض السطوع ϕ_v هي كمية القدرة الإشعاعية التي تُنتج إحساساً

بصرياً لدى الملاحظ الإنسان . ووحدة قدرة السطوع هي اللومن lumen لم . ويُعرّف اللومن

الواحد بقدرة السطوع التي تُبعث في زاوية مجسمة واحدة من مصدر ضوئي نقطي شدته

كانديلا واحدة Candela . وبعبارة أخرى يُصدر المصدر الضوئي النقطي الذي يشع بانتظام

في جميع الاتجاهات بشدة كانديلا واحدة ما مجموعه ٤ ط لومن (لم) .

وتكافئ اللومن الواحد عند الطول الموجي $\lambda = 555$ نم ما يُعادل $0,00147$ ($= \frac{1}{680}$) واطاً؛ أي أن الواط الواحد يُكافئ 680 لومن. ولكي نستخدم هذا التحويل في أي موقع في الطيف المرئي، فلا بُدَّ من إدخال تأثيرية السطوع المناسبة: فعلى سبيل المثال تبلغ تأثيرية السطوع (عند 600 نم) $0,631$ ؛ وهكذا يعادل الواط الواحد من الضوء أحادي الموجة عند ذلك الطول الموجي ما يُساوي $(0,631)(680) = 429$ لومن؛ أي أن اللومن الواحد يُساوي $0,00147 / 0,631 = 0,00233$ واط. ويشمل الجدول ١ على المعاملات المناسبة للأطوال الموجية الأخرى. وإذا كان الضوء غير أحادي الموجة، لزم لنا حساب التكامل.

والقدرة هي اللفظ الرئيس في كل القياس الإشعاعي. وتوفّر لنا وخذتها الواط جنباً إلى جنب مع المتر والستيراديان (وخذة الزاوية المجسمة) أساساً سليماً لبناء نظام بسيط منطقي متناسق من الألفاظ والوحدات الخاصة بقياس الإشعاع. وعلى نحو مماثل، فإن كل وحدات القياس الضوئي ينبغي أن تُبنى على اللومن، المتر، والستيراديان (Steradian).

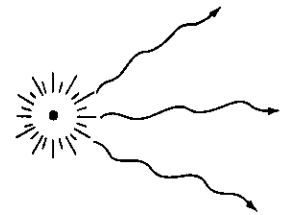
القدرة الإشعاعية الطيفية Spectral radiant power

قدرة الإشعاع الطيفي ϕ_λ هي القدرة الإشعاعية لوخذة الطول الموجي عند الطول الموجي λ ، أي هي $\frac{\phi_\lambda}{\lambda}$ ، وتقاس بوحدات الواط / نم. وينطبق تعبير مماثل على قدرة السطوع الطيفية.

الشدة الإشعاعية Radiant intensity

تعرف الشدة الإشعاعية شش بأنها القدرة الإشعاعية لمصدر نقطي لوخذة الزاوية المجسمة - الشكل ٤ :-

$$\text{الشدة} = \frac{\text{القدرة}}{\text{الزاوية المجسمة}}$$



الشكل ٤ : الشدة

[٣-٥:٣]

$$\text{اي شش} = \frac{\phi_\lambda}{\omega} \dots\dots$$

أُجدول ١ : بياناتُ السطوع المعيارية

الطول الموجي	فعالية السطوع	الطول الموجي	فعالية السطوع	الطول الموجي	فعالية السطوع
٤١٠	٠,٠٠١	٥٢٠	٠,٧١٠	٦٣٠	٠,٢٦٥
٤٢٠	٠,٠٠٤	٥٣٠	٠,٨٦٢	٦٤٠	٠,١٧٥
٤٣٠	٠,٠١٢	٥٤٠	٠,٩٥٤	٦٥٠	٠,١٠٧
٤٤٠	٠,٠٢٣	٥٥٠	٠,٩٩٥	٦٦٠	٠,٠٦١
٤٥٠	٠,٠٣٨	٥٦٠	٠,٩٩٥	٦٧٠	٠,٠٣٢
٤٦٠	٠,٠٦٠	٥٧٠	٠,٩٥٢	٦٨٠	٠,٠١٧
٤٧٠	٠,٠٩١	٥٨٠	٠,٨٧٠	٦٩٠	٠,٠٠٨
٤٨٠	٠,١٣٩	٥٩٠	٠,٧٥٧	٧٠٠	٠,٠٠٤
٤٩٠	٠,٢٠٨	٦٠٠	٠,٦٣١	٧١٠	٠,٠٠٢
٥٠٠	٠,٣٢٣	٦١٠	٠,٥٠٣	٧٢٠	٠,٠٠١
٥١٠	٠,٥٠٣	٦٢٠	٠,٣٨١		

وتقابلُ الزاويةُ الجسمُ المساحة ρ على سطحٍ ذي نصف قطرٍ معينٍ نق، وهي تُقاسُ بـوحداتِ الستيراديان (سر). ولَمَّا كانت مساحةُ سطحِ الكرة $A = 4\pi r^2$ ، فإنَّ الزاوية الجسمُ الكليةَ حولَ النقطةِ هي :-

$$\omega = \frac{A_{\text{نق}}}{A_{\text{نق}}} = \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2} = 1 \text{ سر} \dots\dots [3-5-4]$$

ووحدةُ الزاوية الجسمُ أو سرهي الزاويةُ عند مركزِ الكرة التي يَصِفُ قطرها ام والتي تقابلُ على سطحِ الكرة مساحةً مقدارها m^2 . ولذا فوحدةُ الشدة الإشعاعية هي واط/ستيراديان أو سر^{-١}.

شدة السطوع Luminous intensity

شدة السطوع I_v هي المكافئ النفسفيزيائي للشدة الإشعاعية. وهُنا كما في كل كميات السطوع نأخذ اللومن مكان الواط. إنَّ وَحدة شدة السطوع هي الكانديلا (كد) التي تُعرَّف بأنها شدة السطوع لسطح مشع أسود مساحته $\frac{1}{\pi \times 10^6} \text{ م}^2$ على درجة تجمُّد البلا تين التي تبلغ تقريباً $20.42^\circ \text{ ك} = 273.15^\circ \text{ ك}$ أو 173.15° ك وتحت ضغط جوي مقداره 101325 نيوتن/م²، وتقاس عمودياً على سطح البلا تين؛ أي أن:-

$$1 \text{ كانديلا} = \frac{1 \text{ لومن}}{1 \text{ استيراديان}}$$

والشدة من الألفاظ التي استخدمت بإفراط كثير. وتوخيا للصحة فإنَّ هذا اللفظ ينبغي أن يستخدم ليعني فقط مربع السعة الموجية أو القدرة لَوْحدة الزاوية المُجسمة.

الإشعاعية Radiance

تُعرَّف الإشعاعية I_e ص ش بالقدرة الإشعاعية التي تغادر سطحاً ما لَوْحدة الزاوية المُجسمة وَلَوْحدة المساحة المُسقَّطة من ذلك السطح:-

$$\text{الإشعاعية} = \frac{\text{القدرة}}{\text{الزاوية المُجسمة} \times \text{المساحة}} = \frac{\text{الشدة}}{\text{المساحة}}$$

$$[3:5-5] \quad \dots \frac{I_e \text{ ش}}{\cos \theta} = \frac{I_e \text{ ش}}{\cos \theta} = \dots$$

لاحظ أنَّ لفظ الشدة مقصور على المصادر النقطية، بينما لفظ الإشعاعية ينطبق أيضاً على المصادر الممتدة. ومن ناحية عملية يمكن إهمال الاتساع المحدود للمصدر إذا كان قطره أقل من $\frac{1}{\pi}$ من المسافة بين المصدر والسطح الذي يتلقى الإشعاع. وزاوية θ في المعادلة

* كما تبناها المؤتمر العام الثالث عشر للأوزان والمقاييس، باريس، فرنسا، أكتوبر ١٩٦٧.

[٣:٥-٥] هي الزاوية المحصورة بين العمود المقام على جزء المساحة δ أ واتجاه انتشار الضوء. وإذا كان مقدار الفيض الذي يغادر جزء المساحة δ أ يتناسب مع جتا θ ، يقال بأن السطح يتبع قانون لامبرت Lambert ويسمى السطح لامبرتيًا أو سطحاً تام الانتشار الإشعاعي. ولأن المساحة المسقطّة تتناسب أيضاً مع جتا θ ، فإنّ اشعاعية هذا السطح مستقلة عن الاتجاه الذي تشاهد منه. أما وحدة الإشعاعية فهي الواط لكل متر مربع لكل استيراديان (و/م^٢ سر = و-م^٢ سر-^١).

الاشعاعية الطيفية Spectral radiance

تُعرف الاشعاعية الطيفية ص_λ بأنها القدرة الصادرة من وحدة المساحة المسقطّة للمصدر لوحدة الزاوية المجسّمة لوحدة الطول الموجي. أما وحدتها فهي (و-م^٢ سر-^١ م-^١).

اللمعانية luminance

اللمعانية ص_v هي لفظ القياس الضوئي المناظر للإشعاعية. وحدتها هي الكانديلا لكل متر مربع (كدم-^٢). ويوجد وحدات أخرى عديدة لللمعانية؛ إلا أنه يتبين من اعتبار منطق استخدام الكانديلا للمتر المربع ومزايا تجنب الكسور العشرية والنسبة ط أن هذه الوحدات غير لازمة:-

$$\text{ستيلب stilb} = \text{كانديلا} / \text{سم}^2$$

$$\text{الابوستيلب العالمي apostilb} = 1, 0 \text{ مليلامبرت milli-lambert أو بلونديل واحد blondel}.$$

$$\text{الأبوستيلب} = 0, 09 \text{ مليلامبرت}$$

$$\text{سكوت skot} = 10 \text{ أبوستيلب}$$

$$1 \text{ لامبرت} = \frac{1}{\pi} \text{ كانديلا} / \text{سم}^2$$

$$\text{قدم} - \text{لامبرت} = \frac{1}{\pi} \text{ شمعة} / \text{قدم}^2 \text{ (الجدول ٢)}$$

وفي هندسة الإضاءة، يُعبّر عن لمعانية سطح فعلي في اتجاه ما بدلالة لمعانية ناشر ضوئي منتظم يُصَدِّرُ لومناً واحداً لوحدة المساحة ؛ ويقال لمثل هذا الناشر المنتظم الذي يُصَدِّرُ لومناً واحداً للقدم المربع بأنه ذو لمعانية تبلغ «١» قدم-لامبرت.

أجدول ٢ : عوامل التحويل لَوحدات اللمعانية

العدد من	← كد/م ^٢	كد/سم ^٢	كد/قدم ^٢	كد/بوصة ^٢	ابوستيلب (بلوندل)	ميللامبرت	قدم-لامبرت
ي ضرب ب	يعطي العدد من	(ستلب)	(نِت)				
كد/م ^٢ (نِت)	١	١٠,٠٠٠	١٠,٧٦٤	١٥٥٠	٠,٣١٨٣	٣,١٨٣	٣,٤٢٦
كد/سم ^٢	٠,٠٠٠١	١	٠,٠٠١٠٧٦	٠,١٥٥	٠,٠٠٠٠٣١٨٣	٠,٠٠٠٣١٨٣	٠,٠٠٠٣٤٢٦
كد / قدم ^٢	٠,٠٩٢٩	٩٢٩	١	١٤٤	٠,٢٩٥٧	٠,٢٩٥٧	٠,٣١٨٣
كد/بوصة ^٢	٠,٠٠٠٦٤٥	٦,٤٥٢	٠,٠٠٦٩٤	١	٠,٠٠٢٠٥٤	٠,٠٠٢٠٥٤	٠,٠٠٢٢١١
ابوستيلب	٣,١٤١٦	٣١,٤١٦	٣٣,٨٢	٤٨٦٩	١	١٠	١٠,٧٦٤
ميللامبرت	٠,٣١٤١٦	٣١٤١,٦	٣,٣٨٢	٤٨٦,٩	٠,١	١	١,٠٧٦٤
قدم-لامبرت	٠,٢٩١٩	٢٩١٩	٣,١٤١٦	٤٥٢,٤	٠,٩٢٩	٠,٩٢٩	١

الانشعاعية irradiance

الأنشعاعية ن ش هي القدرة الانشعاعية الساقطة على وَحْدَةِ المساحة من سطح ما -

الشكل ٦ :-



الشكل ٦ : الانشعاعية

$$\frac{\text{القدرة الاشعاعية}}{\text{المساحة}} = \text{الانشعاعية}$$

[٦-٥:٣]

$$\text{ن ش} = \frac{\phi_s}{p_s} \dots\dots$$

و يتبع مقدار الانشعاعية من مصدر نقطي قانون التربيع العكسي :

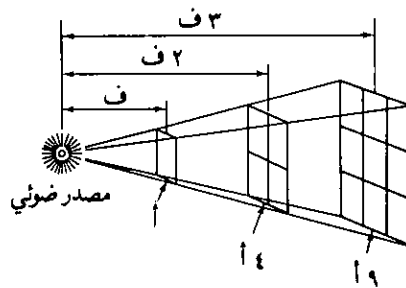
$$I = \frac{1}{r^2} \dots \dots \dots [7-5:3]$$

حيث r هي المسافة من المصدر إلى السطح (الشكل ٧). وإذا صدر الضوء من مصدر ممتد فإن قانون التربيع العكسي يظل ينطبق، ولكن يلزم إدخال تصحيح عليه: فعلى سبيل المثال، فإذا كان المصدر كبيراً في حجمه وقريباً من المساحة المضاءة، فإن القدرة الساقطة عند ضعف المسافة هي أقرب إلى $\frac{1}{4}$ منها إلى $\frac{1}{16}$ كما ينطوي على ذلك قانون التربيع العكسي. وإذا شغ المصدر عبر فتحة دائرية لا يمكن التغاضي عن قطرها بالمقارنة مع المسافة من الستارة، فإن:-

$$I = \frac{1}{f^2 + f_n^2} \dots \dots \dots [8-5:3]$$

وينص قانون جيب التمام أن الانشعاعية (أو الاستضاءة) لسطح ما تتغير بحسب جيب تمام زاوية السقوط. ويمكن ضم قانون التربيع العكسي وقانون جيب التمام على النحو التالي:-

$$I = \frac{I_0 \cos \alpha}{f^2} \dots \dots \dots [9-5:3]$$



الشكل ٧: قانون التربيع العكسي

وإذا كَانَ ميلُ كُلِّ من الجسم (المتد) والسطح المُنْشَعَّ على اتجاهِ الضوءِ غَيْرَ عموديٍّ، فإنَّ جَيَّيَ تمامِ الزاويتين يَدْخُلَانِ في المقام. إِنَّ وَحْدَةَ الانْشَاعِيَّةِ هي الواطُّ للمترِ المربع (وم-^٢).

الاستضاءة Illuminance

تُعرَّفُ الاستضاءةُ نَصْرَ بِقدرةِ السطوعِ الساقطةِ على وَحْدَةِ المساحةِ من السطحِ المضاءِ؛ وهي تقاسُ بوحدةِ اللومن/م^٢ (لم م-^٢): وتُسمى هذه الوَحْدَةُ في النظامِ العالميِّ للوَحَدَاتِ اللوكس lux (انظر الجدولين ٣، ٤ لعواملِ التحويل). أما الوحداتُ التاليةُ فقد قُلَّتْ قيمَتُها:

ألفوت = لم/سم^٢، والشمعةُ القديمةُ: وهذا لفظٌ غيرُ مناسبٍ يبدو أنه يدلُّ على أنَّ شدةَ السطوعِ بالشمعاتِ يَجِبُ أَنْ تضربَ في المسافةِ بدلاً من الدلالةِ على أنَّ هذه الوَحْدَةُ هي استضاءةُ سطحٍ يبعدُ وَحْدَةَ المسافةِ عن مصدرٍ نقطيٍّ شدةُ سطوعِهِ تساوي كانديلا واحدة؛ وتساوي الشمعةُ القديمةُ ١٠,٧٦٣٩ لم/م^٢.

ويختلف لَمَعَانُ السطحِ brightness عن استضاءِيته: فاللمعانُ يعتمدُ على الاستضاءةِ والانعكاسية. كذلك فالانْشَاعِيَّةُ والاستضاءةُ هما عمليتان يتِمُّ فيهما تعريضُ السطحِ للطاقةِ الكهرومغناطيسيةِ.

أُجدول ٣: عواملُ التحويلِ لَوَحَدَاتِ الاستضاءةِ

عدد من	الشمعة القديمة	لم / م ^٢ (اللوكس)	فوت	مليفوت
← يضرب في يعطي عدداً من				
الشمعة القديمة	١	٠,٠٩٢٩	٩٢٩	٠,٩٢٩
لم/م ^٢ (اللوكس)	١٠,٧٦٤	١	١٠,٠٠٠	١٠
فوت	٠,٠٠١٠٨	٠,٠٠٠١	١	٠,٠٠١
مليفوت	١,٠٧٦	٠,١	١,٠٠٠	١

أجدول ٤: تحويل الشمعات القديمة إلى لوكس

ب

	٩	٨	٧	٦	٥	٤	٣	٢	١	٠
٠	٩٧	٨٦	٧٥	٦٥	٥٤	٤٣	٣٢	٢١	١١	٠
١٠	٢٠٤	١٩٤	١٨٣	١٧٢	١٦١	١٥١	١٤٠	١٢٩	١١٨	١٠٨
٢٠	٣١٢	٣٠١	٢٩١	٢٨٠	٢٦٩	٢٥٨	٢٤٧	٢٣٧	٢٢٦	٢١٥
٣٠	٤٢٠	٤٠٩	٣٩٨	٣٨٧	٣٧٧	٣٦٦	٣٥٥	٣٤٤	٣٣٤	٣٢٣
٤٠	٥٢٧	٥١٦	٥٠٦	٤٩٥	٤٨٤	٤٧٣	٤٦٣	٤٥٢	٤٤١	٤٣٠
٥٠	٦٣٥	٦٢٤	٦١٣	٦٠٣	٥٩٢	٥٨١	٥٧٠	٥٦٠	٥٤٩	٥٣٨
٦٠	٧٤٢	٧٣٢	٧٢١	٧١٠	٦٩٩	٦٨٩	٦٧٨	٦٦٧	٦٥٦	٦٤٩
٧٠	٨٥٠	٨٣٩	٨٢٩	٨١٨	٨٠٧	٧٩٦	٧٨٥	٧٧٥	٧٦٤	٧٥٣
٨٠	٩٥٨	٩٤٧	٩٣٦	٩٢٥	٩١٥	٩٠٤	٨٩٣	٨٨٢	٨٧٢	٨٦١
٩٠	١٠٦٥	١٠٥٤	١٠٤٤	١٠٣٣	١٠٢٢	١٠١١	١٠٠٠	٩٩٠	٩٧٩	٩٦٨
١٠٠	١١٧٣	١١٦٢	١١٥١	١١٤١	١١٣٠	١١١٩	١١٠٨	١٠٩٨	١٠٨٧	١٠٧٦

مثال: التقاطع مقابل أ ب يُظهر أن ٢٧ شمعة قديمة = ٢٩١ لوكس.

قدرة النقل Throughput

ويعبرُ هذا اللفظ عن مقدرة المنظومة على نقل القدرة الإشعاعية، وهي قياس لكمية الضوء التي تُنقل بواسطة أداة ذات ثقب معين يقبل زاوية مجسمة معينة:-

قدرة النقل = مساحة الثقب x الزاوية المجسمة المقبولة

وقدرة النقل ثابتة لا تتغير بتغير طول الأداة البصرية؛ وتحدد قدرة النقل الكلية بقدرة النقل الأقل عند أي مقطع عرضي، ولا يمكن لأية منظومة بصرية خاملة أن تزيد من قدرة

النقل. أما وَحْدَتُهَا فهي متر مربع استيراديان (م²سر). ويقدمُ الجدولُ ه خلاصةً بالألفاظِ والرموزِ والوَحدَاتِ المستخدمةِ في القياسِ الإشعاعي والقياسِ الضوئي.

الجدول ٥: خلاصة رموزِ القياسين الإشعاعي والضوئي وَوَحْدَاتِهِمَا.

الرمز	اسم الوحدة	اختصار الوحدة
ط ش	جول	ج
ط ض	تالبوت	
ش ^{١٠}	جول/متر ^٢	ج م-٢
ش ^{١٠}	تالبوت/متر ^٢	لم ث م-٣
ش ^{١٠}	واط	و
ش ^{١٠}	لومن	لم
ش ش	واط / استيراديان	وسر-١
ش ض	كانديلا	كد (لم سر-١)
ص ش	واط/متر ^٢	وم-٢ سر-١
ص ش ^{١٠}	استيراديان - واط/متر ^٢	وم-٢ سر-١ نم-١
ص ض	استيراديان - ننومتر	
ن ش	كانديلا/متر ^٢	كد م-٢
ن ض	واط/متر ^٢	وم-٢
ن ض	لومن/متر ^٢	لم م-٢
	(لوكس)	

مقاييس الإشعاع (الراديومترات) ومقاييس الضوء (الفوتومترات)

مقياس بنزن الضوئي (فوتومتر بنزن) Bunsen Photometer

تُسمى أدوات قياس القدرة الإشعاعية بالراديومترات (المقاييس الاشعاعية)، و يكافئ هذه المقاييس للضوء المرئي الفوتومترات (المقاييس الضوئية). وتُصمَّم بعض الفوتومترات لمقارنة لمعانية مصدرين ضوئيين. ومن الأمثلة عليها فوتومتر بنزن الذي يتألف من مرآتين تهيئان بحيث يمكن مشاهدة وجهي ورقة بيضاء تحتوي على بقعة شحمية أو بقعة من البرافين في وقت واحد. وعندما تكون الإضاءة واحدة على وجهي الورقة، يبدو الوجهان متشابهين، وتُرى بقعة الشحم بأقل مغايرة.

افترض أن F_1 ، F_2 هما بُعدا البقعة الشحمية من المصدرين الضوئيين. وفي وضع التوازن وباستخدام المعادلة [٣:٥-٧] نحصل على:-

$$I_1 = I_2 = \frac{S_1}{F_1^2} = \frac{S_2}{F_2^2} \text{ ; ويتبع منها أن :-}$$

$$\left[\frac{S_1}{F_1^2} = \frac{S_2}{F_2^2} \right] \quad [٣:٥-١٠]$$

وتسمى المعادلة الاخيرة قانون المسافة الراديومترية التي لا تصح إلا للمصادر النقطية. ونجد للمصادر الضوئية الممتدة ما يلي:-

$$\left[\frac{S_1}{F_1^2} \approx \frac{S_2}{F_2^2} \right] \quad [٣:٥-١١] \quad \dots\dots$$

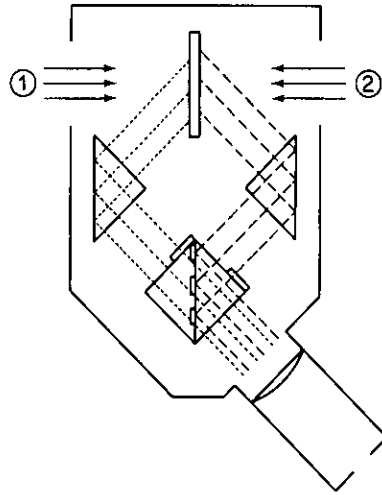
وهذه المعادلة هي معادلة تقريبية كما نوقش ذلك من قبل.

مقياس لمر-برودن الضوئي (فوتومتر لمر-برودن)

Lummer-Brodhun Photometer

ويشبه هذا النوع فوتومتر بنزن؛ إلا أنه أكثر منه دقة، وهو يتألف من منظومة من

موشورات عاكسة كلياً تُقدِّرُ المشاهدَ على مشاهدة وَجْهَي ستارة ناشرة للضوء بيضاء في وقتٍ واحدٍ (الشكل ٨). ويُهَيَّأُ الفوتومترُ مرةً أخرى بحيثُ يمكنُ الحصولُ على استضاءةٍ واحدةٍ على وَجْهَي الستارة.



الشكل ٨ : فوتومتر لمر - بروذن

ألفوتومترات الكهروضوئية Photoelectric photometers

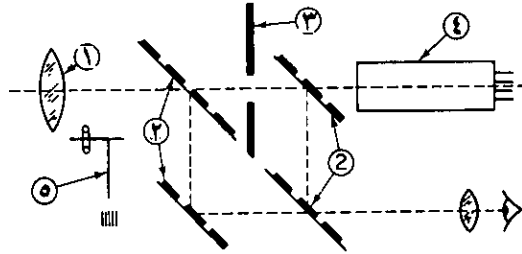
تُعمَلُ القياساتُ الكهروضوئيةُ للقدرة السطوعية أو اللمعانية عادةً باستخدام مجموعة من خلية كهروضوئية ومرشحة تُصحَّحُ وَفْقَ منحنى تأثيرية السطوع (الشكل ١). وقد تشملُ المنظومةُ البصريةُ المرتبطةُ بهذه المجموعة عدسات بسيطة أو تلسكوباً وميكروسكوباً أو كرة مكاملة integrating sphere. وفي جميع هذه الحالات، تُعطي الخلية الكهروضوئية تياراً يتناسبُ مع الفيض الكلي الساقط عليها. ويمكنُ تعييرُ المقياس بدلالة اللمعانية (كانديلا/متر^٢) أو بدلالة قُدرة السطوع (اللومن) أو شدة السطوع (كانديلا).

وتتألف أبسط صورة لمقياس اللمعانية من خلية كهروضوئية تُرَشَّحُ بصورة مناسبة لها زاويةً نظرياً محصورة، و يبدو على سبيل المثال أن نموذج وستون ٨٥٦ Weston ونموذج مقياس

الضوء لشركة جنرال إلكتريك ٢١٣ مناسبان تماماً بشكل خاص . ومن الهام أن يتم التأكد من أن مخروط القبول للمقياس مملوء تماماً بالمصدر الضوئي ؛ فإذا كان المصدر الضوئي صغيراً جداً ، وجب تحريك المقياس ليقترب من المصدر أو استخدام عامل تصحيح مناسب .

وتعرض الخلايا الكهروضوئية للإجهاد ، ويتغير أداؤها بتغير درجة الحرارة . ومن الممارسة الجيدة أن تفحص الخلية للجمل الزائد أي لكميات القدرة التي تستقبل وتتجاوز المدى الخطي للمنظومة ؛ فالعين تستطيع أن تتحمل أحمالاً زائدة من دون فشل ، إلا أن العديد من الخلايا الكهروضوئية لا تتحمل ذلك ؛ ويعني هذا في حالة تولؤ أو نبض المصدر الضوئي ضرورة وضع مرشحة محايدة كثافتها ٠,٣ (نفاذيتها ٥٠٪) أمام الخلية الكهروضوئية . وإذا لم تخفّض قراءة الآلة إلى النصف ، وجب التشكك في وجود جمل زائد ، ومن الممكن عندئذ تخفيف الضوء الساقط على الخلية حتى يستجيب المقياس خطياً . ويستحسن أيضاً قياس ناتج القدرة الكلية من المصدر وكذلك قياس القدرة أو الشدة بدلالة الزاوية ما لم يكن يُعرف أن السطح هو سطح لامببرتي .

ومن الفوتومتريات الكهروضوئية التي وُصِفَت في هذا الموضوع ٥ فوتومتر متين على نحو جذاب يخلو من الانحراف الزاوي (ألبرالاكس) ويسهل تغييره ، ويسمح بتعيين دقيق للمجال المقاس . وكما في الشكل ٩ تتكوّن الشئبة (١) التي يمكن إبدال موضعها صورة حقيقية على الغشاء (٣) . ويمر جزء من



الشكل ٩: شكل تخطيطي لمقياس اللعانية لشرودر [استنسخ باذن من مجلة « البصريات التطبيقية » ٥ (١٩٦٦) ، ١٩٦٥] .

٥ د. أ. شرودر: « المنظومة البصرية لمقياس عالمي للنعانية » ، البصريات التطبيقية ٥ (١٩٦٦) ، ١٩٦٥-١٩٦٦ .

*D. A. Schreuder, "Optical System for a Universal Luminance Meter," *Applied Optics* 5 (1966), 1965-66.

الضوء عَبْرَ فتحة في (٣) وَ يَقياسُ بالخليّة الكهروضوئية (٤) ؛ وَ يمكنُ أَنْ تَأخَذَ الفتحةُ أَيَّ شكلٍ يُرَغَبُ فيه بحيثُ تتوافقُ وشكلَ المجالِ الذي يرادُ قياسُ إشعاعِيته . وبِالاستعانةِ بشاطرِ الشعاعِ (٢) يمكنُ مشاهدةُ كلا المجالينِ : المجالِ المفحوصِ والمساحةِ المخيطةِ به باستمرارٍ أثناءَ القياسِ ، كذلك يُمكنُ قراءةُ المقياسِ (٥) أيضاً . وفي المستطاعِ تحويلُ الجهازِ بأكمله إلى مُكْتَبٍ متينٍ شاطرٍ للشعاعِ .

اقتراحات لقراءات اضافية

J. W. T. Walsh, *Photometry* (New York: Dover Publications, Inc., 1965).

J. R. Meyer-Arendt, "Radiometry and Photometry: Units and Conversion Factors," *Applied Optics* 7 (1968), 2081-84.

W. R. McCluney, "Radiometry and Photometry," *Am. J. Physics* 36 (1968), 977-79.

المسائل

- ١-٥:٣ يبلغُ ناتجُ لَيزَرِ الهيليوم - النيون الذي يشعُّ تقريباً على الطولِ الموجيِّ (٦٣٣ نـم) ٠,٥ مليواط . جذِّبِضَ السطوعِ مفترضاً لأغراضِ التقديرِ الداخليِّ أَنْ تأثيريةِ السطوعِ تزدادُ خطياً .
- ٢-٥:٣ تستقبلُ ستارةُ بيضاء ٢,٢×١٠^٦ لومن من الضوءِ الأزرقِ الذي طولُهُ الموجيُّ ٤٦٠ نـم . جدِ القدرةَ الإشعاعيةَ الساقطةَ على الستارة .
- ٣-٥:٣ إذا وُضِعَ كتابٌ على بُعْدِ ٣ م من مصدرٍ ضوئيٍّ عالي الشدةِ ثُمَّ حركَ مسافةَ ٦٠ سم من المصباحِ ، فبأيِّ عاملٍ تزدادُ الاستضاءةُ ؟
- ٤-٥:٣ يتدلى مصباحٌ كهربائيٌّ صغيرٌ على ارتفاعِ ٤ م من سطحِ الأرضِ . إلى أيِّ مسافةٍ ينبغي إخفاضُ المصباحِ لتزدادَ الاستضاءةُ إلى ١,٧٧ من قيمَتِها السابقةِ ؟
- ٥-٥:٣ وُضِعَ مصدرانِ ضوئيانِ ممتدانِ أحدهما يعطي ٢٥ واطاً والثاني ١٠٠ واطٍ بحيثُ يَبْعُدانِ عَن بَعْضِهما مسافةً مترٍ واحدٍ . أَيْنَ ينبغي وَضْعُ ستارةِ فوتومترِ البقعةِ الدهنيةِ لِيَبْزُنَ لِيَتَسَاوَى أَسْتِضاءَةُ وَجْهَيِ الستارةِ ؟

- ٦-٥:٣ عُلِّقَ مصدرٌ ضوئيٌّ نُقْطِيٌّ تماماً فوقَ النقطة م الواقعة في مُستوى أفقي. على أية مسافة هـ فوق المستوى يَتَبَغْي وَيَضَعُ المصدرِ الضوئيِّ للحصولِ على أقصى أنشعاعية عند النقطة وفي مُستوى يَبْعُدُ عن م مسافة ٢٠ سم؟
- ٧-٥:٣ ما الشدة الإشعاعية لِشُعْ لَامْبَرْتِي يُسْقِطُ ٥٠ مليواطاً على سطحٍ نصفِ كُرَوِيٍّ؟
- ٨-٥:٣ يَبْعُدُ مصدرٌ ضوئيٌّ لَمْعَانِيَّتُهُ ١٦ كد م-٢ مسافة ٠,٥ م من ستارةٍ، وَيُحْدِثُ عليها الاستضاءة نَفْسَهَا التي يُحْدِثُهَا مصباحٌ مجهولُ اللَمْعَانِيَّةِ موضوعٌ على بُعْدِ ٨٠ سم منها. فإذا سَحَبَ المصباحُ تياراً مقداره ٠,٧٥ أمبيراً على فرقِ جُهدٍ مقداره ١١٠ فولتاً فَبَدَّ فعالية السطوع.
- ٩-٥:٣ يُمْكِنُ طَبْعُ صورةٍ فوتوغرافيةٍ في خلالِ ١٠ ثوانٍ عندما يَكُونُ جِهَازُ الطَبْعِ على بُعْدِ ٢٠ سم من مَصْدَرٍ ضوئيٍّ مَتَوَهِّجٍ، فَمَا زَمَنُ التَّعْرِيضِ الصَّحِيحِ عندما يَوْضَعُ جِهَازُ الطَبْعِ على بُعْدِ ٣٠ سم؟ وما الذي يَحْدُثُ لو صَدَرَ الضَّوُّ من مصدرٍ نُقْطِيٍّ؟
- ١٠-٥:٣ تَقَاسُ لَمْعَانِيَّةُ مَجَالٍ دَائِرِيٍّ قَطْرُهُ ١٠ سم من مسافة ٤٠ سم باستخدامِ فوتومترٍ مُعَيَّرٍ: زاويةُ قَبُولِهِ الكَلِيَّةُ ٢٠°، بِأَيِّ عَامِلٍ يَتَبَغْي تَصْحِيحُ قِرَاءَةِ الفُوتُومِتْرِ؟
- ١١-٥:٣ مصدرٌ ضوئيٌّ شَدَّةُ سَطْوَعِهِ ٥٥ كد. جد الاستضاءة (باللوكس) الحادثة على ستارةٍ تَبْعُدُ ٢,٢ م بافتراضِ السقوطِ العموديِّ.
- ١٢-٥:٣ يَسْتَقْبِلُ وَسْطُ الشَّارِعِ المُنْبَسِطِ الضَّوُّ من مصباحَيْنِ كُلُّ مِثْلِهِمَا ٢٠٠٠ كد عمودَيْنِ على عمودَيْنِ طُولُ كُلِّ مِثْلِهِمَا ١٤ م وَيَتَبَعْدَانِ عَنْ بَعْضِهِمَا ٦٠ م. جد الاستضاءة في وَسْطِ الشَّارِعِ.

الفصل ٣ : ٦

تشت الضوء

Light Scattering

تخيل وسطاً شفافاً يخلو من الغبار والدقائق العالقة، وتخيل أن حزمة قوية من الضوء الأبيض تمر فيه. إن المشاهدات في غرفة مظلمة تظهر أنه لا يزال هناك قدر صغير من الضوء الأزرق يتشتت من الحزمة: وهذا الضوء الأزرق يتشتت بالجزيئات التي تؤلف الوسط.

والمثال الكلاسيكي على تشتت الضوء الجزيئي هذا هو لون السماء. وقد كان يُظن من قبل أن لون السماء يُعزى إلى تشتت الضوء بدقائق الغبار العالقة في الهواء، حتى جاء اللورد ريلي* الذي بين أن جزيئات النتروجين والأوكسجين في الهواء هي المسؤولة عن لون السماء فعلاً. فقام ريلي بقياس كمية الضوء النسبية التي تشتت لأطوال موجية مختلفة، ووجد أن شدة التشتت تتناسب عكسياً مع القوة الرابعة للطول الموجي.

نظرية ريلي في تشتت الضوء

التغير مع الطول الموجي

تنطبق نظرية ريلي على الدقائق التي لا يزيد بُعدها عن $\frac{1}{10}$ الطول الموجي للضوء: ففي غاز يحوي جـ جزيئات لكل وحدة حجم ومُعامل انكساره m ، يكون مُعامل إطفاء ريلي P extinction coefficient للطول الموجي λ على النحو التالي:-

$$P = \frac{8\pi^3}{3} \frac{m^2 - 1}{\lambda^4} \dots \dots \dots [1-6:3]$$

* اللورد ريلي: جون وليم شتروت (١٨٤٢-١٩١٩): «حول ضوء السماء: استقطابه ولونه»، المجلة الفلسفية Phil. Mag. (٤)، ٤١، ١٨٧١، ١٠٧-١٢٠، ٢٧٤-٢٧٩.

ولما كانت $m = 1$ لمُعْظَمِ الغازاتِ فإنَّ :-

$$^2(1-m)\epsilon = ^2[(1-m)^2] = ^2[(1+m)(1-m)] = ^2(1-m^2)$$

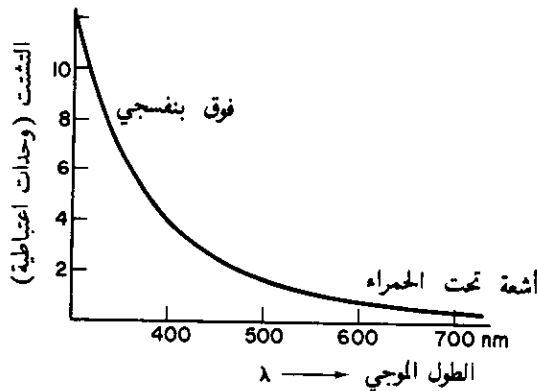
ولذلك تُصْبِحُ المعادَلَةُ [١-٦:٣] على النحو التالي :-

$$[٢-٦:٣] \quad \rho \approx \frac{^3\text{ط}^2}{\epsilon \lambda} (1-m)^2 \dots\dots$$

وَيُظْهِرُ العاملُ ϵ في المقام أنَّ مُعَامِلَ الإطفاء يقلُّ بزيادة λ ؛ وَبعبارةٍ أُخرى تتناسبُ كَمِيَّةُ التشتتِ عكسياً معَ القوةِ الرابعةِ للطولِ الموجيِّ : كَت $\alpha \frac{1}{\epsilon \lambda}$

وَتُمَثِّلُ المعادَلَةُ الأخيرةُ الحالةَ التقليديةَ لتشتتِ ريلي - كَبَانِس scattering

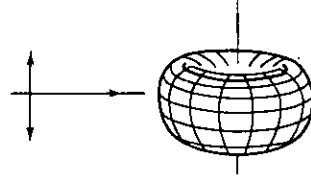
Rayleigh-Cabannes (الشكل ١). ولأنَّ الأطوالَ الموجيةَ الأقصرَ تُعاني تشتتاً أشدَّ من الأطوالِ الموجيةِ الأطولِ، فإنَّ الضوءَ الأزرقَ في حُزمةٍ من ضوءِ الشمسِ يُسْتَنْقَذُ مقارنةً معَ الضوئينِ الأصفرِ والأحمرِ، الأمرُ الذي يفسِّرُ لونَ السماءِ الأزرقِ وَحُمْرَةَ الشمسِ قريباً من الأفق. وَمن ناحيةٍ أُخرى يعتمدُ معاملُ الانكسارِ على الطولِ الموجيِّ أيضاً؛ فهو حقيقةً يَتَقَصُّ بزيادةِ الطولِ الموجيِّ. وعلاوةً على ذلك فإنَّ وجودَ عددٍ الجزيئاتِ جـ في المقامِ في المعادَلَةُ الأخيرةَ [٢-٦:٣] يُشِيرُ على ما يبدو إلى أنَّ مُعَامِلَ الإطفاء يقلُّ بزيادةِ جـ أو بزيادةِ كثافةِ الغازِ؛ ولكنَّ لَمَّا كَانَ m يعتمدُ على الكثافةِ أيضاً فإنَّ مُعَامِلَ الإطفاءِ ρ يزدادُ بزيادةِ الكثافةِ.



الشكل ١ : شدة التشتت في مقابل الطول الموجي وفق قانون ريلي .

التوزيع المكاني Spatial distribution

يتمثل التوزيع الزاوي للضوء بالنسبة إلى محور الضوء الساقط، كما يتمثل دورانياً بالنسبة إلى محور عمودي على اتجاه الضوء الساقط. وينطبق هذا أيضاً على الضوء المستقطب. وفي الشكل ٢ على سبيل المثال، الضوء الساقط هو ضوء مستقطب خطياً في مستوى الرسم. ويمكن الافتراض أن الدقائق المشتتة تتركز في مركز الكعكة. فالضوء المشتت هو ضوء مستقطب في نفس اتجاه الضوء الساقط، وشدة متساوية في أية دائرة مركزها المشتتات، إلا أنها عمودية على مستوى الرسم. وقع هذا فعند النظر إلى الضوء المشتت من أي اتجاه في مستوى الرسم فإن المرء لا يرى أي إشعاع يحدث في الاتجاهين المتعامدين على اتجاه الضوء الساقط، ولذلك يتبع التوزيع دالة مربع جيب تمام (جنا^٢ θ).



الشكل ٢: رسم ثلاثي الأبعاد لتشتت الضوء المستقطب

وتكون شدة التشتت الكلية على أية زاوية عندما يكون الضوء الساقط غير مستقطب مساوية لمجموع شدتين على النحو التالي :-

$$\text{مج ش}_\theta = \text{ش} \cdot (1 + \text{جنا}^2 \theta) \dots\dots [3-6:3]$$

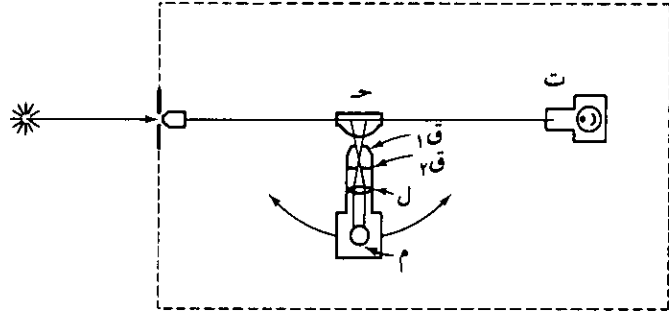
وتظهر المعادلة هذه أن :- (أ) تشتت ريلي متمثل مكانياً وبشدين متساويتين للتشتت في الاتجاهين الأمامي والخلفي، (ب) كلا التشتت الخلفي والأمامي للضوء غير المستقطب هو ضعف شدة التشتت الحادث في اتجاه ٩٠°، و (ج) توزيع الطاقة المشتتة في المكان مستقل عن (لا يتوقف على) الطول الموجي.

نَتَائِجُ تَجْرِبِيَّةِ

يشاهدُ تشتُّ ريلي في الجوامد والسوائل والغازات، وتكونُ شدةُ التشتُّ في الجوامد أو السوائل أقلَّ بكثيرٍ منها في الغازات، على الرغم من أن تركيزَ الجزيئات في الجوامد أو السوائل أعلى منه في الغاز. وفي الغاز كما هو معروفُ تتوزعُ الجزيئاتُ في المكانِ توزيعاً عشوائياً، وتكونُ الأمواجُ المشتتةُ بالجزيئات ذاتَ طورٍ عشوائيٍّ وذلك في جميع الاتجاهات باستثناء الاتجاهِ الأمامي؛ ومن ثم فإنَّ الشدةَ الحاصلةَ من حـ جزيئاً للضوء غير المتحالفِ الساقطِ عليها تبلغُ حـ مرة قدرَ الشدة من جزيء واحد. أما في السوائل ولحيد أكبر في الجوامد، فلتوزيع المكانيِّ درجةً مُعيَّنة من الانتظام، الأمر الذي يَتَّبِعُ عنه أن يكونَ التشتُّ في الجوامد والسوائل أقلَّ منه في الغاز في جميع الاتجاهات عدا الاتجاهِ الأمامي.

وفي القياساتِ العملية لتشتُّ الضوء، فإن البارامترَ الأساسيَّ الذي يَجِبُ تعيينُهُ هو النسبةُ بين شدَّتَي تشتُّ مقدارُهما من رتبتين مختلفتين؛ أما البارامترُ الآخرُ الهامُّ فهو درجةُ إزالة الاستقطاب.

وتقومُ الطريقةُ العاديةُ في قياسِ التوزيعِ الزاويِّ للضوءِ المشتتِ على تحريكِ كاشفِ ضوئيٍّ في قَوْسٍ حولَ خليةٍ تحتوي على الوَسْطِ المَشْتَتِ (الشكل ٣). وفي الشكلِ ٣ تمرُّ حزمةٌ رفيعةٌ من الضوءِ المسدَّدِ الصَّادِرِ من مصدرٍ (إلى اليسار) في خليةِ المُعَايَنَةِ حـ إلى مَقْصِيدة للضوءِ تحتوي أيضاً على خليةٍ كهروضوئية، كما يسقطُ الضوءُ المشتتُ المارُّ عَبْرَ الشقين ١، ٢، على عدسةٍ ل تُسَقِطُ صورةً غَيْرَ مركزةٍ على المهبطِ الضوئيِّ لمضاعيفِ ضوئيٍّ م. ويمكنُ تنظيمُ الطولِ الموجيِّ للضوءِ الساقطِ وكذلك استقطابُهُ بِمِرْشَحاتٍ مناسبةٍ، كذلك يمكنُ تعيينُ استقطابِ الضوءِ المشتتِ بتضمينِ مرشحةٍ مستقطبيةٍ ثانيةٍ عند ق ٢. وتُنْبَتُ الخليةُ على طاولةٍ مقياسٍ للطيفِ بحيثُ تكونُ في مركزِ القوسِ الذي يتحركُ فيه الذراعُ الحاملةُ للمضاعيفِ الضوئي. وتعطي الإشارتان من الكاشفين الضوئيين النسبةَ $\frac{I_1}{I_2}$ التي يمكنُ تحويلُها إلى وَحْدَاتٍ مطلقةٍ بمقارنتها بمقياسٍ مدرَّج. وتسمى نسبةُ الشدة I_1/I_2 التي تتشتُّ على زاويةٍ مُعيَّنة θ إلى شدةِ الضوءِ الساقطِ ش. نسبةُ ريلي $(\frac{I_1}{I_2})_{\theta}$ ، حيثُ ف هي المسافةُ بين المشتت والكاشف وَح هي الحجمُ المَشْتَت.



الشكل ٣ : شكل تخطيطي لجهاز مُشْتَتٍ للضوء .

وكما هو الحال في الانكسار فإن معظم قوانين التشتت لا تصح إلا إذا كان الضوء المُشْتَت يُعَدُّ في طولهِ الموجيَّ عدَّة أطوال موجية عن نطاق الامتصاص للدقائق المتسببة بالتشتت؛ وإذا ما كان للدقائق قِمَم امتصاصية معينة فإن تشتتاً أكثر سيحدثُ على جانب الأطوال الموجية الطويلة لهذه القمم، بينما يحدثُ تشتتٌ أقلُّ على جانب الأطوال الموجية القصيرة لها.

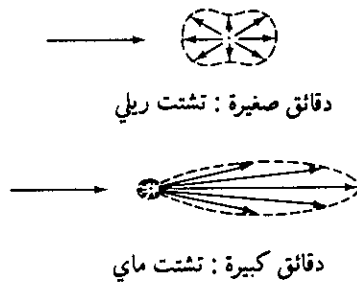
نظرية ماي في تشتت الضوء Mie Theory of Scattering

التمييز بين تشتت ريلي وتشتت ماي

إذا كانت الدقائق صغيرة أي أقل من $\frac{1}{\lambda}$ الطول الموجي، فإنه يمكنُ حسابُ تشتتها للضوء كما لو كانت أقطاباً ثنائية؛ أما إذا كان حجمُ الدقائق أكبر من ذلك بكثير، فإن الضوء المُشْتَت من جزء من الدقيقة لا يتحد في الطور مع الضوء المُشْتَت من جزء آخر منها، مما يَنتُجُ عن ذلك تداخلٌ يُنْقِصُ من شدة التشتتِ الحاصلة في غياب ذلك.

ويمكنُ الآن اعتبارُ شدة التشتت في اتجاه ما أنها نتيجة تراكبِ أمواج أولية تصدرها نقاط الدقيقة المختلفة، وتصلُ هذه الأمواجُ إلى المشاهد بفوارق في الطورِ تعتمدُ على مواقع النقاط الصادرة منها واتجاهِ المُشاهد؛ إلا أن هذه الفوارق تكونُ صغيرة لزوايا التشتتِ

الصغيرة، وهي تزدادُ بزيادة زاوية التشتت. ولا يكون هنالك أية فوارق في الطور في اتجاه الشعاع الساقط، الأمر الذي يفسر حقيقة تركيز التشتت في الاتجاه الأمامي كلما ازداد حجم الدقيقة (الشكل ٤)؛ ولذا لا يكون التشتت متماثلاً للزوايا المجسمة إذا ما كان حجم الدقيقة أكبر من $\frac{1}{\lambda}$ الطول الموجي، بل إنه يزداد في الاتجاه الأمامي. وتسمى نسبة الشدة في اتجاه أمامي إلى الشدة في اتجاه خلفي (أي مثلاً النسبة $\frac{شدة١}{شدة٢}$) عدم التماثل *dissymetry*، وهي نسبة يمكن استخدامها لتعيين حجم الدقيقة شريطة أن يُعرف شكلها.



الشكل ٤ : التوزيع الزاوي في تشتت ريلي وتشتت ماي.

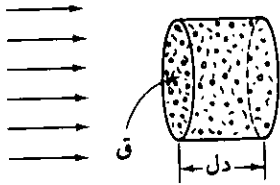
وتأخذُ نظرية ماي بعين الاعتبار حجم الدقيقة وشكلها وثابت عازيها وامتصاصيتها، ومن الممكن انطلاقاً من نظرية ماكسويل اشتقاق التشوهات الموجية الكهربائية والمغناطيسية التي تُفضي بدورها إلى متسلسلة (غير متناهية من ناحية نظرية) من الأمواج الجزئية التي تتناقص سعاتها بسرعة أكبر كلما صغرت الدقائق المشتتة في حجمها.

وفي نظرية التشتت لريلي، لا تؤخذ بعين الاعتبار إلا المجموعة الأولى من الأمواج الجزئية، ونُهملُ الأمواج الجزئية ذات الرتب العالية؛ ولذلك يمكن القول إنَّ نظرية ريلي هي حالة خاصة من نظرية ماي. وبازدياد حجم الدقيقة فلا بُدَّ من أخذ المزيد من الأمواج الجزئية ذات الرتب العالية؛ وتتطلب هذه الحسابات نظراً لتعقيدها المتزايد استخدام الحاسبات الإلكترونية ذات السرعة العالية.

معامل إطفاء مائي *

تشابه خصائص تشتت الدقائق التي تكون نسبة أنصاف أقطارها إلى الطول الموجي (نق/ λ) متساوية؛ ويستخدم غالباً عوضاً من تلك النسبة نسبة محيط الدققة إلى الطول الموجي: $\alpha = \lambda / \text{نق}$.

ومن الملامح الأخرى لنظرية مائي أنها تأخذ بعين الاعتبار الفارق في معامل الانكسار (Δ م) بين الدقائق والوسط الخارجي الذي يحيط بها. ويحدد البارامتران (السمتان) α ، Δ م كل خصائص الإطفاء والتشتت والاستقطاب.



الشكل ٥: الحجم الذي يحتوي على مشتات مائي.

افترض أن حزمة ضوئية متوازية أحادية الموجة مساحة مقطعها ق تسقط على الحجم ح=ق. دل (الشكل ٥)، وافترض أن الحجم ح يحتوي دقائق كروية عالقة فيه تتساوى جميعها في أنصاف أقطارها (نق). وبافتراض أن وحدة الحجم تحتوي على ح دققة، فإن الحجم ح يحتوي إذن على:-

$$\text{ح} = \text{ح} \cdot \text{ق} = \text{د} \cdot \text{دققة}$$

وتشكل كل دققة عقبة هندسية مساحة مقطعها ط نق^٢؛ وبذلك يكون مساحة مقطع كل الدقائق:-

$$\text{ح} = \text{ق} \cdot \text{د} \cdot \text{ط نق}^2 \dots \dots [٤-٦:٣]$$

وتصبح المعادلة السابقة شريطة أن لا تقع أية دققة في ظل أية دققة أخرى ولا نقصت مساحة المقطع. وتكون المسافات بين الدقائق في معظم الأحوال أكبر بكثير من أنصاف أقطارها، مما يجعل مساحة المقطع القصوى مساوية لمساحة المقطع الصحيحة. ومع أن مساحة مقطع أية دققة تساوي ط نق^٢، فإن قدرتها على الإطفاء أكثر مما يتوقع من مساحة مقطعها الهندسي؛ وبالفعل فإن مساحة المقطع الفعالة أعلى بمعامل K الذي يُسمى عامل

• جوستاف ماي (١٨٨٦-١٩٥٧): أستاذ الفيزياء في جامعة فريزرغ، ألمانيا.

G. Mie, "Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen," *Ann. Physik* 25 (1908), 377-445.

الإطفاء، أي أن المساحة تساوي K طنق^٢، وتسمى مساحة مقطع الإطفاء. وتساوي مساحة مقطع الإطفاء مساحة مقطع التشتت في غياب أي امتصاص.

وإذا كانت $ش$ هي شدة الضوء المتشتت و $ش$. هي شدة الضوء الساقط فإن:-

$$[٥-٦:٣] \quad \frac{ش}{ش.} = \frac{ح ق دل \quad K \text{ طنق}^2}{ق} \dots\dots$$

وتشير الإشارة السالبة - إلى نقصان الشدة بينما يشير + دل إلى زيادة في الطول. ويمكن التعبير عن نسبة الضوء المتشتت إلى الضوء الساقط على النحو التالي:-

$$[٦-٦:٣] \quad \frac{ش}{ش.} = \mu \text{ دل} \dots\dots$$

حيث μ هو معامل إطفاء مائي. وبضم المعادلتين [٥-٦:٣] و [٦-٦:٣] معاً نحصل على:-

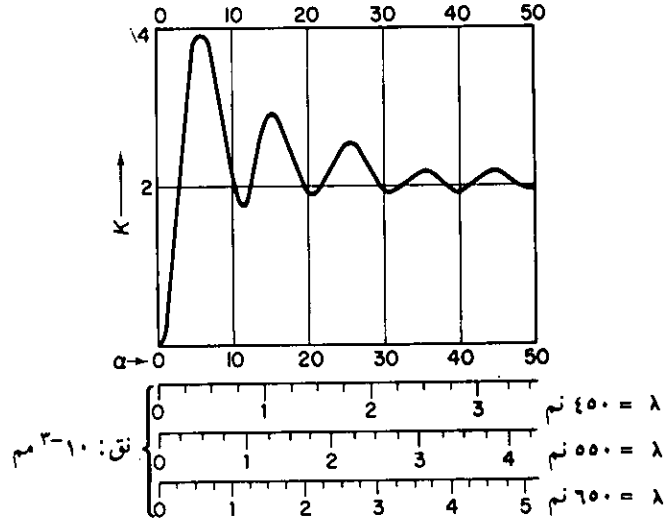
$$[٧-٦:٣] \quad \boxed{\mu = ح K \text{ طنق}^2} \dots\dots$$

وتبين هذه المعادلة أن معامل إطفاء مائي يساوي حاصل ضرب عدد الدقائق في مساحة مقطع الإطفاء. *

تطبيقات نظرية مائي

يمكن حساب عامل الإطفاء K من نظرية مائي. فإذا افترضنا أن المشتتات في السحب والضباب الخفيف والكثيف على سبيل المثال هي ماء في معظمها فإن $\mu = ١,٣٣$ ؛ كذلك فإن K بدلالة $\alpha = ٢ \text{ طنق} / \lambda$ يأخذ شكل المنحنى في الشكل ٦. ويشبه المنحنى منحنى الاهتزاز المتضائل $damped$ الذي يبلغ القيمة $K = ٢$ بزيادة α .

*G. Dietze, *Einführung in die Optik der Atmosphäre* (Leipzig: Akadem. Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., 1957).



الشكل ٦: منحني عامل الإطفاء K للدقائق المشتتة ذات معامل الانكسار ١,٣٣ (قطيرات الماء)

[استنسخت بإذن من: G. Dietze, *Einführung in die Optik der Atmosphäre*, Leipzig: Akad. Verlagsgesellschaft Geest & Portig K. G., 1957, 194. Reproduced by permission.]

لاحظ أن العلاقة λ^{-1} لم تعد تصح في حالة تشتت مائي؛ فزيادة حجم الدقيقة ينقص اعتماد شدة التشتت على الطول الموجي، حتى إذا أصبح حجم الدقيقة كبيراً لم تعد الشدة تعتمد بتأناً على الطول الموجي. وعلى أية حال فهذه العلاقة لا تتغير بشكل تدريجي بسيط.

لاحظ أيضاً أن للمحور السيني في الشكل ٦ ثلاثة مقاييس تدل على أنصاف أقطار المشتتات لأطوال موجية ثلاثة: فمثلاً يبلغ معامل الإطفاء K لقطيرة الماء التي نصف قطرها ٠,٠٠١ مم وللضوء الأزرق $\lambda = 500$ nm قيمة ٢,٣٨، وللضوء الأخضر ($\lambda = 550$ nm) قيمة ١,٧٨، وللأخضر ($\lambda = 650$ nm) قيمة ٢,٢٩. ولذا، فلو كان نصف قطر قطيرات الماء ٠,٠٠٧ مم، فإن الضوء الأبيض المار فيها يظهر أزرق في حين يبدو

•• يمكن إظهار ذلك بإضافة بضع قطرات من حامض الكبريتيك المخفف إلى محلول مخفف من ملح هيبو التصوير (ثيوكبريتات الصوديوم)؛ إذ يتكون أولاً راسب من دقائق الكبريت الرفيعة جداً التي تشتت عنها إلى الجوانب الضوء الأزرق. ويظهر الضوء النافذ حمراً كما في الغروب، وبعد برهة يزداد حجم دقائق الكبريت مسببة بذلك تشتت مزيد من الأمواج الطويلة. وأخيراً عندما تُضيق الدقائق كبيرة الحجم يبدو المحلول أبيض اللون بغض النظر عن الاتجاه الذي يُنظر فيه.

الضوء المتشتت أحمر؛ أما لو كان نصف القطر ٠,٠٠٠٤، نم، فإن الوضع ينعكس، إذ يبدو الضوء النافذ أحمر والضوء المتشتت أزرق. ويظهر هذا أن ما يلاحظ أحياناً هو عكس ما يتوقع تماماً من العلاقة λ^{-4} التي تنطبق على التشتت الجزيئي. فعلاً فقد شوهدت الشمس زرقاء والسماء المجاورة لها حمراء؛ ويتطلب هذا التبدل (العكس) وجود عدد كبير من الدقائق العالقة ذات الحجم الواحد تقريباً. ولكن لما كانت الدقائق الصلبة العالقة تتوزع في حجمها توزيعاً واسعاً، فإن الضوء المتشتت منها يكون ضوءاً أبيض؛ وهذا هو السبب الذي يجعل السحب تبدو بيضاء أو رمادية وملونة فقط في حالات نادرة.

وباختصار فإن اعتماد تشتت ماي على الطول الموجي يختلف عن العلاقة λ^{-4} في تشتت ريلي. وتظهر هذه الاختلافات في أعلى صورها عندما يكون المنحنى في الشكل ٦ في أشد انحداراً. فبينما يتشتت الضوء الأزرق في تشتت ريلي دائماً أكثر من الأحمر فإن هذا الأمر غير صحيح في تشتت ماي إلا حيثما تهبط الدالة $K(\alpha)$ ؛ وعندما تضعد الدالة $K(\alpha)$ يكون الإطفاء أعلى للأمواج الأطول، كما يختفي الاعتماد على الطول الموجي (أو التحليل الإطفائي) للدقائق كبيرة الحجم جداً. ويتضح هذا أيضاً من شكل الدالة التي تتجمع نحو القيمة $K=2$ باستقلال عن معامل انكسار المادة.

ويصغر معامل الإطفاء بزيادة الطول الموجي، وهي علاقة تتضح بصورة أفضل في تشتت ريلي: ففي جونيقي (جوريي) يبلغ النقصان النسبي أعلى قيمة له، كذلك يكون معامل الإطفاء متناسباً مع λ^{-4} ؛ أما في تشتت ماي فإن معامل الإطفاء يتناسب مع λ^{-1} ، ولذا تبدو زرقاء السماء في حالة وجود الهواء الملوث الذي يحوي العديد من الدقائق الصلبة أقل تشبعاً منها في حالة الهواء النظيف الخالي من الدقائق الصلبة تلك.

الحیود العشوائي Random diffraction

عندما تكون الدقائق كبيرة جداً، فمن الممكن وصف نتائج تفاعل الضوء معها على نحو أكثر صحة باعتبار أنها متسببة بالحیود. وما يزال حيود الضوء يستخدم لقياس المسافات

القصيرة منذ ١٥٠ عاما. وقد عَيَّنَ توماس يونغ سمك ألياف الصوف وأقطار خلايا الدم بالحيود، كذلك قام بعض الباحثين منذ ذلك الوقت بتحليل أنواع مختلفة من الدقائق والفراغات في تراكيب من نفس النوع باستخدام الطريقة نفسها. ومن الواضح أنَّ استخدام الحيود يسهل مع المحاليل الغروية ذات الدقائق متساوية الحجم أو منظومات الدقائق الواحدة، على خلاف أخلاط الدقائق ذات الحجم المتغير التي يصعب تناولها بالطريقة نفسها. ويمكن اختزال المسألة إلى:-

(أ) حجم الدقائق أو توزيعها الحجمي (ب) عددها في وحدة الحجم..

اعتبر على سبيل المثالي مثالين للمنظومات ذات الدقائق الواحدة ومثالا لخليط دقائق كما في الشكل ٧. ويظهر الشكل ٨ بعض الأنماط التداخلية الناتجة، وهي تتألف عموماً من مركز ساطع (صورة المصدر الضوئي) محاط بمنطقة ساطعة صغيرة من الضوء المشتت، يتبعها النهاية الصغرى ذات الرتبة الأولى، ثم يلي ذلك النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى ثم النهاية الصغرى ذات الرتبة الثانية... الخ. وتتسبب المراوح الضوئية نصف القطرية بالحيود من الثقوب المستطيلة التي تتخذ من مجالي النظر.

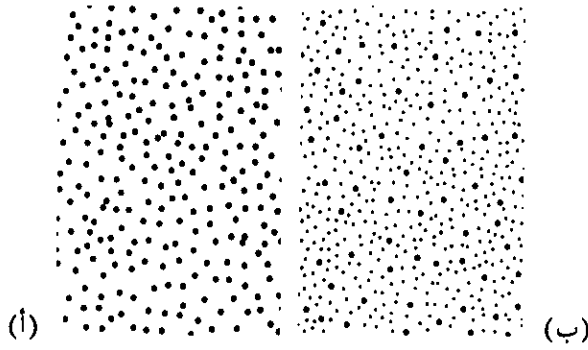
الحجم

يمكن إيجاد حجم الدقائق من زاوية الحيود θ . ويبلغ نصف قطر النهاية الصغرى ذات الرتبة الأولى في حيود فرونهوفر القيمة المحسوبة من المعادلة التالية:-

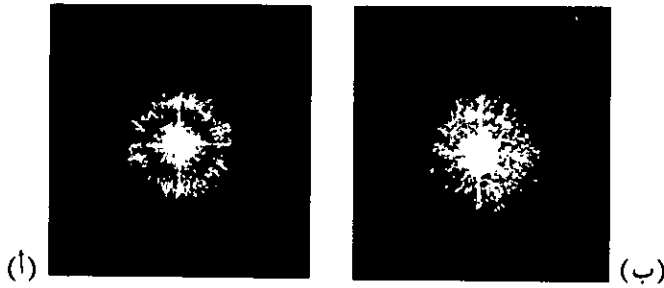
$$\text{ص نهاية صغرى}_1 = 1,22 \frac{\lambda}{\text{ق}} \text{ س} \quad \dots\dots [8-6:3]$$

حيث λ الطول الموجي، ق قُطر العناصر المحيطة، وس البعد البؤري للعدسة التي يشاهد التأثير التداخلي في مُستواها البؤري. أما نصف قطر النهاية العظمى ذات الرتبة الأولى فيغطي ب:-

$$\text{ص نهاية عظمى}_1 = 1,63 \frac{\lambda}{\text{ق}} \text{ س} \quad \dots\dots [9-6:3]$$



الشكل ٧: تركيب نموذجي من الاقراص غير الشفافة الموزعة عشوائياً: (أ) منظومة متساوية الدقائق (ب) منظومة متنوعة الدقائق. وكانت اقطار النقاط في القنوات الاصلية ٨,٦ × ١٠^٣ مم، و١٣,٤ × ١٠^٣ مم. وتبلغ نسبة عدد النقاط الصغيرة إلى عدد النقاط الكبيرة في الشكل (ب) النسبة ٨:١



الشكل ٨: أنماط الحيود الناتجة من: (أ) نموذج يحتوي على ٣٠٠٠ نقطة كبيرة (ب) منظومة متنوعة الدقائق تحتوي على ١٥٠٠ نقطة كبيرة و ٣٠٠ نقطة صغيرة.

وَلَا تُشهِمُ عموماً النهايات العظمى والصغرى من الرتب الأعلى كثيراً في نمط الحيود الناتج لكون شديتها منخفضة تماماً، فكما في محزوز الحيود يزداد الاتساع نصف القطري للنمط بنقصان النسبة $\frac{Q}{\lambda}$ أي بنقصان حجم الدقائق. وكما قد أُشير إلى ذلك من قبل، فإنَّ العاملين ١,٢٢، ١,٦٣، هما ثابتان يُمكن اشتقاقهما من دوال بيسل (انظر الجدول ١).

العدد

من الممكن حساب عدد الدقائق الموجودة من شدة أنماط الحيود الناتجة: فإذا كانت هنالك دقيقة واحدة فإن النمط لا يظهر إلا بالكاد؛ وإذا ما أزيحت الدقيقة في أي اتجاه يظل النمط على حاله، مما يؤكد أن موقع الدقيقة المحيطة لا تأثير له. ومن الممكن الاعتراض عن الدقيقة المفردة بعدة دقائق من نفس الحجم، وعندئذ لا تتغير هيئة النمط، وكل ما يحدث هو زيادة سطوعه (أي النمط). وتُعطى الشدة الكلية للمشتتات التي عددها h ببساطة بالمعادلة التالية:-

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad \text{.....} \quad [3:6-10]$$

الجدول ١: ثوابت دالة بسيلٍ لِحَلَقَاتِ الحيود من رتب مختلفة.

الرتبة	النهاية الصغرى	النهاية العظمى
١	١,٢٢	١,٦٣
٢	٢,٢٣	٢,٦٨
٣	٣,٢٤	٣,٧٠
٤	٤,٢٤	٤,٧١
٥	٥,٢٤	٥,٧٢

حيث θ هي الشدة الناتجة من دقيقة منفردة. وتجدر الإشارة إلى أن الشدات تُضاف في التوزيع العشوائي بدل السعات كما كان الحال في مخزوز الحيود.

وفي المنظومة منوعة الدقائق تُكوّن كل مجموعة من الدقائق من حجم واحد نمطاً خاصاً بها، وتتداخل الأنماط الناتجة من هذه المجموعات. ولذا لا يعود يُظهر النمط الكلي الحاصل النهايات الصغرى والعظمى المتميزة كما في المنظومة متساوية الدقائق، بل يبدو أنها تظهر

تقريباً متضخّبةً. وهكذا يُمكنُ استخلاصُ الاستنتاجاتِ المناسبةِ عن التوزيعِ الحجميِّ للدقائقِ مِنْ درجةِ تعريضِ نهاياتِ الحيويدِ العُظمى Broadening طالما ظَلَّتْ على الأقلِّ المسافاتُ بَيْنَ الدقائقِ أكبرَ بكثيرٍ من حَجْمِ الدقائقِ نَفْسِها.

اقتراحات لقراءات إضافية

- H. C. van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1957).
- G. Dietze, *Einführung in die Optik der Atmosphäre* (Leipzig: Akadem. Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., 1957).
- A. Sommerfeld, *Optics, Lectures on Theoretical Physics*, Vol. IV (New York: Academic Press Inc., 1954), 191-95.
- W. E. K. Middleton, *Vision Through the Atmosphere* (Toronto: University of Toronto Press, 1952).

المسائل

- ١-٦:٣ جد النسبة بين شدتي تشتت ريلي لِخَطَي الهيدروجين $\lambda_1 = 410$ نم، و $\lambda_2 = 656$ نم.
- ٢-٦:٣ يتشتتُ الضوءُ الأبيضُ من الدقائقِ الصغيرة. كيف تتغيّرُ شدةُ الضوءِ المتشتتِ بالطولِ الموجيِّ إذا كانت الدقائقُ تقريباً: (أ) ذات قطرٍ يبلغُ ٥٠ أنجستروم (ب) ذات قطرٍ يبلغُ ١,٠ مم. أرسم المنحنيات التي توضحُ النتائجَ المتوقَّعة.
- ٣-٦:٣ إذا تسبَّب الضوءُ الذي طوله الموجيُّ ٦٣٥ نم في قَدْرٍ معينٍ من تشتتِ ريلي فجد الطولَ الموجيَّ للضوءِ الذي يتسبَّبُ في تشتتِ قدره ١٠ مراتٍ ذلك التشتتِ.
- ٤-٦:٣ أرسم ثلاثة أشكالٍ تبيِّنُ توزيعَ شدةِ الضوءِ المتشتتِ تشتتِ ريلي من جسمٍ نقطيٍّ افتراضيٍّ في الحالاتِ التالية: (أ) إذا كانَّ المتجهُ الكهربائيُّ للضوءِ الساقطِ عمودياً على مستوى الرسم (ب) إذا اهتزَّ المتجهُ الكهربائيُّ في مستوى الرسم (ج) إذا كانَّ الضوءُ الساقطُ غيرَ مستقطبٍ.

٥-٦:٣ تُعَبَّرُ بِذَوْرِ اللِّكُوبُودِيَوْمِ شَرِيجَةً زَجَاجِيَّةً . وَبِاسْتِخْدَامِ ضَوْءٍ أَحْمَرَ طَوْلُهُ الْمَوْجِيُّ ٦٥٠ نَمِ وَجِدَ أَنَّ زَاوِيَةَ الْحَيُودِ لِلنَّهَائَةِ الْعَظْمَى ذَاتِ الرَّتْبَةِ الْأُولَى هِيَ ٢°، فَجَدَ قُطْرَ الْبُذُورِ؟

٦-٦:٣ اسْتِخْدَمَ الْحَيُودُ لِتَعْيِينِ حَجْمِ الدَّقَائِقِ فِي عَيْنِهِ فَخَصَّ تَحْتَوِي عَلَى خَلِيطٍ مِنْ دَقَائِقَ مُتَنَوِّعَةٍ الْحَجْمِ . وَبِاسْتِخْدَامِ تَرْتِيبَاتِ حَيُودٍ فَرَوْنَهَوُفَرِ الْمُنَاسِبَةِ وَضَعَ ثُقْبَ حَلْقِيٍّ قَطْرُهُ ٢٠ مِمَّ فِي الْمَسْتَوَى الْبُؤْرِيِّ لَعَدْسَةٍ بَعْدَهَا الْبُؤْرِيُّ ٥٠ سَم . فَإِذَا كَانَ عَرَضُ الْمَسَاحَةِ الْحَلْقِيَّةِ الْمَفْتُوحَةِ يَسَاوِي ٢ مِمَّ، أَيْ أَنَّ الْقَطْرَ الدَّاخِلِيَّ لِلْحَلْقَةِ ١٩ مِمَّ وَالْقَطْرَ الْخَارِجِيَّ ٢١ مِمَّ، فَجَدَ الْحَدِيثَيْنِ الْأَعْلَى وَالْأَدْنَى لِحَجْمِ الدَّقَائِقِ الَّتِي تَتَسَبَّبُ فِي جَعْلِ الضَّوءِ يَمُرُّ مِنَ الثَّقَبِ الْحَلْقِيِّ.

الجزء الرابع

بصريات التحويلات

Optics of Transformations

ننتقل الآن إلى موضوع تمت فيه تطورات هامة في السنوات القليلة المنصرمة استلهمت جزئياً من التطورات في نظرية الشبكة الكهربائية. وتعني «التحويلات» تغيير شكل معطى أو مجموعة من العبارات إلى شكل آخر مكافئ أو مجموعة مكافئة من العبارات. فعلى سبيل المثال يعتبر تغيير هيئة جسم إلى هيئة نمط حيود متسبب بالجسم، أو تغيير نمط تداخل إلى نمط طيفي أمثلة على التحويلات البصرية.

وكما سنرى تشتمل هذه التحويلات على عمليات أساسية عديدة تحدث في علم البصريات. إنَّ مُحَوِّلَتي فورييه وفِرْنِل هما أساساً مُعْظَمُ تكونِ الصور. كذلك فالمحولات transforms هامة للحصول على فهم أفضل لأية أداة بصرية تحوي أجهزة غير عادية كالحاسبات البصرية وآلات القراءة ومنظومات استرجاع المعلومات بأكملها. وبكل تأكيد لا يمكن فهم التصوير المُجَسِّم (الهولوجرافيا) - من قبيل التمثيل - بصورة كاملة إلا إذا عرفنا مبادئ بصريات التحويلات.

الفصل ٤ : ١

مطيافية محولة فورييه

Fourier Transform Spectroscopy

دعنا نبدأ بمثال على التحويل يَربطنا بسهولة بالموضوعات التي تَمَّ بحثها سابقاً أي المبادئ الأساسية لعلم الطيف (المطيافية). من الممكن الحصول على الأطياف بفئتين رئيسيتين من الأدوات :-

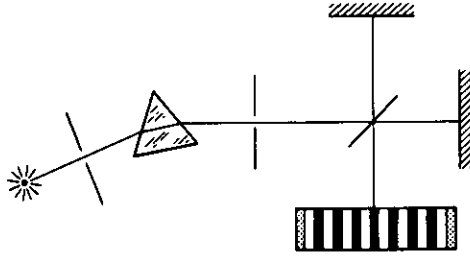
- (١) الأدوات التي تُبنى على التحليل المباشر مثل الموشورات ومخزوزات الحيود، و
- (٢) الأدوات التي تقوم على قياس التداخل والتحويل الذي يتبعه.

وبالطبع نستخدم مخزوزات الحيود التداخل أيضاً، ولذا فإنَّ الفارق الأساسي يكمن فيما إذا كان الحصول على الطيف يتم مباشرة أو غير مباشرة وبتحويل فورييه كما سنرى. وبقليل من الغلو تعتبر مطيافية محولة فورييه، التقدم الأساسي الوحيد في تكنولوجيا المطيافية الذي حدث منذ أن اكتشف بنزن كاشف الطيف قبل مئة عام. ان مطيافية فورييه بكل تأكيد ليست الطريقة الأنسب للحصول على الطيف، إلا أنها مع ذلك تتفوق على أي موشور أو مخزوز حيود في أنها أقل هدراً للضوء.

قياس التداخل ومنحنيات الوضوح

Interferometry and Visibility Curves

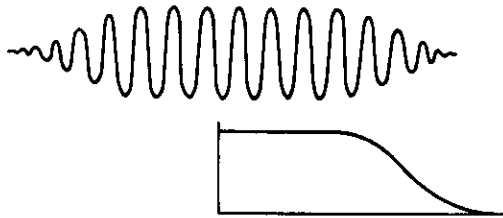
دعنا ننظر إلى تجربة تداخل ميكلسون الاعتيادية (الشكل ١) : إنَّ مصدر الضوء يُصدِرُ الضوء الأبيض الذي نستطيع أن نغزل جزءاً رفيعاً من طيفه بواسطة «فاصل لوني أحادي» monochromator. وسوف تمتدُّ أهداف التداخل من مالا نهاية إلى مالا نهاية لو كان الضوء



الشكل ١: مقياس تداخل ميكلسون الذي يكون عدداً متناهياً من الأهداب التداخلية.

أحادي اللون تماماً؛ غير أن هذا غير ممكن كما هو واضح، فليس هنالك ضوء أحادي اللون نقي؛ ومن ثم فإن الأهداب تتلاشى على مسافة معينة من المحور. وقد بينا ذلك في الشكل ١ بتلوين الأهداب الخارجية باللون الرمادي بدل تلوينها بكاملها باللون الأسود.

ومن الممكن بعد ذلك مسح الفيلم الذي صورت عليه الأهداب، وذلك بتحريك شق صغير، خلقه كاشف ضوئي، على الأهداب للحصول على كثافاتها النسبية، ويعطي هذا المسح أثراً: رسماً منتظماً الارتفاع قرب الوسط ومتناقصاً جهة الطرفين (الشكل ٢ - الرسم العلوي). ويبين الرسم السفلي في الشكل ٢ غطاء نصف الرسم.



الشكل ٢: تتبع قياس الكثافة عبر الأهداب التداخلية

وبفتح شق الفاصل اللوني في الشكل ١، أي بجعل الضوء أقل نقاء من حيث أحادية طول الموجي، فإن عدد الأهداب الواضحة يتناقص كما يتغير غطاؤها تبعاً لذلك. ومن الواضح أن هناك علاقة بين عرض الشق وشكل المنحنى. ويشار إلى الغطاءات بمنحنيات الوضوح؛ ويمكن تعريف الوضوح (و) بأنه نسبة الفرق بين الشدتين القصوى والصغرى إلى مجموعيهما. وتستخدم لفظة المغايرة Contrast مرادفة غالباً للوضوح. وهكذا فإن:-

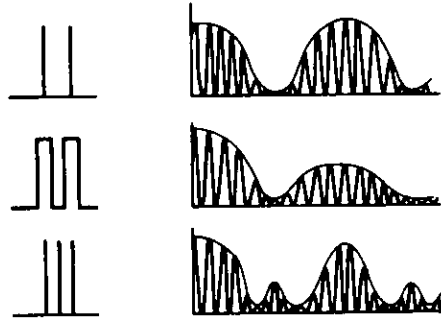
[١:٤-١]

.....

$$\gamma = \frac{\text{ش ق} - \text{ش ص}}{\text{ش ق} + \text{ش ص}}$$

مثال: ألدّة القصوى لأهداب عالية المغايرة ٥ وحدات والشدة الصغرى صفر. المغايرة $\gamma = \frac{-5}{+5} = -1$ ؛ ولذا فأعلى قيمة ممكنة للمغايرة هي ١. وفي الأهداب منخفضة المغايرة فقد نحصل على شدة قصوى مقدارها ٣ وشدة صغرى مقدارها ٢؛ ولذا فالمغايرة $\gamma = \frac{2-3}{2+3} = -0.2$ أي أن المغايرة تتردد بين صفر وواحد.

ولو كان الشق ذا عرض متناهٍ جداً في الصغر والضوء أحادي اللون تماماً، فإنّ منحنى الوضوح سيكون خطأً أفقياً مستقيماً؛ إلا أنّ هذا الأمر كما ذكرنا لا يمكن بلوغه. ولذلك تلاحظُ التغيرات الدورية في مغايرة الأهداب عند استخدام الضوء من قوس الصوديوم. ولو كان خطاً الصوديوم رفيعين على نحو متناهٍ جداً لامتدّت التغيرات الدورية إلى ما لا نهاية (الشكل ٣ - الرسم العلوي)؛ إلا أنّ العرض المحدود للخطين يُعطي نقصاناً تدريجياً إضافياً في الشدة (الرسم في الوسط)، كذلك فإنّ وجود خطوط ثلاثة ينتج منحنيات أكثر تعقيداً (الرسم السفلي).



الشكل ٣: منحنيات الوضوح لهيئات أو تشكيلات مختلفة من خطوط الطيف.

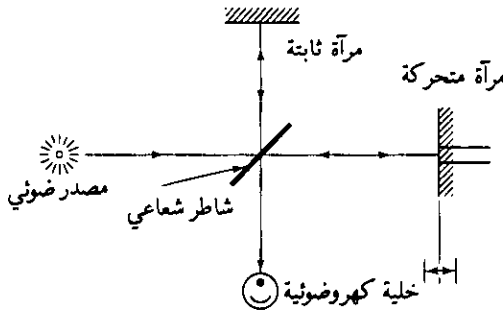
وقد أجرى ميكلسون * دراساتٍ مستفيضةً للربط بين منحنيات الوضوح وهيئة الخطوط

* أ. ميكلسون، المجلة الفلسفية ٣١ (١٨٩١) و ٢٥٦، ٣٣٨؛ ٣٤ (١٨٩٢)، ٢٨٠؛ «دراسات في البصريات» (شيكاغو: مطبعة جامعة شيكاغو، ١٩٢٧).

الطيفية (البروفيل). وكانت اهتمامات ميكلسون في ذلك الوقت في القياسات الدقيقة، وكان هدفه الأساسي إيجاد خط أحادي اللون بشكل كافٍ يمكن استخدامه معياراً للطول. وقد اكتشف ميكلسون في أثناء عمله أن خط الهيدروجين الأحمر هو خط ثنائي، وأن خط الزئبق الأخضر هو خط متعدد معقد، في حين وجد أن خط الكاديوم الأحمر رفيع بصورة غير عادية (٠,٠١٣ أنجستروم)؛ ولذا أصبح هذا الخط معيار الطول حتى حل محله خط الكريبتون البرتقالي عام ١٩٦٠.

مطيافية مقياس تداخل ميكلسون

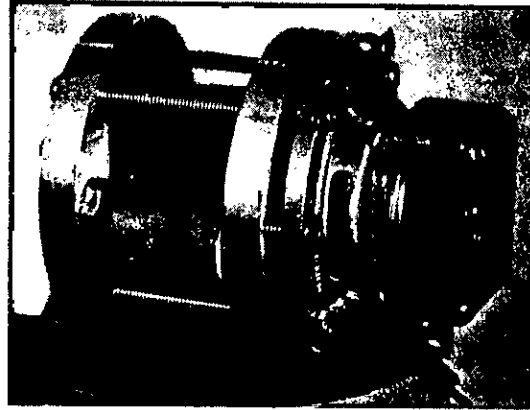
تطورت مطيافية فورييه من تلك البدايات، و يقوم بمبدأها باختصار على تهيئة مقياس تداخل واستخدام الضوء الذي يراود تحليله ثم الحصول على مسجلة التداخل interferogram وتحويلها بعد ذلك باستخدام تحويل فورييه إلى مسجلة طيفية spectrogram. ومن الممكن فهم مبدأ مطيافية فورييه أفضل فهم باعتبار كاشف طيف مقياس تداخل ميكلسون. فكما في مقياس تداخل ميكلسون الاعتيادي، يسقط الضوء من مصدر ضوئي (الشكل ٤ - أ) إلى اليسار) على شاطر شعاعي منقسماً بذلك إلى حزمتين تتحدان عند عودتهما، وتتقدمان إلى كاشف ضوئي. وتثبت إحدى المرآتين على مهتز ميكانيكي أو كهرو-ميكانيكي، ثم تجعل تهتز إلى الأمام وإلى الخلف. وإذا كان الضوء الساقط أحادي اللون، فإن الهدب المركزي يتعاقب في شطوعه وعمومه مما يولد إشارة متناوبة في الكاشف الضوئي. ويحدث الشيء نفسه للأهداب ذات الرتب الأعلى التي تتحرك بالنسبة إلى ثقب، يُفضل أن يكون رفيعاً، عندما تهتز إحدى المرآتين.



الشكل ٤ : مقياس تداخل ميكلسون كما يستخدم في مطيافية محولة فورييه.

ومن الواضح أنَّ تواتر إشارة الكاشف الضوئي يعتمد على تواتر اهتزاز المرآة ؛ غيّر أنَّ تواتر الإشارة يعتمد أيضاً على الطول الموجي ؛ ذلك لأنه ليس أساسياً معرفة طول المسافة التي تقطعها المرآة فحسب ، وإنما أيضاً معرفة عدد الأطوال الموجية الذي يغطي تلك المسافة . فكلما قصر الطول الموجي ارتفع تواتر الإشارة ؛ ولذا فإنَّ تواتر الإشارة عند كون الضوء الساقط أحادي اللون وعند ثبات سرعة اهتزاز المرآة يرتبط أيجابياً بالطول الموجي . ويبلغ تواتر الإشارة نصف قيمته في حالة مضاعفة الطول الموجي . وإذا ما احتوى الضوء الساقط على عدة أطوال موجية فإنَّ مُخرَج الكاشف output سيحتوي على كُـلِّ الإشارات المتناوبة والمناظرة للأطوال الموجية الساقطة متراكباً بعضها على بعض . وهذه الحُـطَّة عدة منافع أهمها : (١) الحصول على مقطع عرضي كبير من الضوء تقبله الأداة (٢) الحصول على تحليل متزامن لعدة أطوال موجية بدل طول موجي واحد في الوقت الواحد كما في مقياس الطيف الاعتيادي .

ومن ناحية عملية يمكن توفير تغيير طول المسار (أي تكييفه) في مقياس التداخل بوسائل عدة . وقد استخدم لهذا الغرض المرايا التي تحرك آلياً والخلايا المحكمة السد ذات الضغط المتغير والشوكة الرنانة التي يثبت في أحد فرعيها مرآة والبلورات البيزوكهربية ذات الأشكال المتنوعة . وفي النموذج المبين في الشكل ٥ ، يستخدم مكثف أبي كشاطر شعاعي ،



الشكل ٥ : مقياس طيف من نوع مقياس تداخل ميكلسون

ويدخل الضوء من اليسار ، ويتصل بالطرف الأيمن للمكعب مكثف صوتي ذو ملف مغناطيسي صغير ملصق بغشائه مرآة صغيرة ذات سطح مصقول ممتاز . كما يُثبت في جهة

المكعب الخلفية التي لا تظهر في الشكل مرآة ساكنة ذات سطح أكبر؛ وتخرج الحزمتان الضوئيتان المتضامتان من جانب المكعب الذي يواجه المشاهد حيث تلتقط هنالك بوساطة حزمة ليفية بصرية توصل إلى أنبوب مضاعف للضوء (لا يظهر في الشكل). وبعد تضمين حلقة من المطاط الرغوي بين اللوحة اليمنى التي تمسك المكعب واللوحة التي ثبتت عليها مكبر الصوت يُضخ من الممكن تعديل المرآة بمعالجة البراغي الثلاثة.

أنواع أخرى من كاشفات طيف مقياس التداخل

توجد أعداد كثيرة جدا من محولات فورييه ومن مقاييس الطيف غير العادية الأخرى. ومن المؤكد أن مزيدا منها سيطور في المستقبل، ونقدم هنا بعض الأمثلة الممثلة لها.

سيسام (SISAM)

وفي السيسام * يستخدم محزوزا حيود متشابها بديل مرآتي مقياس تداخل ميكلسون بحيث يميل كل من المحزوزين بزوايا ميل تساوي زاوية السقوط. وتحدث قدرة النقل الأقصى لطول موجي واحد فقط (λ). وبتغيير فارق المسار بين الشعاعين تغييراً خطياً مع الزمن، من خلال دوران لوحة مؤقتة مثلاً، نحصل على تعديل تام (100%) للضوء الصادر عند الطول الموجي λ ، أما للأطوال الموجية الأخرى فإن درجة التعديل الناشئة عن تغيير فارق المسار البصري تتناقص بسرعة؛ ولذا يكون التعديل انتقائياً ومحصوراً في مدى ضيق حول λ .

مقياس التداخل ذو المحزوز الصفيحي Lamellar grating interferometer

يحتوي هذا المقياس الذي يستخدم في نطاق الأشعة فوق الحمراء العالية على محزوز يتألف من مجموعتين متداخلتين من المرايا: إحداهما ثابتة والأخرى قابلة للتحريك عمودياً

* اختصاراً لـ:

* Spectromètre Interférentiel à Sélection par l'Amplitude de Modulation.

J. Connes, "Recherches sur la spectroscopie par transformation de Fourier,"

Rev. d'Optique 40 (1961), 45-79, 116-40, 171-90, 231-65.

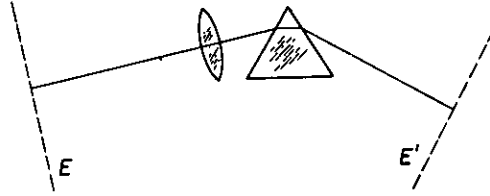
† J. Strong and G. A. Vanasse, "Lamellar Grating Far-Infrared Interferometer,"

J. Opt. Soc. Am. 50 (1960), 113-18.

على السطح. وبتحريك إحدى المجموعتين قليلاً، نحصلُ على مرأتين مستويتين بعمقين مختلفين، أو كما يمكنُ قوله نحصلُ على محزوزٍ صفيحيٍّ ذي عمقٍ أخذودِيٍّ متغير. وبتحريك إحدى المجموعتين بمعدلٍ ثابتٍ، فإن الضوءَ من طولٍ موجيٍّ معينٍ يُعطي تياراً ضوئياً متغيراً يتناسبُ تواتره معَ الطولِ الموجيِّ.

مقياس الطيف ذو القضبان المتوازية Grille Spectrometer

وفي مقياس طيف جيرارد Girard ذي القضبان المتوازية † تُسقط صورةُ المشبكِ E بدقةً وبتوافقٍ على مشبكٍ متممٍ E' (الشكل ٦). ومن الواضح أنَّ صورةَ E تتناغمُ معَ E' لطولِ

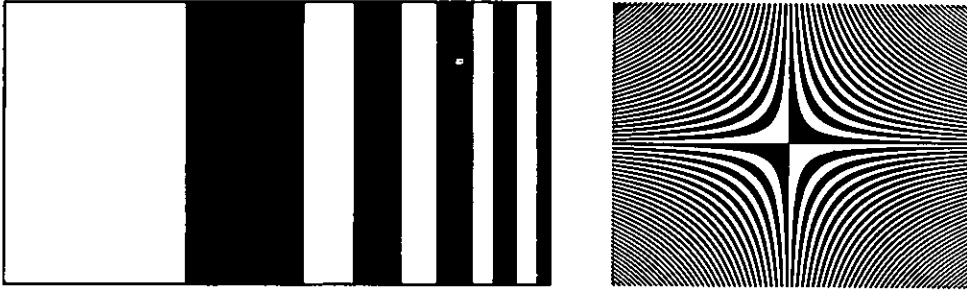


الشكل ٦: مبدأ مقياس طيف جيرارد ذي القضبان المتوازية

موجيٍّ معينٍ بسببِ وجودِ الموشور؛ أما الضوءُ من طولٍ موجيٍّ آخرٍ فسيمرُ جزئياً من E . وإذا ما اختيرت الفراغاتُ البينيةُ المعتمَةُ في المشبكتين E ، E' اختياراً صحيحاً، فإنَّ شدةَ الإشارةِ ستكونُ قياساً للفارقِ بينَ الطولينِ الموجيينِ علماً أنَّ أحدهما يُختارُ مسبقاً على نحوٍ اعتباطي.

وفي الحقيقة، فإنَّ مقياسَ طيف جيرارد أكثرُ تعقيداً؛ إذ يُستخدمُ المشبكات ذات القضبان المتوازية التي هي جزئياً شفافةً وعاكسةً ومعتمَةُ والتي لها في صورِها الأكثرَ جَدَّةً أشكالٌ غريبةٌ (الشكل ٧).

†A. Girard, "Spectromètre à Grilles," *Applied Optics* 2 (1963), 79-87.



الشكل ٧: تشكيل القضبان المتوازية في مقياس طيف جيرازد الأصلي (إلى اليسار) في أحدث صورة له (إلى اليمين). [رُسم بإذن من أي. جيرازد: «البصريّات التطبيقية»، ٢ (١٩٦٣)، ٨٢، ٨٤].

اختزال البيانات Data Reduction

المبادئ العامة

يتم الحصول في مطيافية محولة فورييه على التسجيل التداخلي قبل التسجيل الطيفي. دعنا نسمّ س فارق المسار الذي تحدّثه المرآة المتحركة؛ ومن ثم فإن توزيع السعة في التسجيل التداخلي لضوء أحادي اللون نقي هو:-

$$E = E_0 \cdot \cos\left(2\pi \frac{s}{\lambda}\right) \dots\dots [4-1-2]$$

كذلك يكون توزيع الشدة على النحو التالي:-

$$I = I_0 \cdot \cos^2\left(2\pi \frac{s}{\lambda}\right) \dots\dots [4-1-3]$$

وإذا كانت سرعة حركة المرآة ح، فإن:-

$$I = I_0 \cdot \cos^2\left(2\pi \frac{1}{\lambda} \cdot H \cdot z\right)$$

$$\frac{1}{\lambda} \cdot H \cdot z = \left[1 + \cos\left(2\pi \frac{4}{\lambda} \cdot H \cdot z\right)\right] \dots\dots [4-1-4]$$

ويفهم من المعادلة الأخيرة أنّ الإشارة التي يُحصَل عليها من الكاشف الضوئي تُعدّل بتواتر مقداره $\frac{H}{\lambda}$. ومن الأفضل عملياً أن تترك المرآة تهتز بتواتر ما بحيث يقع تواتر الإشارة الضوئية في المدى المسموع - هذا المدى الذي يتوافر له بيسر مكبرات ومحلّلات موجية.

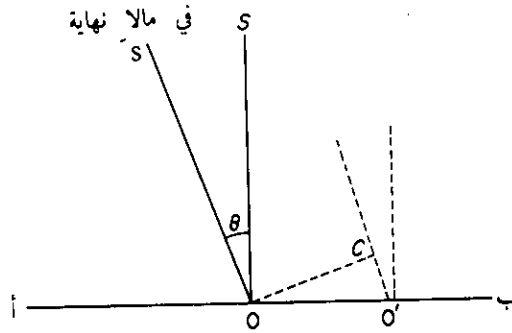
وإذا ما رغبت في وصف الطيف بدلالة الأعداد الموجبة الخطية σ بدل الأطوال الموجية، فإن علينا أن نذكر أن العدد الموجي الخطي يعني عدد الأمواج في كل وحدة طول. وتسمى وحدة σ بمقلوب السنتيمتر أو الكيسر (سم⁻¹)؛ وبذلك تصبح المعادلة [٤-١:٤] على النحو التالي:-

$$\text{ش} = \frac{1}{\lambda} \text{ ش. } [١ + \text{جتا } (\sigma \text{ ح } \lambda)] \dots [٥-١:٤]$$

ويكون للتيار الكهروضوئي تواتر مقداره σ ح. وبالطبع ليس من الضروري أن يكون الضوء أحادي اللون؛ إذ يمكن أن يكون له توزيع طيفي بقدر $\phi(\sigma)$ في نطاق عرضه $\Delta\sigma$ ؛ ومن ثم فإن كل مكونة لهذا التوزيع ستتسبب في تعديل التيار الضوئي عند تواتره الخاص به وبسعة تتناسب مع $\phi(\sigma)$. وإذا قدرنا على أن نسترجع الدالة $\phi(\sigma)$ من التيار الضوئي، أمكننا الحصول على طيف المصدر أي يكون لدينا الآن مقياس طيف.

تحويل فورييه Fourier Transformation

ولنتمكن من استرجاع طيف المصدر كما ذكر سابقاً، نستخدم تحويل فورييه. ويمكن شرح جوهر هذا التحويل على النحو التالي: المصدر الضوئي النقطي S موجود في مالا نهاية كما في الشكل ٨، ويسقط الضوء الصادر من S على الخط أب العمودي على اتجاه



الشكل ٨: اشتقاق مفهوم تحويل فورييه. [استنسخ بإذن من ر. جينسون R. Jennison، تحويلات فورييه، ١٩٦١، دار نشر برجمون Pergamon Press].

* نسبة الى جين بابتيست جوزف بارون فورييه Jean Baptiste Joseph Baron de Fourier (١٧٦٨-١٨٣٠): الفيزيائي والرياضي الفرنسي.

الانتشار. ويجد المشاهد الواقف عند أية نقطة O من الخط AB أن الانشعاعية متساوية عند جميع النقط على AB ، كذلك يجد هذا المشاهد أن طور الأمواج التي تقطع AB في نقطتين مثل O ، O' هو أيضاً طور واحد.

افترض الآن أن المصدر * الضوئي قد أزيح قليلاً عن موضعه إلى S ؛ إن المشاهد سيجد في هذه الحالة أيضاً أن انشعاعية أية نقطة على الخط AB واحدة، غير أنه سيجد أن هنالك تغيراً في الطور عند تحركه من O إلى O' ينشأ عن المسار الإضافي الذي طوله CO . وفي الحقيقة يجد المشاهد عند تحركه على AB أن هنالك تغيراً دورياً في فرق الطور يعتمد على الزاوية θ وعلى الطول الموجي.

وعلى عكس ذلك، فإن الخط AB قد يصدر ضوءاً ذا سطوع منتظم وبطور متساوٍ من جميع نقاطه. وبتتبع المسارات السابقة في اتجاه معاكس، نجد أن الضوء ذا الطور الواحد ينتشر نحو المصدر S ، وإذا ما تغير الطور دورياً على طول AB نجد أن الضوء ذا الطور الواحد ينتشر نحو المصدر S ، وبذلك يتضح أن هنالك علاقة تبادلية بين التوزيع المكاني لمجال ما على الخط AB (بدلالة s) والتوزيع الزاوي له (بدلالة θ): فكل منهما يمكن تحويله إلى الآخر. وبصورة أكثر عمومية نجد أن:-

$$[4: 1-6] \quad q(s) \Rightarrow q(\theta) \dots\dots$$

ويعني هذا أن $q(\theta)$ هي محولة فورييه لـ $q(s)$ ، وأن $q(s)$ هي محولة فورييه لـ $q(\theta)$. ونظراً لتماثل هذين الحدين، فإنهما يُسميان زوج فورييه كما يسمى كلٌّ منهما قرين الآخر $mate$.

ونستطيع كتابة محولات فورييه بطرق عدة: في صيغة من صيغ الثلاث أو في الصيغة الأسية للدوال الحقيقية والمركبة. ومن الأمثلة على الصيغة الأسية المتكاملتان التاليتان:-

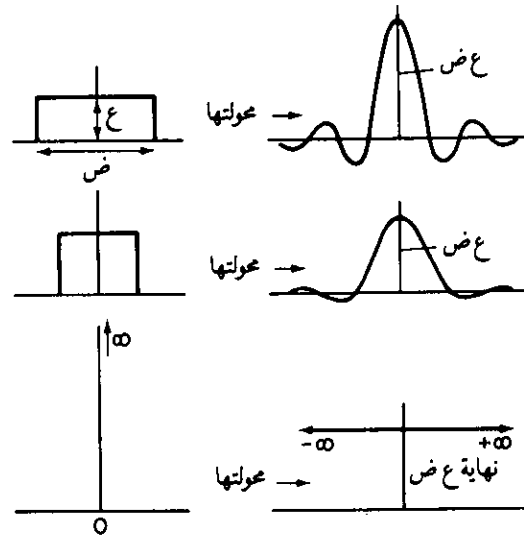
•• ر. جنيسون R.C. Jennison: «محولات فورييه والالتواءات للمجربين» (نيويورك، اكسفورد، مطبعة برجمون ١٩٦١)، ص (١١).

$$* \quad \left[\begin{array}{c} \infty + \\ \text{ق (س)} = (\xi) \text{ ق } (\xi) \text{ و } \text{طاس}^{\xi} \text{ د } \xi \\ \infty - = \xi \end{array} \right] \quad \text{د } \xi \quad (\infty + > \text{س} > \infty -) \dots\dots [7-1:4]$$

$$\left[\begin{array}{c} \infty + = \text{س} \\ \text{ق (} \xi \text{)} = (\xi) \text{ ق (س) و } \text{طاس}^{\xi} \text{ دس} \\ \infty - = \text{س} \end{array} \right] \quad (\infty + > \xi > \infty -) \dots\dots [8-1:4]$$

وهما متماثلتان باستثناء الإشارة السالبة في الأس.

لنتناول على سبيل المثالي محولات فورييه لنبضة مستطيلة ارتفاعها ع وعرضها ض؛ وكما يلاحظ من شكل منحنيات المحولات في الشكل ٩ (الرسم الى اليمين)، فإنَّ محوَلَة



الشكل ٩: الانتقال من نبضة مربعة (الرسمان العلوي وفي الوسط) الى دالة دلتا (الرسم السفلي)؛ المساحة ع ض تظل ثابتة.

$$\sqrt{1-i} = i \circ$$

فورييه تنتشر كُلاً ما صَغُرَ عرض النبضة، حتى إذا تلاشى عرض النبضة (ض = .) اختفى أي تفصيل في مُنَحْنِها. وتسمى نهاية أية نبضة مربعة (عندما يقترب عرضها من الصفر شريطة أن تظل المساحة المشمولة ع ض ثابتة) بدالة ديراك^{*}. وتبلغ قيمة هذه الدالة صفراً لكل قيم س ماعدا س = .، حيث تبلغ قيمتها عندها ∞ . ويعني هذا أن أي ضوء أحادي اللون تماماً يمكن تمثيله من ناحية نظرية بخط منفرد ذي عرض متناه في الصغر في أي رسم للسعة والطول الموجي، كذلك يمكن تمثيله في أي رسم للسعة والزمن بخط يمتد عبر الزمن كله.

معالجة مُسَجَّلات التداخل

لنفترض الآن أن σ ، ρ هما العددان الموجيان: الأقصى والأصغر للتوزيع الطيفي $\phi(\sigma)$. ان مسجلة التداخل التي يُحصَلُ عليها من هذا الطيف هي مجموع متسلسلة من دوال جيب التمام:-

$$ق(س) = \phi(\sigma) \int_{\sigma}^{\rho} \cos(\sigma s) d\sigma \quad [٩-١٠:٤] \dots\dots$$

وبتحويل فورييه العكسي يمكن استرجاع طيف القدرة $\phi(\sigma)$ على النحو التالي:-

$$\phi(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} ق(س) \cos(\sigma s) ds \quad [١٠-١٠:٤] \dots\dots$$

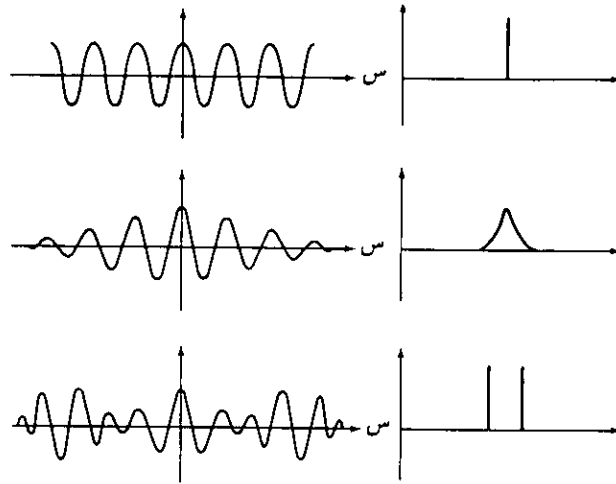
ويمكن إنجاز هذه المعالجة الرياضية بطرق متنوعة أشيعها استخدام الحاسبات العددية والحاسبات المماثلة أو المحلات الموجية. ومن السهل برمجته الحاسبات الالكترونية العددية لاجراء تحويلات جيوب التمام حتى في أثناء الوقت الفعلي الذي يحدث فيه الحادث الذي يراود تحليله. وأما المبدأ هنا فهو أن شدة أية نقطة في المسجلة التداخلية مرتبطة بسعة تواتر مكاني معين في الطيف يقاس مثلاً بعدد الدورات لكل وحدة طول في الرسم؛ وباستمرار

* نسبة إلى بول ادريان موريس ديراك Paul Adrian Maurice Dirac (١٩٠٢-): أستاذ الرياضيات في كامبردج بانجلترا الحاصل على جائزة نوبل ١٩٣٣.

قياس المسجلة التداخلية يقوم الحاسبُ بجمع إسهامات التواترات المكانية تلك، ولذا تكونُ المحولةُ جاهزةً حالما يكتملُ قياسُ المسجلة.

وتقومُ الحاسبة المماثلةُ ببساطةٍ بضربِ المسجلةِ التداخليةِ بِمَوْجَةٍ جيبِ التمامِ وبحسابِ تكاملِ الناتجِ على الطولِ الكاملِ للمسجلة، ويتمُّ عملُ مثلِ هذا التكاملِ لكلِّ عنصرٍ طيفيٍّ يرادُّ حسابه. وتعتبرُ المحللةُ الموجيةُ في جوهرها مرشحةً إلكترونيةً قابلةً لالتقاطِ الاشاراتِ التي يمكنُ تغييرُ تواترها، فبتمريرِ الإشارةِ الضوئيةِ في متسلسلةٍ من المرشحاتِ الالكترونيةِ المتصلةِ على التوازي يمكنُ قياسُ الشدةِ الضوئيةِ لأطوالٍ موجيةٍ عدةٍ؛ وبالعكسِ يمكنُ تغييرُ سرعةِ المرآةِ تدريجاً وتمريرُ الإشارةِ عبرَ مرشحةٍ واحدةٍ.

ويعتبرُ تعييرُ الطولِ الموجيِّ أمراً سهلاً إذ يُعطى الطولُ الموجيُّ مباشرةً من إزاحةِ المرآة، كذلك يمكنُ قياسُ الشدَّاتِ أو استخراجها من المسجلاتِ التداخلية: فكلُّ ما يلزمُ لذلك هو البقاءُ ضمنَ المدى الديناميكيِّ للآلةِ المسجلةِ أو ضمنَ الطرفِ الأدنى لقياسِ الشدةِ لمراقبةِ أيةِ تقييداتٍ ناشئةٍ عن التشويشِ يمكنُ أن تُفْضِيَ إلى نتائجٍ مغلوطةٍ. ونبيِّنُ في الشكلِ ١٠ بعضَ المسجلاتِ التداخليةِ النموذجيةِ والمسجلاتِ الطيفيةِ المقابلةِ (إلى اليمين).

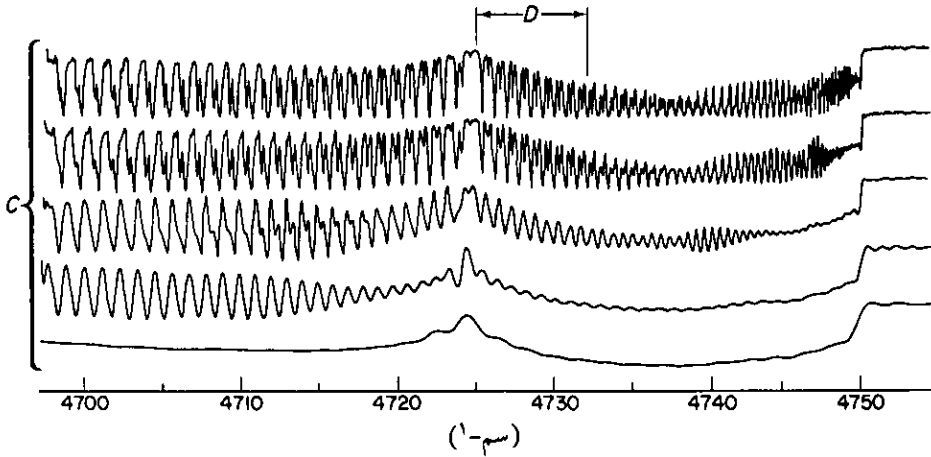


الشكل ١٠ : المسجلات التداخلية (إلى اليسار) والمسجلات الطيفية المقابلة (إلى اليمين).

فوائِد مطيافية محولة فورييه

١. لقد بلغت الآن تقريباً قدرة التبيين لمقاييس الطيف من نوع محولة فورييه ما بلغتْهُ الأدوات الاعتيادية الكثيرة المبنية على تحليل الضوء: فقدرَةُ التبيين لمحزوز حيود جيد أو لمحزوز سَلْمِيّ للطول الموجي ٥٠٠ نـم هي حوالي ٠,٠١ انجستروم؛ وفي بعض الأدوات من نوع محولة فورييه تَمَّ الحصول على تبيين مقداره ٠,١ سم^{-١} كما تَمَّ الحصولُ بمعظم الأدوات التجارية على تبيين يبلغ ٠,٥ سم^{-١}. وتناظر هاتان القيمتان قدرتي تبيين هما ٠,٠٢٥، ٠,١٢٥ انجستروم على التوالي.

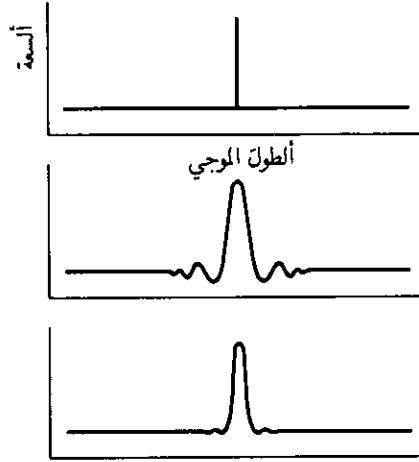
٢. من ناحية نظرية، فإن قدرة تبيين مقياس طيف فورييه تكون غير محدودة إذا كان فارق المسار غير محدود أيضاً؛ أما من ناحية عملية فالمرأة لا يمكن تحريكها إلا في مسافة محدودة فقط، الأمر الذي يحدُّ أيضاً من قدرة التبيين (الشكل ١١). و يبلغ مدى المسافة في



الشكل ١١: التحسن في تبيين نطاق الامتصاص لأكسيد النتروجين N_2O الواقع في طرف مدى الأشعة تحت الحمراء القريب. وينظر كل منحنى من المنحنيات المبينة زيادة في فارق المسار (وفي قدرة التبيين) تبلغ الضعف. ورسمت المنحنيات بحاسبة فعلاً خلال تسجيل الطيف التداخلي [من ب. كونز P. Connes، ج. ميكل G. Michel: «حاسبة الزمن الحقيقي لمطيافية فورييه». مؤتمر أسبن لمطيافية فورييه، آذار ١٩٧٠].

مقاييس طيف فورييه التي صُمِّمَ معظمها للاستخدام في نطاق الأشعة تحت الحمراء من ٠,٢٥ مم إلى ٥ سم؛ ولذا لا يمكن حساب تكامل المسجلة التداخلية من $-\infty$ إلى $+\infty$ ، إذ أنَّ المسجلة التداخلية مبتورة من هذه الناحية. كذلك تنشأ تقييدات أخرى في حالة كون المسجلة التداخلية غير متماثلة بالنسبة إلى النقطة التي يبلغ عندها فرق المسار صفراً.

ومن الممكن تحسين التبيين بإزالة الزوائد apodization (الشكل ١٢)، وفي هذه الحالة يتم تراكب دالة مثلثية ماسحة Scanning على المسجلة التداخلية.



الشكل ١٢: أطراف افتراضية تم الحصول عليها من مسجلات تداخلية جيب تامة تمتد إلى ما لا نهاية (الرسم العلوي)، ومسجلات مبتورة (الوسط)، ومسجلات أزيل منها الزوائد (الرسم السفلي)

٣. وحتى بعد أن يتم تسجيل «المسجلة التداخلية»، فإنَّ مزيداً من التبيين يمكن الظفر به تبعاً لعدد نقاط البيانات التي تُختار لعملية التحويل التالية؛ ففي بعض الأحيان تؤخذ ١٠٠٠ نقطة غير أنَّه يكفي عادة أخذ ٤٠ أو ١٠٠ نقطة؛ ومن الضروري أن تؤخذ هذه النقاط في فترات منتظمة بصرف النظر عن منطقة الطيف التي تنال الاهتمام. (واستخدم ميكلسون الغطاء أي منحني الوضوح فقط، ولم يستخدم بيانات أهداب التداخل).

٤. تتناسبُ قدرةُ النقلِ throughput في أيّ نوعٍ من مقاييسِ الطيفِ تقريباً تناسباً عكسياً مع قدرة التبيين؛ الأمرُ الذي يفسرُ ضرورةَ كونِ بعضِ أبعادِ مقياسِ الطيفِ مثلِ عرضِ الشقِّ صغيرةً لكسبِ مزيدٍ من التبيين. غيّرَ أنَّ حاصلَ ضربِ قدرةِ النقلِ في قدرةِ التبيينِ لَيْسَ ثابتاً لكلِّ أنواعِ المقاييسِ، فهو أكبرُ لمقياسِ الطيفِ الذي يستخدمُ المحزوزَ منه لمقياسِ الطيفِ الذي يستخدمُ الموشورَ، وهو أعلى بمرّةٍ إلى مرتينِ في مقياسِ طيفِ فورييه من نوعِ ميكلسون منه في مقياسِ طيفِ المحزوز.

٥. يتناولُ مقياسُ الطيفِ الماسحُ الاعتياديُّ طولاً موجياً واحداً في الوقتِ الواحدِ، رافضاً بذلك الأطوالَ الموجيةَ الأخرى. إنَّ رفضَ الطاقةِ يكفيءُ تماماً رفضَ المعلومات. وعلى خلافِ ذلكِ يتناولُ مقياسُ الطيفِ من محوِّلةِ فورييه كلَّ الطيفِ في وقتٍ واحدٍ، وهو أمرٌ نافعٌ حقاً حينما نحتاجُ إلى الحصولِ على الطيفِ خلالَ فترةٍ زمنيةٍ قصيرةٍ: فعلى سبيلِ المثالِ يمكنُ إنتاجَ طيفِ المسحِ في ثوانٍ بينما يستغرقُ إنتاجُ الأطيافِ ذاتِ التبيينِ العاليِ أكثرَ من دقيقةٍ أو دقيقتين. ولقد تمَّ الحصولُ من الأرضِ على أطيافِ كوكبِ الزهرة في ٧ دقائقَ باستخدامِ مقياسِ طيفِ ميكلسون التداخلي، بينما لم يمكنِ الحصولُ على النتيجةِ نفسها في أقلَّ من ٣٠ ساعةً باستخدامِ مقياسِ طيفِ المحزوزِ ونفسِ الكاشفِ الضوئيِّ.

٦. وكما ذكرنا سابقاً فإنَّ الكاشفَ في مقياسِ الطيفِ العاديِّ يمسحُ عنصراً واحداً لتبينه في الوقتِ الواحدِ؛ ولذا فإذا كانَ هنالك حـ عنصراً وَزَمَنُ مسحِ كُلِّ مقداره ز فإنَّ كلَّ عنصرٍ يُقاسُ خلالَ زمنٍ يبلغُ $\frac{Z}{H}$ فقط.

وهناك قاعدةٌ هامةٌ في «نظرية المعلومات» تنصُّ على أنَّ نسبةَ الإشارةِ إلى التشويشِ تزدادُ مع الزمنِ على نحوٍ مميزٍ: فالإشاراتُ هي عناصرُ الرسالةِ، وهي تكوّنُ ذلك الجزءَ من التواصلِ الذي ينشأ عن المصدرِ؛ أمّا التشويشُ فهو ذلك الجزءُ الذي يَدْخُلُ في التواصلِ وهو في طريقه إلى المستقبلِ. ففي معظمِ الرسائلِ تمتازُ الإشاراتُ والتشويشاتُ امتزاجاً وثيقاً بنسبٍ متغيرةٍ.

وفي الحالةِ قيدِ الاعتبارِ تتناسبُ الإشارةُ أو شدةُ العنصرِ طردياً مع الزمنِ الذي يُصَرَّفُ في مشاهدتها؛ أمّا التشويشُ الذي هو عشوائيٌّ، فيتناسبُ مع $\sqrt{Z}$ ، ولذا تكونُ نسبةُ

الإشارة إلى التشويش متناسبة مع $(\frac{z}{\lambda})^2$. وبمقياس طيف فورييه يسقط جميع الضوء الساقط على الكاشف بحيث يُرى كل عنصر يُرادُ تبينه طول الوقت مما ينتج عنه أن نسبة الإشارة إلى التشويش تزداد مع $\sqrt{z}$ حيث z زمن القياس؛ ومن ثم فإن مقياس طيف التداخل هو أفضل بعامل يبلغ $\sqrt{z}$ ، وهو عامل يُعرف بفائدة فِلجِت * advantage . Fellgett's

٧. لكاشفات طيف فورييه مجال زاوي أوسع بكثير، وهو أمر يستأثر بالاهتمام في المطيافية الفلكية؛ إذ يتسبب التلألؤ في هدر كمية جيدة من الطاقة. ومن المضار القليلة التي تنتج عن هذا الأمر، علاوة على الحاجة إلى معالجة معقدة للإشارات، هي أنه لا يمكن استخدام مبدأ فورييه لفصل الضوء إلى أطواله الموجية المختلفة أي لبناء فاصل موجي أحادي.

وخلاصة القول، فإن هنالك قليلاً من الشك في أن مطيافية محولة فورييه هي حقاً الطريقة الأكثر تفوقاً؛ غير أنه من الهام أن نتحقق من أن مطيافية فورييه ليست ببساطة تطبيقاً لاختراع بصري صغير. فهي حقاً تمثل منعطفاً فاصلاً في النظرية بعيداً عن المنظومات البصرية عالية الدقة والحساسية والغالية ليقترّب من المُحسّنات البسيطة Sensors قوية البنية التي تُربط مع أجهزة معالجة البيانات الإلكترونية المتطورة.

اقترحات لقراءات اضافية

P. Connes, "How Light is Analyzed," *Scientific American* 219 (Sep 1968), 72-82.

E. V. Loewenstein, "The History and Current Status of Fourier Transform Spectroscopy," *Applied Optics* 5 (1966), 845-54.

*Named after P. B. Fellgett who established this principle in his thesis, Cambridge University, 1951. *J. Physics Radium* 19 (1958), 187, 237.

* نسبة إلى ب. ب. فِلجِت P. B. Fellgett الذي توصّل إلى هذا المبدأ في أطروحته، جامعة كامبردج ١٩٥١، «مجلة فيزياء الراديوم J. Physics Radium»، ١٩ (١٩٥٨)، ١٨٧، ٢٣٧.

L. Mertz, *Transformations in Optics* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1965).

P. Jacquinot, "Interferometry and Grating Spectroscopy: an Introductory Survey," *Applied Optics* 8 (1969), 497-99.

J. E. Hoffman, Jr., "Real-Time Fourier Spectroscopy," *Applied Optics* 8 (1969), 323-27.

R. C. Jennison, *Fourier Transforms and Convolutions for the Experimentalist* (New York: Pergamon Press, 1961).

المسائل

١-١:٤ افترض أنَّ الاستضاءة الصفراء لتسلسلية من الأهداف على هيئة موجة مربعة هي ٤٠ لوكس. فإذا كانت الاستضاءة القصوى تزيد في درجات بمقدار ٢٠٪ أي ٤٨، ٥٧، ٦٠ لوكس...، فبيِّن كيف تزيد المغايرة. احسب المغايرة لعشر درجات. ما الاستنتاج الذي تستخلصه؟

٢-١:٤ ارسم عدداً من المسجلات التداخلية الافتراضية (الشدة في مقابل فارق المسار البصري) والأطياف المقابلة لها التي يمكن الحصول عليها من تحويل فورييه.

٣-١:٤ استخدم مقياس طيف فورييه من نوع ميكلسون لتحليل ضوء الصوديوم الأصفر. ما السرعة التي ينبغي أن تتحرك بها المرآة لتعديل التيار الضوئي الناتج علماً أن تواتره يبلغ ٥ كيلوهرتز؟

٤-١:٤ أي ضوء يمكن تحليله تحليلًا أصحَّ باستخدام كاشف طيف من نوع فورييه: الضوء من خط طيفي رفيع أو الضوء من خط أعرض، آخذًا بعين الاعتبار المسافة المحدودة المتاحة لحركة المرآة في مقياس تداخل ميكلسون؟

٥-١:٤ تخيل أن إحدى مرآتي مقياس تداخل ميكلسون مثبتة في كرة بندول.

وبحسب المعادلة $d = 2\sqrt{\frac{L}{g}}$ فإن زمن الدورة لبندول طوله L ثابت ولا

يعتمد على سعته (ضمن حدود معنية)؛ ولذلك فإن سرعة المرآة عند مرورها في

منتصف المسافة تتغير مع السعة. فإذا كان طول البندول ٢٠ سم فجد السعة الزاوية اللازمة للحصول على سرعة ٦٣ سم/ث.

٦-١:٤ جد تواتر التعديل اللازم للتيار الضوئي الناتج عن ضوء أحادي اللون طوله الموجي ٦٣٣ نم باستخدام الترتيب الموصف في المسألة السابقة.

٧-١:٤ عَيِّنْ لُضوء طوله الموجي ٦٢٠ نم: أ) العدَدَ الموجي الخطِّي ب) عَرْضَ النطاق الموجي بَوُحْدَاتِ الطول الموجي وذلك لمقياس طيف يعطي تبييناً مقداره ٠,٤ سم^{-١}.

٨-١:٤ إذا وُضِعَ موشوران متشابهان في مَسَارَيْنِ مقياسٍ تداخل ميكلسون وعُدَّلا للاستخدام في مطيافية محولة فورييه، وإذا أميلت المرآتان أيضاً بصورة صحيحة للإبقاء على طولَين متساويين للمسار، فَبَيِّنْ كيف تختلف النتائج في هذه الحالة عن النتائج التي يُحَصَّلُ عليها في مقياسٍ تداخل ميكلسون.

الفصل ٤ : ٢

دوال النقل

Transfer Functions

يعرّف نقل المعلومات عموماً بأنه توصيل البيانات أو بثّها. ويشمل نقل المعلومات وصف معالجة المعلومات وبثّها عبر المنظومات المختلفة والقنوات والأوساط؛ وتُسمى تجمّعات المعلومات رسالة. وفي البصريّات تكون الرسالة غالباً صورة.

يعبر عن قدر المعلومات في دقيقة المعلومات (بت bit) برقم في النظام العددي الثنائي. وفي البصريّات يمكن نقل عدد أكبر من دقائق المعلومات في الوحدة الزمنية مما يُنقل بالسبل الراديوية، ويعزى ذلك إلى أن تواتر الضوء قد يصل إلى قيمة عالية تبلغ 10^{10} هرتز. ومن غير الضروري أن يكون للحادث علاقة بالزمن: كحادث تصادم سيارتين أو مرض شخص ما. ويعني لفظ الحادث ببساطة في نظرية المعلومات موقفاً معيناً ربّما يكون مستقلاً عن الزمن مثل الشخص مريض والمسافة من أ إلى ب هي ٤ كم.. الخ؛ أما لفظ التواتر فله معانٍ متعددة تبعاً لاستخدامه في إشارة كهربائية أو إشارة ضوئية؛ ويُقصد بالتواتر الزمني عند استخدامه في دائرة كهربائية وفي انتشار الضوء وحركته الموجية، أما في معالجة البيانات البصرية فالتواتر تواتر مكاني.

والأخطاء على نوعين: الأول يسمى الإنذار الخطائي وهو ما يعطي إشارة مخرجة في غياب إشارة مُدخلة، والثاني الخطأ الفائت miss الذي لا يُعطي إشارة مخرجة في حضور إشارة مدخلة بالفعل.

وتُعنى نظرية المعلومات بالبنية الشكلية للإشارات المبثوثة: فهي تُعنى بتحليل درجة الارتباط بين الإشارات المبثوثة والمستقبلية والتنبؤ بها وتقدير الواحدة من الأخرى، ولا تُعنى نظرية المعلومات بمحتويات الرسالة أو بتأثيرها على مستقبلها؛ فليس يهم أن تكون

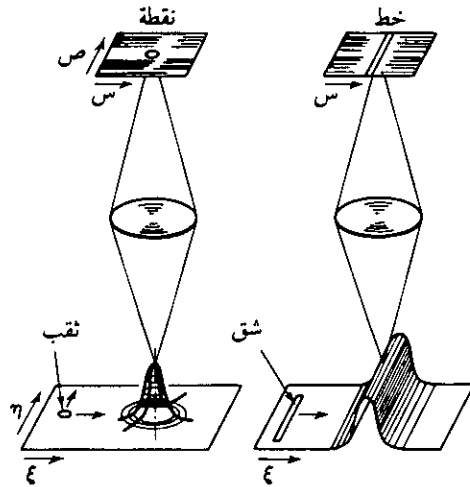
الرسالة جيدة أو سيئة أو أنها تراكم عشوائي من الأعداد؛ فقيمة المعلومات نسبية كلية، تماماً كما تُقرأ فقرة معلومات في جريدة باهتمام من بعض القراء ومن دون عناية من قراء آخرين.

وقد اعتبرت الأخطاء في السابق تشويشاً يمكن تجاهله نظرياً وإهماله عملياً؛ إلا أن الفيزياء الحديثة قد أظهرت خلاف ذلك: فالأخطاء حقيقة لا يمكن تصغيرها كما يشاء المرء، وإنما ينبغي أن تؤخذ بعين الاعتبار كجزء متكامل من النظرية (نظرية المعلومات).

دوال النشر Spread Functions

دوال النشر النقطي ودوال النشر الخطي

افترض أن لدينا عدسة تُكوّن صورة لمصدر نقطي مضيء مثل ثقب. ومن النظرية الموجية نعرف أن الصورة المتكونة للمصدر النقطي لا تكون نقطة؛ ذلك أن الحيود من فتحة العدسة والزوغانات والتشتت تتسبب حقيقة في جعل الصورة تمتد إلى بقعة منتشرة أو تتوزع توزيعاً مثل توزيع جاوس Gauss. ويمكن تصور هذه البقعة عند رسمها بإحداثيات ثلاثية مثل كومة من الضوء (الشكل ١ - إلى اليسار).

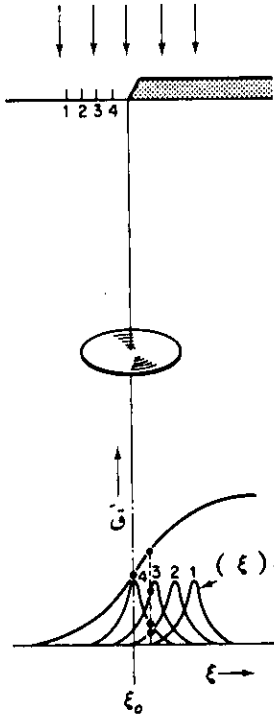


الشكل ١: دالة النشر النقطي (إلى اليسار) ودالة النشر الخطي (إلى اليمين) [من ر. ل. لامبرتس R. Lamberts، ج. هيجنز G. Higgins، و. ر. ن. وُلّف R. Wolfe، مجلة الجمعية البصرية الأمريكية]

J. Opt. Soc. Am. ٤٨ (١٩٥٨)، ٤٨٧؛ استنسخت بأذن.

وإذا كان (س، ص) هما إحداثيا نقطة في مستوى الجسم فإن (η ، ξ) هما الإحداثيان المترافقان في مستوى الصورة، وَيُسَمَّى توزيع الطاقة في مستوى الصورة بدالة النشر النقطي ق (η ، ξ). ويمكن تجريبياً تعيين دالة النشر النقطي بالمسح أي بتحريك الثقب والكاشف الضوئي عبر الكومة التي هي عبارة عن نمط محدود ثنائي البعد.

وعند اختزال العملية إلى بعد واحد، فإن الجسم يمكن أن يكون خطأ أو شقاً؛ ومن ثم تكون الصورة كومة مستطيلة يمكن مقارنتها رُبما بأسطوانة مقطوعة إلى نصفين. ويلزم الآن أن يُزاح الشق الماسح في بعد واحد فقط؛ فهذا الأمر يجعل عملية المسح أسهل وأكثر دقة لأن التأرجحات المحلية يلغى بعضها بعضاً مما يتيح للكاشف أن يتعرض إلى قدرة أكبر. وتكون النتيجة دالة النشر الخطي ق (ξ) المبينة في الشكل ١ (إلى اليمين).



وتتطلب دالة النشر النقطي متغيرين: η ، ξ ، أما دالة النشر الخطي فتوصف وصفاً كافياً بمتغير واحد ξ . إن دالة النشر الخطي في البعد ξ هي تكاملياً integral دالة النشر النقطي عند تكاملها على المتغير η :

$$Q(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} q(\eta, \xi) d\eta \quad (1-2:4)$$

ولأن معظم العدسات تماثلاً دورانياً، فإن دوال النشر الخطي تكفي لوصف خصائص الصورة قرب المحور.

دوال النشر المولفة Composite Spread functions

إن دوال النشر هي الوحدات الأولية التي تبنى منها الصورة. وتصف دالة النشر في صورتها البسيطة صورة نقطة منفردة أو خط منفرد؛ ونستطيع وصف جسم أكثر تعقيداً يتألف من نقاط عديدة تُصدر ضوءاً غير متحالف بإضافة جميع دوال النشر للنقاط جميعها.

خذ مثلاً نصف مستوي كما هو مبين في الشكل ٢؛ إننا نتصور الجسم على أنه قُسم إلى شرائح عديدة رفيعة؛ ويظهر إلى يسار الطرف الحاد أربع من هذه الشرائح. ومن ثم يمكن حساب السطوعية ق بدلالة متغير الموقع ξ بجمع دوال النشر الخطية الأولية:-

الشكل ٢: السطوعية كمجموع دوال النشر الخطية الأولية [من ر. لامبرتس، ج. هجنز، و. ن. ولف، مجلة الجمعية البصرية الأمريكية ٤٨ (١٩٥٨) ٤٨٨، استنسخت باذن.]

$$[2-2:4] \quad \left. \begin{matrix} \text{ق}(\xi) \\ \text{د}(\xi) \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} \text{ق}(\xi) \\ \text{د}(\xi) \end{matrix} \quad \dots\dots$$

إنَّ الحدَّ العلوي للتكامل أعلاه هو الموقع الهندسي ξ . للظل، أما الحد السفلي فهو $-\infty$ ، ذلك لأنَّ دالة النشر الخطية تمتدُّ بغير انتظامٍ إلى ما لا نهاية. وعددٍاً يمكنُ اعتبارُ الحدِّ السفلي تلك القيمة ξ التي تكون قيمة الشدة عندها ذات أهمية عملية. فعلى سبيل المثال فإنَّ قيمة السطوعية $\text{ق}(\xi)$ التي تقابلُ القيمة ξ_1 يُحصَلُ عليها بجمع الإسهامات من دوالِّ النشر الفردية $\text{ق}(\xi)$ الناشئة من عناصر الجسم ١، ٢، ٣، ٤. وللنقطة ξ_1 تسهم العناصر ٤، ٣، ٢ في المجموع بينما لا يسهم العنصر ١. وباختصارٍ، فإنَّ توزيع السطوعية في الصورة هو توزيع مجموع دوالِّ النشر الأولية.

ويعيَّن توزيع السطوعية تجريبياً بالمسح؛ ويلاحظُ من المعادلة [2-2:4] أنَّ توزيع السطوعية هو تكامليُّ دوالِّ النشر الأولية، ولذا فلا بُدَّ من أن يكونَ عكسُ ذلك صحيحاً، أيُّ أنَّ دالة النشر ينبغي أن تكونَ مشتقة الرسم المقياسي للكثافة $\text{ق}(\xi)$:-

$$[3-2:4] \quad \text{د}(\xi) = \frac{\text{ق}(\xi)}{\text{د}(\xi)} \quad \dots\dots$$

والمشتقة $\frac{\text{د}(\xi)}{\text{د}(\xi)}$ هي حقاً وببساطة ميلُ المنحنى الماسح عند النقطة ξ ؛ وهذا يعني أنَّ رسمَ الميل في مقابلِ الموقع ξ في مستوى الصورة يُعطي دالة النشر للعدسة عندما يكونُ المنحنى الماسح قد عُيِّن تجريبياً.

المغايرة Contrast

افترض أنَّ لدينا عدسة تُستخدَم لتكوين صورةٍ لجسم يتألف من قضيبين أبيضين موضوعين على أرضية سوداء؛ فوفقَ معيارِ ريلي (الفصل ٣:٢) يعتمدُ تبيينُ الصورة على الطول الموجي للضوء وعلى قُطرِ فتحة العدسة؛ ومهما يكنُ فإنَّ ذلك يتضمَّنُ أنَّ الجسم يُرى بمغايرةٍ عاليةٍ مثل خطوطٍ بيضاء ساطعةٍ على أرضية سوداء غامقةٍ أو بالعكس.

فما الذي يحدث لو كانت الخطوط مجرد خطوط رمادية تُرى على أرضية رمادية غامقة قليلاً؟ فَبَحَسِبَ معيار ريلي، فَإِنَّ النتيجة العددية واحدة؛ ومع هذا فنحن نعرف من الخبرة أَنَّ الخطين اللذين لهما مغايرة منخفضة سيندجان بسهولة أكثر في خط واحد مقارنةً مع خطين مغايرتهما عاليةً والمسافة الفاصلة بينهما هي نفس المسافة في الحالة السابقة؛ فالمغايرة العالية قد تعني أنه يمكن تبيين خطين لا يمكن تبيينهما بمغايرة منخفضة. ومن الواضح أَنَّ هنالك عوامل أخرى إلى جانب الطول الموجي والفتحة تؤثر في قدرة العدسة على تبيين خطين وتحد منها عادة: فعلى سبيل المثال خذ الضباب الجوي بين الجسم والصورة والزوغانات وعدم إتقان صقل العدسة والخدوش على السطح أو آثار الأصابع؛ فمثل هذه العوامل تؤثر بكل تأكيد في القدرة على التبيين أيضاً، ولذا يلزم أَنْ ندخل المغايرة حيثما وُجدت في تقديراتنا للتبيين.

وكما رأينا تُعطى المغايرة بالمعادلة التالية:-

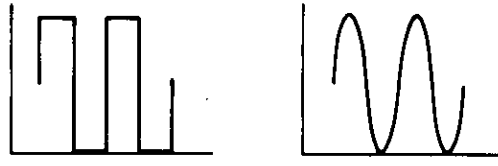
$$[4-2:4] \quad \gamma = \frac{\text{ش ق} - \text{ش ص}}{\text{ش ق} + \text{ش ص}} \dots\dots$$

وفي حالة كون الأرضية سوداء تماماً، فَإِنَّ:-

$$[5-2:4] \quad \gamma = \frac{\text{ش ق} - 0}{\text{ش ق} + 0} \dots\dots 1$$

وهذه القيمة هي أعلى قيمة ممكنة للمغايرة. وإذا كانت القضبان والمسافات مجرد ظلال رمادية، فَإِنَّ المغايرة تقل؛ وتحدث المغايرة الأقل عندما $\text{ش ق} = \text{ش ص}$ إذ تبلغ المغايرة γ في هذه الحالة القيمة صفر. وباختصار تتغير المغايرة من صفر إلى 1 ($1 \geq \gamma \geq 0$).

وفي الغالب يتألف الهدف من قضبان بيضاء أو سوداء كليةً موضوعة على أرضية ذات لون مغاير، ويسمى مثل هذا الهدف بهدف الموجة المربعة (الشكل ٣ - الى اليسار)؛ غير أَنَّ الأهداف ذات التوزيع الجيبي للشدة تُفَضَّلُ عليها كثيراً لأسباب ستبحث قريباً (الشكل ٣ - الى اليمين).



الشكل ٣: توزيع الشدة في مشبك في شكل موجة مربعة (الى اليسار) وفي مشبك مثل موجة الجيب (الى اليمين).

نقل المغايرة Contrast Transfer

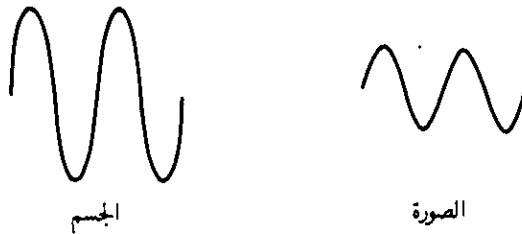
من الواضح أننا لا نهتم كثيراً بتوزيع الشدة في الجسم أو الصورة من حيث هو توزيع في حد ذاته؛ وإنما نهتم به لتحديد مقدار المغايرة التي يمكن نقلها من الجسم إلى الصورة. ولذا، فللاشارة إلى أداء العدسة. يلزمنا معرفة نقل المغايرة بالإضافة إلى قدرة التبين. ويعبر عن عامل النقل أو عامل التعديل t transfer or modulation بنسبة مغايرة الصورة إلى مغايرة الجسم :-

$$t = \frac{\gamma_{\text{صورة}}}{\gamma_{\text{جسم}}} \dots\dots [4:2-6]$$

وفي الشكل ٤، على سبيل المثال، تبلغ مغايرة الصورة نصف مغايرة الجسم، أي أن :-

$$t = \frac{1}{2}؛ \text{ لكن عامل النقل هو دالة التواتر المكاني } \gamma_m \text{ ولذا فإن :-}$$

$$t = c(\gamma_m).$$



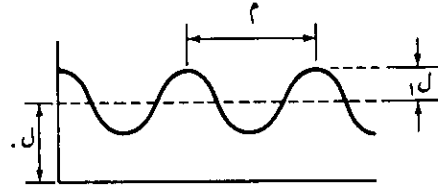
الشكل ٤: رسومات قياس الكثافة التي تبين مغايرة الجسم المرتفعة (الى اليسار) ومغايرة الصورة المنخفضة (الى اليمين).

مثال: في الرسم الفني للخطوط يمكن على سبيل المثال أن تكون الخطوط رُفِعة جداً إلى درجة أن أربعة منها مع المسافات بينها تَغْطِي ١ مم. ففي هذه الحالة يبلغ التواتر المكاني ٧ م = ٤ مم-١؛ وإذا ما غَطَى المسافة ١ مم ١٠٠٠ خط فإن التواتر المكاني ٧ م يبلغ ١٠٠٠ مم-١. وإذا كان عرض القضيب الواحد ١ سم فإن ٧ م = ٠,٠٥ مم-١؛ ويمكن أيضاً أن يعبر عن التواتر المكاني بعدد الخطوط لكل وحدة من وحدات الزاوية.

وإذا كانت شدة الهدف ذات توزيع جيبي أو جيب تامي، فإن السطوعية قد تتغير على النحو التالي:-

$$Q(\xi) = L + L' \cos 2\pi \xi \quad \dots\dots [7-2:4]$$

حيث L هي معدل اللمعانية، L' هي نصف التغير الكلي لللمعانية أو سعتها (الشكل ٥). وتُفَضَّل الأهداف ذات توزيع الشدة الجيبي لأنها لا تُحَيِّد الضوء إلا إلى مدى النهايتين العظميين من الرتبة الأولى.



الشكل ٥: اشتقاق دالة عامل النقل.

ومن ناحية أساسية، إن دالة توزيع شدة الجسم هي $J(\xi)$. ولكن بأخذ أية ازاحة بين الإحداثيين في مستوى الجسم ومستوى الصورة، فإن دالة توزيع شدة الجسم تُصَبِّح $J(\xi - \xi')$. ويسمى حاصل ضرب دالتين ثم حساب تكامل الضرب عبر كل النقاط (في بعد واحد) بالثنائي Convolution:-

$$Q(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} J(\xi - \xi') J(\xi') d\xi' \quad \dots\dots [8-2:4]$$

ويعطي هذا التكامل لمعانية الصورة عند النقطة ξ . وبتضمين المعادلة [7-2:4] في المعادلة (8-2:4) نحصل على:-

$$ق(س) = ل. \left[ق(ع) د(ع) + ل. \left[ق(ع) جتا ٢ ط ٧ \right] \right]$$

$$[٩-٢:٤] \quad (س-ع). د(ع) \dots\dots$$

وإذا كانت المساحة تحت دالة النشر المتمثلة بالتكامل الأول في المعادلة [٩-٢:٤] تُساوي الوَحْدَة، فإنَّ توزيع الضوء في الصورة يصبحُ :-

$$ق(س) = ل. + ل. ق جتا ٢ ط ٧ م س +$$

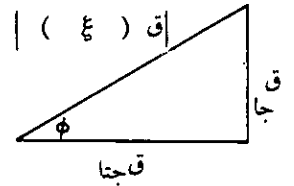
$$[١٠-٢:٤] \quad ل. ق جتا ٢ ط ٧ م س \dots\dots$$

حيث البارامتر الأول ق جتا والبارامتر الثاني ق جتا لهما على الترتيب مُحولتا فورييه جيب التمامية والجيبية لدالة النشر الخطية ق(ع) على النحو التالي :-

$$[١١-٢:٤] \quad ق جتا (٧ م) = \left[ق(ع) جتا ٢ ط ٧ م د(ع) \dots\dots \right]$$

$$[١٢-٢:٤] \quad ق جتا (٧ م) = \left[ق(ع) جتا ٢ ط ٧ م د(ع) \dots\dots \right]$$

ولما كانت المعادلتان [١١-٢:٤]، [١٢-٢:٤] على الترتيب لهما جيب تمام وجيب متغير منفرد ٧ فإنه يمكنُ رسمُهما مثل متجهين متعامدين كما في الشكل ٦. ان المتجة المحصلة |ق(ع)| هو وتر المثلث، ومن ثَمَّ فإنَّ مقداره من نظرية فيثاغورس هو:-



$$[١٣-٢:٤] \quad |ق(ع)| = \sqrt{ق جتا^٢ + ق جتا^٢} \dots\dots$$

الشكل ٦: جمع محولتي فورييه جيب التمامية والجيبية (ق جتا، ق جتا) بياناً للحصول على استجابة الموجة الجيبية ق(ع).

وتسمى الكمية |ق(ع)| دالة استجابة الموجة الجيبية sine-wave response للهدف الجيبي كما في المثالي الحالي. وتمثل هذه الكمية التغير في السطوعية النسبية لنقاط الصورة. وبضَمِّ المعادلات [١٢-٢:٤، ١١-٢:٤، ٦-٢:٤] وكتابتها بالصيغة الأسية نحصلُ على :-

$$ت (\gamma) = \left[\frac{1}{\gamma} \right]_{-\infty}^{+\infty} \text{ ق (} \xi \text{) و } \gamma = 2 \text{ ط } \gamma \text{ و } \xi = 2 \text{ ط } \gamma \text{ د. } \dots [14-2:4]$$

حيث ت (γ) هي دالة نقل المغايرة أو نقل التعديل (د.ن.ت) (MTF) modulation Transfer function .

دالة نقل الطور Phase Transfer Function

لقد بحثنا إلى الآن دالة نقل التعديل ت (γ) ، وننتقل الآن إلى نقل الطور. دعنا نسمِّ الزاوية بين | ق (ξ) | و ق ج في الشكل ٦ الزاوية ϕ ؛ ومن ثم يمكننا كتابة محولتي فورييه جيب التمامية والجيبية على النحو التالي:-

$$\text{ق ج} = | \text{ق (} \xi \text{) } | \text{ ج} \phi ، \text{ ق ج} = | \text{ق (} \xi \text{) } | \text{ ج} \phi \dots [15-2:4]$$

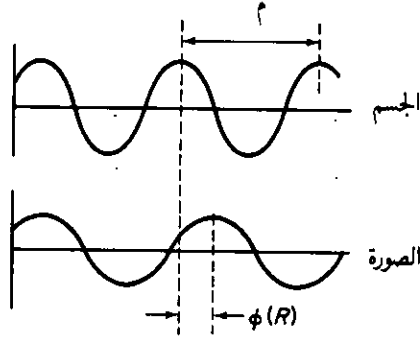
ومن ثمَّ يصبحُ توزيعُ السطوعية في الصورة أي المعادلة ١٠-٢:٤ كما يلي:-

$$\text{ق (س) = ل. ل. + ل. ق (} \xi \text{) ج} \phi \text{ و } \gamma = 2 \text{ ط } \gamma \text{ س - } \phi \dots [16-2:4]$$

وتسمى ϕ زاوية الطور بين الجسم وصوريه. وطالما كانت دالة النشر متماثلة فإن ϕ تتلاشى؛ إلا أنَّ هذا لا يحدث بالضرورة في بعض الحالات كحالة الزوجان غير المحورية.

ان نقل الطور هو عبارة عن إزاحة عناصر دالة النشر بالنسبة إلى الموقع الذي ينبغي أن تكون فيه من وجهة البصريات الهندسية (الشكل ٧)؛ وكما في نقل التعديل فإنَّ نقل الطور هو دالة تعتمد على التواتر المكاني أي ϕ (γ) . وبدلالة المتغيرات المركبة، يكون فارق الطور بين الجسم والصورة هو الإزاحة الزاوية؛ ومن ثمَّ فإنَّ الدالة المركبة هي:-

$$د (\gamma) = ت (\gamma) \text{ و } \phi (\gamma) \dots [17-2:4]$$



الشكل ٧: إزاحة الطور في الصورة (الرسم السفلي) نسبة إلى الجسم (الرسم العلوي)؛ $m =$ التواتر المكاني، $\phi =$ إزاحة الطور.

حيث $D(m)$ هي دالة النقل الضوئي (OTF) (د.ن.ض.). وتلخيصاً لما سبق، يمكن إيجاد دالة النقل الضوئي مباشرة من محولتي فورييه لشدتي الجسم والصورة؛ وقد يكون للجسم على سبيل التبسيط حدوداً فاصلة دقيقة بين المساحات البيضاء والسوداء: كل حيد منها يمثل دالة درجية step function، إما مكانية أو زمانية عند المسح. وبأخذ المشتقة ثم بإجراء تحويل فورييه نحصل على دالة النقل: فإذا كانت ش (س) هي شدة الجسم، $Q(\xi)$ هي سطوعية الصورة فإن محولتي فورييه هما:-

$$\text{ش (س)} = \left[\text{ب (م)} \right] \text{ و } \text{ط}^2 \text{ م}^2 \text{ س} \text{ د م}^2 \text{} \quad [18-2:4]$$

$$\text{ق (}\xi\text{)} = \left[\text{ب (م)} \right] \text{ و } \text{ط}^2 \text{ م}^2 \text{ ق} \text{ د م}^2 \text{} \quad [19-2:4]$$

وبأخذ نسبة ب (م) إلى ب (م) اللذين هما محولتا فورييه للشدة والسطوعية على التوالي نحصل مباشرة على دالة النقل الضوئي:-

$$\text{ب (م)} = \frac{\text{ب (م)}}{\text{ب (م)}} \text{ د م}^2 \text{} \quad [20-2:4]$$

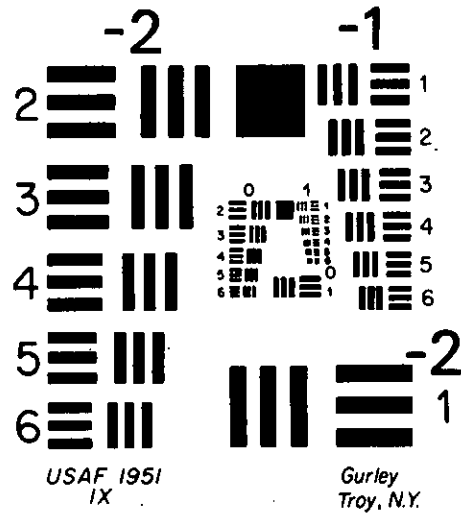
وقد اكتشف هذه العلاقة الهامة دوفييه عام ١٩٤٦.

*P. M. Duffieux, *L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique*. Université de Besançon. Oberthurn, Rennes (1946).

تعيين دوال النقل تجريبياً

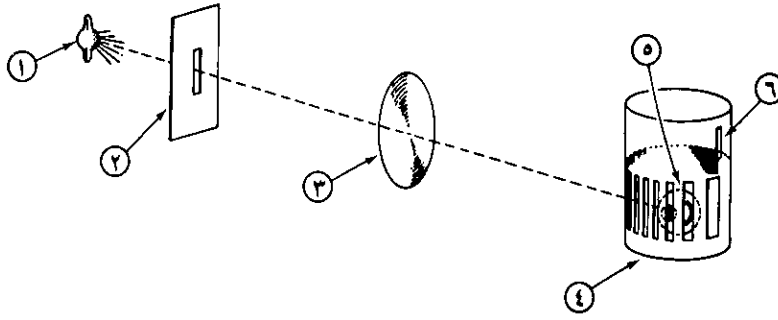
لا تقتصر دوال النقل على فحص العدسات؛ فهي تنطبق على منظومات بصرية كاملة وعلى أية أجزاء تحتويها هذه المنظومات أو تتأثر بها؛ ويمكن استخدامها لفحص المرايا المستوية والمتقوسة والتلسكوبات والميكروسكوبات وكل أنواع الأدوات البصرية من ناحية عملية، كما يمكن تطبيقها على المستحلبات الفوتوغرافية بشيء من التقييد نظراً لكون استجابتها غير خطية وكذلك على الحزم الليفية والمنظومات التلفازية؛ وباختصار يمكن تطبيقها على أية وسيلة من وسائل نقل المعلومات واسترجاعها.

وفي أبسط صورة لها، يكون الهدف عبارة عن لوحة سوداء-بيضاء ذات حدود حادة فاصلة بين العناصر المختلفة ذات الأبعاد المختلفة، أي التي لها تواترات مكانية مختلفة؛ ومن الأمثلة التي تستخدم غالباً لوحة الفحص ١٩٥١ لقوة الطيران الأمريكية المبينة في الشكل ٨، وهذه اللوحة عملية للمراجعات الرتيبة إلا أنها صعبة لغرض التقويم الكمي.



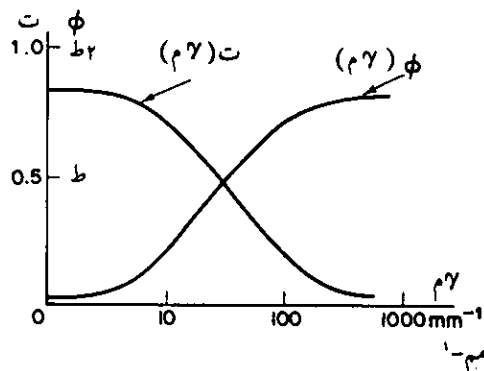
الشكل ٨: لوحة فحص سلاح الطيران الأمريكي.

ويُسَهَّلُ التقويم الذي يقوم على القراءة الكهروضوئية كثيراً بترتيب القضبان ترتيباً خطياً في اتجاه واحد وبشكل متواز كما في مُشْبِك رونشي. ويسمى الهدف مشبك فوكو أو هدف سانس Sayce target في حالة كون القضبان ذات عرض متغير أيضاً أو ذات تواتر مكاني.



الشكل ٩: أترتيب التجريبي لقياس دوال النقل: (١) مصدر ضوئي، (٢) شق، (٣) العدسة المفحوصة، (٤) الاسطوانة الدائرية، (٥) كاشف ضوئي، و (٦) علامة مرجعية لتعيين دالة نقل الطور.

متغير. وتستخدم هذه الأهداف على نطاق واسع ولا سيما عند تصنيفها في شكل أسطوانة كما في الشكل ٩؛ إذ توضع الاسطوانة عند إحدى نهايتي المسار إما قريباً من المصدر الضوئي باستخدام شق رفيع في مستوى الصورة المترافق وإما عكس ذلك كما هو مبين في الشكل. وبدوران الأسطوانة تتقطع حزمة الضوء دورياً. وتحت ظروف مثالية وبدالة نشر ضيقة للعدسة، تتألف الإشارة الكهروضوئية الناتجة من متسلسلة من النبضات الموجية المربعة. لكن إذا تسببت الزوغانات العدسية أو الضباب أو أية اضطرابات هوائية في نشر الضوء فإن النبضات الناتجة لا تعود مربعة وإنما مدورة. وفي الحقيقة قد تختفي كلية النبضات الرفيعة ذات التواتر المكاني العالي. وبمسح الصورة نحصل على مغايرة الصورة (٧ ص) مقابل γ ، كذلك نحصل بطريقة مماثلة على γ مقابل γ . وبأخذ النسبة بينهما نحصل على $t(\gamma)$ الذي يمثل أحد المنحنيين في الشكل ١٠. وتعتبر دالة نقل الطور $\phi(\gamma)$ غالباً أنها متممة الدالة $t(\gamma)$.



الشكل ١٠: دالة نقل التعديل $t(\gamma)$ ودالة نقل الطور $\phi(\gamma)$.

ومن ناحية مبدئية، يمكن تعيين دالة نقل الطور باستخدام علامة مرجعية إضافية تُعمل في الأسطوانة المشار إليها في الشكل ٩؛ ثم تقارن مواقع حقيقية مختارة في رسم الصورة بالمواقع التي ينبغي أن تكون لها من ناحية هندسية. وهناك طرائق أكثر تقدماً لقياس بيانات الطور أُشير إليها في أدبيات الموضوع.*

ذكرنا سابقاً أن توزيعات الشدة الجيبية تُفضّل كثيراً على التوزيعات التي تشبه الموجات المربعة، ولكن يصعب صنع المشبكات ذات الكثافة المتغيرة جيبياً، ومع هذا يمكن على سبيل المثال إسقاط الضوء عبر مرشحتي استقطاب، إحداهما تدور حول المحور البصري، وتجعلان الضوء يسقط على شق رفيع، وإذا ما كان هنالك فيلم فوتوغرافي يتحرك خلف الشق فإننا نحصل على نمط متغير في كثافته.

ومن الأسهل كثيراً أن ننتج عوضاً من ذلك أنماطاً ذات توزيع مساحي متغير جيبياً: فيه مساحات شفافة أو معتمّة من دون أي تدرج بين الشفافة والمعتمّة؛ فمثل هذه الانماط تستنسخ بسهولة. كذلك يمكن استخدامها في حد ذاتها مع شق طويل يدمج العناصر البيضاء والسوداء معطياً بذلك نفاذية الضوء المتغيرة المرغوب فيها، أو يمكن استخدامها أو تصويرها أولاً بوساطة البصريّات الأسطوانية لتعطي بصورة مماثلة فيلماً ذا كثافة متغيرة.*

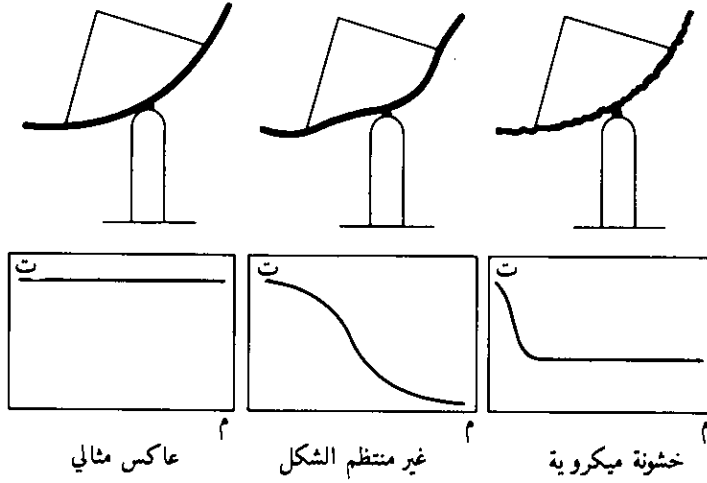
ومن النافع غالباً تعيين السعة المساوية لتغيرات الاستضاءة في الصورة، وتعرّف السعة المساوية normalized amplitude بأنها سعة التغيرات في الاستضاءة مقسومة على متوسط الاستضاءة، مما يجعل السعة مستقلة عن قيم الاستضاءة المطلقة. ثم ترسم السعة المساوية مقابل التواتر المكاني للحصول على دالة الاستجابة الجيبية للمنظومة. وباستخدام الأدوات نفسها وبشق رفيع بدل نمط الفحص ثنائي البعد، فإن المسجل يقوم برسم دالة نشر العدسة.

تطبيقات

للسطح العاكس غالباً نوعان من العيوب يؤثران في نوعية الصورة، وهما:

*R. L. Lamberts, "Relationship between the Sine-Wave Response and the Distribution of Energy in the Optical Image of a Line," *J. Opt. Soc. Am.* 48 (1958), 490-95. R. R. Shannon and A. H. Newman, "An Instrument for Measurement of the Optical Transfer Function," *Applied Optics* 2 (1963), 365-69.

(١) الزوغانات، الحيود عند الثقب، والشَّيْح (٢) الخشونة الميكروية. ويؤثر هذان البازامتران تأثيراً مختلفاً في نقل المغايرة والمعلومات عموماً. دعنا ننظر إلى هوائي (antenna) كبير في شكل صحن كالذي يستخدم في علم الفلك الراديوي؛ فالسطح المتقن الشكل سينقل المعلومات بمغايرة عالية لكل التواترات المكانية حتى التواترات العالية (الشكل ١١ الى اليسار)؛ أما إذا كان الهوائي مُشوهاً كما في الرسم في الوسط فإنه ينقل الطاقة، إلا أنَّ

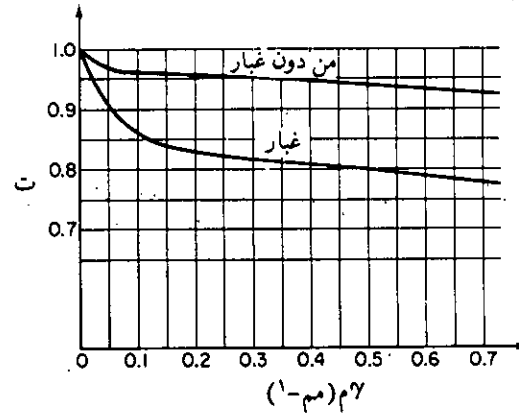


الشكل ١١: تمثيل تخطيطي لصحن هوائي راديوي ذي شكل تام (الى اليسار)، وبعيوب مختلفة (الوسط واليمين).

قدرته على التبيين تكون محدودة إلى حد كبير. ويعني هذا أنَّ التفصيلات الدقيقة في الجسم (التواترات المكانية العالية) تتأثر بذلك أكثر من غيرها. وفي المثال الثالث افترض أنَّ الجسم يحتوي على تواترات عالية، وهذه التواترات العالية تسقط على السطح في شكل عناصر فورييه الكبيرة؛ ولذا تنعكس كُلُّ من هذه العناصر المنفردة عن المساحات الكبيرة التي تلتقي فيها عدم الانتظامات (الطفيفة) من ناحية إحصائية، ممَّا يجعل المغايرة الكلية للصورة أقل، ومع هذا فإنَّ التواترات العالية لا تتأثر انتقائياً كما في المثال السابق. وباختصار، فحتى السطح الخشن يُعطي مغايرة جيدة، ويظهر تأثيره بصورة أساسية في خفض الشدة.

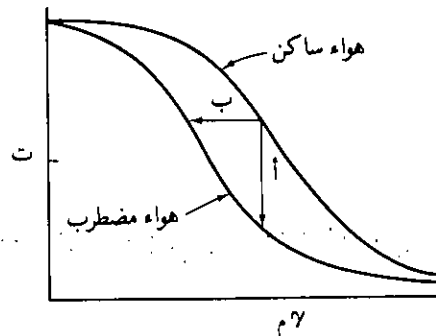
ويشبه تأثير دقائق الغبار على سطح العدسة التأثير السابق؛ فكما يوضح الشكل ١٢ فهناك نقصان عام في المغيرة من دون أن يصحبه تأثير انتقائي في التواترات المكانية العالية. وعند أخذ الصور أو المشاهدات من «هوائي الاستطلاع» aerial reconnaissance في الهواء المضطرب، وجب ضرب دالة النقل للجو في دالة النقل للمنظومة البصرية وللمستحلب الفوتوغرافي في حالة استخدامه (الشكل ١٣). وقد يتضمن هذا الاجراء التضمنات العملية التالية:-

(١) إذا كانت التفصيلات على سطح الأرض ذات مغيرة عالية، فإن تفصيلات التواتر نفسه يمكن تبيينها في الهواء الهادىء وفي الطقس المضطرب؛ إلا أن المغيرة تنخفض وحدها دون غيرها (السهم أ)؛ (٢) ومن ناحية ثانية إذا كانت التفصيلات ذات مغيرة منخفضة كالاجسام الموهية، فلا يمكن التعرف إلا إلى الأجسام ذات التواتر المكاني المنخفض (التفصيلات الكبيرة، السهم ب). وفي التطبيق العملي يتداخل التأثيران الامر الذي يفرض التوفيق بين الحالتين.



الشكل ١٢: دالة نقل التعديل لعدسة نظيفة (المنحنى العلوي) ولعدسة مشابهة يعلوها الغبار (المنحنى السفلي).

استنسخت بإذن من: E. Diederichs, "Optische Übertragungstheorie angewandt auf die Oberflächengüte," Jos. Schneider & Co., Optische Werke, Hausmitteilungen 13, 7/8, 82. 1961.



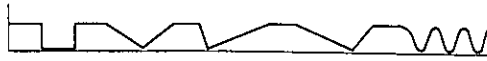
الشكل ١٣: نقل التعديل عبر الهواء الهادىء والهواء المضطرب.

اقتراحات لقراءات اضافية

- F. H. Perrin, "Methods of Appraising Photographic System. Part I—Historical Review," *J. Soc. Motion Pict. Television Engrs.* **69** (1960), 151-56; "Part II—Manipulation and Significance of the Sine-Wave Response Function," *ibid.* **69** (1960), 239-49.
- F. D. Smith, "Optical Image Evaluation and the Transfer Function," *Applied Optics* **2** (1963), 335-50.
- R. L. Lamberts, G. C. Higgins, and R. N. Wolfe, "Measurement and Analysis of the Distribution of Energy in Optical Images," *J. Opt. Soc. Am.* **48** (1958), 487-90.
- J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1968).

المسائل

- ٤: ٢-١ يبلغ قطر دقيقة معلومات في فيلم فوتوغرافي 10×3 مم؛ فإذا جمعت هذه الدقائق مضغوطة في نمط متعامد بحيث تلمس كل دقيقة أربع دقائق أخرى، وإذا أمكن مسح الدقيقة الواحدة في فترة زمنية تبلغ 10^{-2} ثانية: (أ) فجد عدد الدقائق في فيلم طوله $\frac{1}{4}$ سم وعرضه 10 سم. (ب) وجد أيضاً الزمن الذي يستغرقه المسح.
- ٤: ٢-٢ المنحنى المبين في الشكل ١٤ هو عبارة عن أثر تتبع الكثافة كيميا على جزء من فيلم فوتوغرافي سالب. انقل هذا المنحنى على ورقة أخرى وارسم تحته تماماً دالة النشر المناظرة له.

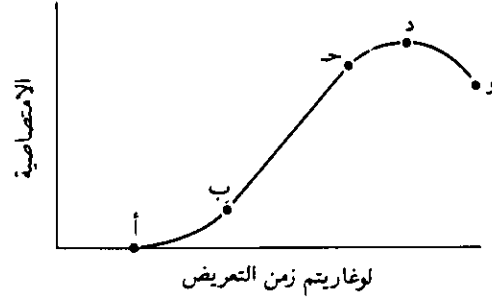


الشكل ١٤

- ٤: ٢-٣ شبيثة كاميرا بعدها البؤري 50 مم تحلل التفاصيل في مستوى الصورة التي يبلغ تواترها $\gamma = 25$ مم؛ جد التبيين الزاوي.

٤-٢:٤

يبين المنحنى في الشكل ١٥ العلاقة بين شدة الضوء وامتصاصية مُستَحْلَب فوتوغرافي، ويعرف هذا المنحنى بمنحنى هيرتر-دريفيلد Hurter-Driffield. ومن الواضح أن نقل التعديل الممكن يعتمد على جزء المنحنى المستخدم في أثناء تكون الصورة في المستحلب: - أ) ما جزء المنحنى الذي يعطي أعلى مغايرة، ولماذا؟ ب) كيف ستتغير النتيجة إذا استخدم الجزء د-و (حالة التعرض الزائد الشديد) الذي يسمى أيضاً حالة التشميس Solarization. ج) ارسم المنحنى المبين على ورقة وارسم منحنى آخر يبين مقدار عامل النقل المناظر لأزمان تعريض مختلفة.



الشكل ١٥

٥-٢:٤

كم ينبغي أن يكون أكبر وأقل مسافة بينية في مُشْبِك فوكو لفحص تلسكوب تكبيره الزاوي $\times 10$ وَيُصَوَّب نحو هدف يبعد ٥ كم علماً أنه يتألف من قضبان ذات عرض متغير يتردد من ٦ م إلى ١٠ سم؟ افترض أن بعد الصورة ١٠ سم.

٦-٢:٤

افترض أن الهوائي المتيسر للدراسات الفلكية الراديوية مشوه بعض الشيء وله أحد الأشكال المبينة في الشكل ١١؛ أي نوع من الهوائي يكفي أو يلزم للأعمال المختلفة المبينة أدناه. بين على الرسم أين يمكن تمثيل هذا العمل بنقطة على منحنى دالة النشر: أ) مراقبة الانبعاث من الشمس الذي هو جسم ذو شدة راديوية عالية من دون الاهتمام بموقع المصدر الصحيح؟ ب) دراسة التبين العالي للغلاف الضوئي الشمسي؟ ج) تتبع قمر صناعي (مصدر منخفض الشدة يتطلب تعيين الموقع تعييناً دقيقاً).

الفصل ٤ : ٣

المحولات ذات البعدين

Two - Dimensional Transforms

تنتقل المعلومات البصرية عادة، خلافاً للراديو، وتوسيعاً لما قيل في الفصل السابق، في صورة رسائل ثنائية البعد. ولا ضرورة للمسح في هذه الحالة كما في الشبكة الالكترونية حيث تتوافر قناة ذات بُعد واحد فقط للتواصل.

ومن أقدم صور نقل المعلومات البصرية ثنائية البعد التصوير الفوتوغرافي؛ فالصور البصرية لها خصيصة أساسية، فهي تملك درجتَي حرية تمثّلان بمتغيرين أساسيين يُعرّفان نقطة ما على السطح؛ أما المنظومات الالكترونية فلها متغير أساسي واحد فقط وهو الزمن. ويعود السبب في إمكان حدوث نقل ثنائي مباشر ومستقل عن الزمن في البصريّات إلى أنّ المقطع العرضي لحزم الضوء الأولية صغير جداً؛ إذ قد تبلغ المساحة التي تظل ثابتة على طول المسار مقداراً صغيراً يصل في حجمه إلى 10^{-8} .

محولات فورييه ذات البعدين

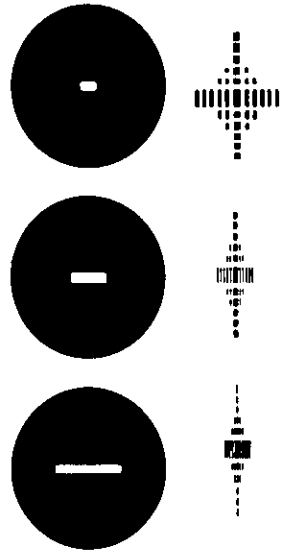
إنّ كلّ ما يلزم لتوسيع تحويل فورييه ليشمل بعدين هو إدخال بُعد آخر في منظومة الأحداثيات؛ وهكذا يكون لنا الآن المحوران المتعامدان s ، v بدل المحور السابق s ، والمحوران u ، v عوضاً عن u ؛ أي تصبح محولة فورييه ذات البعد الواحد في المعادلة [١-٣:٤] كما في المعادلتين [٢-٣:٤]، [٣-٣:٤] أدناه:-

$$Q(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} Q(u) \exp(i 2\pi s u) du \quad \dots \quad [1-3:4]$$

$$[2-3:4] \dots \dots \dots \left[\begin{matrix} \infty+ & \infty+ \\ \infty- & \infty- \end{matrix} \right] = (ص، س) \text{ ق } \left[\begin{matrix} \infty+ & \infty+ \\ \infty- & \infty- \end{matrix} \right] \text{ و } (\eta، \xi) \text{ ط } ٢ (س \xi + ص \eta) \text{ د } \xi . \text{ د } \eta .$$

$$[3-3:4] \dots \dots \dots \left[\begin{matrix} \infty+ & \infty+ \\ \infty- & \infty- \end{matrix} \right] = (\eta، \xi) \text{ ق } \left[\begin{matrix} \infty+ & \infty+ \\ \infty- & \infty- \end{matrix} \right] \text{ و } (س \xi + ص \eta) \text{ ط } ٢ \text{ دس دص}$$

والمعادلتان الأخيرتان متماثلتان في ماعدا إشارة الأس؛ فإذا كَانَ ق (س، ص) هو توزيع الضوء في بؤبؤ الخروج لمنظومة بصرية، فإن ق (η، ξ) يكون توزيع الضوء في مستوى الصورة.



الشكل ١: شقوق رفيعة ذات أطوال مختلفة (الى اليسار) ومحولات فورييه لها (الى اليمين)

إنَّ محولتي فورييه ذواتا البعدين من هذا النوع هما - كما سَتَرى - أساسيتان لتكوّن الصور. فعلى سبيل المثال يعتبر نمط حيود فرونهورف لجسم ما مُحَوَّلَة فورييه لذلك الجسم؛ فالجسم ذو التواتر المكاني المنخفض أي الجسم الذي له تفاصيل كبيرة يفصل بينها مسافات واسعة يُعْطِي مُحَوَّلَة فورييه ذات عناصر صغيرة يقرب بعضها من بعض؛ أما الجسم الذي له تواتر عالٍ فيعطي نهايات عظمى تفرق عن بعضها بمسافة واسعة (الشكل ١).

ويتناقص عرض العناصر والمسافات الفاصلة بينها بازدياد طول الثقب؛ فإذا كَانَ الثقب طويلاً جداً مقارنةً بعرضه (كما هو الحال في الشق مثلاً)، فإنَّ النمط يزدحم بشدة عالية في اتجاه يوازي طول الشق حتى أن الضوء كله يتركز في خط متعامد عليه.

نظرية حيود تكون الصور في الميكروسكوب

تمَّ التعرف إلى أهمية محولات فورييه في تكوين الصور لأول مرة في الميكروسكوب. وكان إرنست أبي Ernest Abbe أول من حاول ذلك، وقد نجح عام ١٨٧٣ في صياغة

• أرنست أبي (١٨٤٠-١٩٠٥): الفيزيائي الألماني ورئيس المصممين وشريك كارل زايس في مشاغل بصريات زايس في جينا، طور نظرية تكوين الصورة، نظرية البؤبؤ، شرط الجيب، مقياس الكسر، وغرفة عدّ كرات الدم التي سميت جميعها باسمه.

المبادئ التي ينطوي عليها استخدام محولات فورييه . ووفق نظرية أبي فإن تكون الصورة في الميكروسكوب يتم في خطوتين ؛ ومع أن هاتين الخطوتين في الحقيقة تتبعان بعضهما زمنياً إلا أنه يمكن الفصل بينهما إذا ما أريد ذلك . وفي الخطوة الأولى تكون شبيثة الميكروسكوب «نمط التداخل الأساسي» وهو هيئة من نهايات التداخل العظمى تقع في المستوى البؤري الخلفي للشبيثة ؛ وفي الخطوة الثانية تحول نمط التداخل الأساسي إلى صورة (متوسطة) ينظر إليها بالعينية . وكما يوضح الشكل ٢ يدخل الضوء الصادر من مصدر نقطي (إلى الأسفل) عدسة مسددة ثم يسقط على الجسم ، وهناك يمر جزء من الضوء بينما يُحيّد الجزء الآخر بتفاصيل بنية الجسم . ونظراً لحجم الشبيثة المحدود فلا تجمع الشبيثة إلا الضوء المُحيّد من الرتبة الصفرية والرتب المنخفضة الأخرى ، أما الرتب العالية فلا تجمع ومن ثم فهي تُهدر في تكون الصورة .

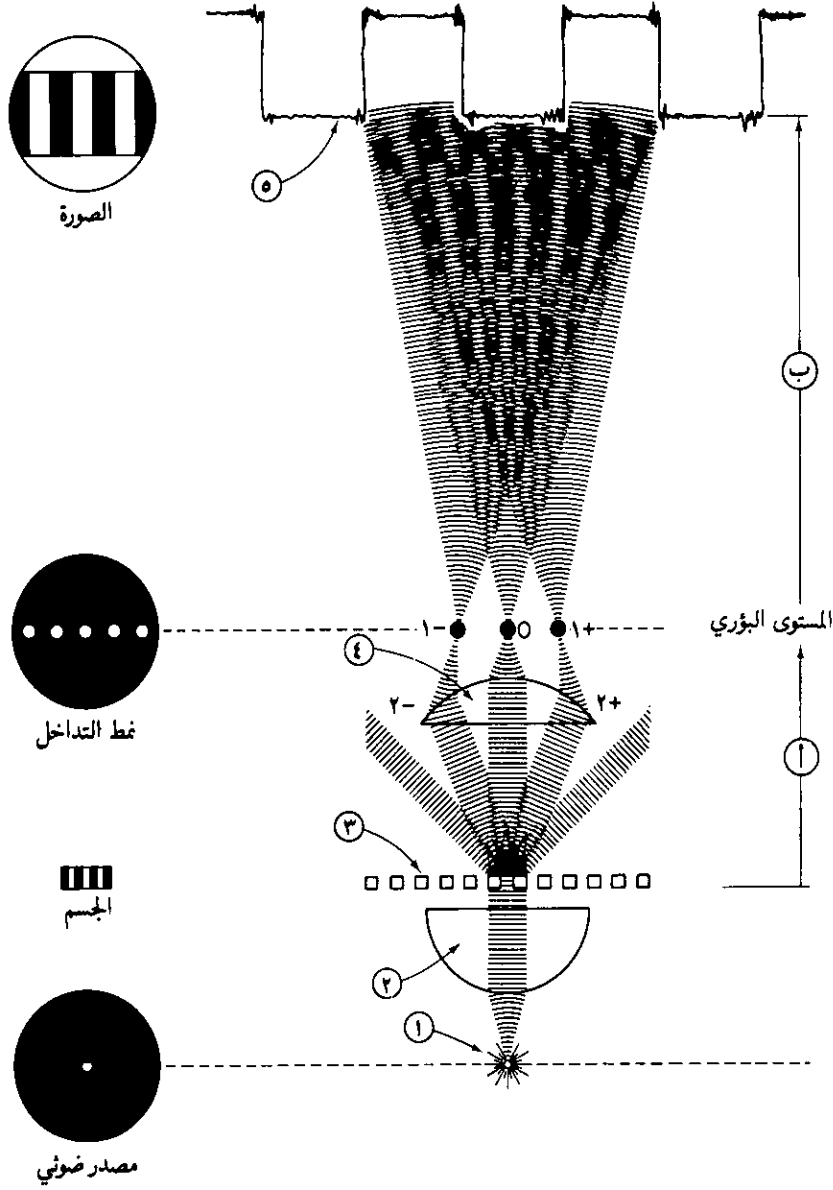
وتتقلص مكونات الضوء المركزية والمحيدة في المستوى البؤري الخلفي إلى نهايات عظمى تكون بدورها نمط التداخل الأساسي ؛ ويعتبر هذا النمط وبنية الجسم «متبادلين» reciprocal . وبعد ذلك تُغيّر العملية الثانية من عمليات تحويل فورييه نمط التداخل الأساسي إلى الصورة المتوسطة .

وتنص نظرية أبي على أن الصورة الأخيرة تصبح أكثر صدقاً كلما ازداد عدد النهايات العظمى من الرتبة العالية التي تقبل في فراغ الصورة . إن أية عدسة بالطبع تستطيع أن تقبل عدداً محدوداً من النهايات العظمى ؛ ولذا تحتوي الصورة دائماً على معلومات أو تفاصيل أقل من تلك التي يحتوي عليها الجسم . فإذا كانت بنية الجسم دقيقة جداً أو كانت فتحة العدسة صغيرة جداً بحيث لا يدخل العدسة الأمامية أية نهايات عظمى ذات رتب عالية فإن بنية الجسم لا يمكن تمييزها أياً كان التكبير ؛ وبعبارة أخرى تتحدد كمية المعلومات التي تحتويها الصورة بقطر فتحة المنظومة العدسية التي تكون الصورة .

وطوّر أبي وآخرون من بعده سلسلة من التجارب المخبرية لتوضيح نظرية أبي تلك ؛ إذ أمكن حجب أجزاء من نمط التداخل بتضمين حواجز ثقوب ذات أحجام وأشكال متعددة في

*K. Michel, *Die Grundlagen der Theorie des Mikroskops* (Stuttgart: Wissenschaftl. Verlagsgesellschaft, 1950). K. Kranjc, "Simple Demonstration Experiments in the Abbe Theory of Image Formation," *Am. J. Physics* 30 (1962), 342-47.

المستوى البؤري الخلفي مما نشأ عنه تغيير في الصورة بشكلٍ مميزٍ ومُتَوَرِّجٍ جداً.

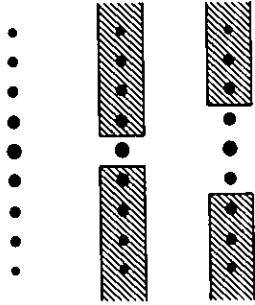


الشكل ٢: تكون الصورة بضوء متخالف: (١) مصدر الضوء (٢) المكثف (٣) الجسم (٤) الشبكية (٥) الصورة، أ، ب هما محولتا فوزيه.

التجارب المخبرية التي توضح نظرية أبي

١ . استخدم مشبكاً (الجسم) يحتوي على ٥٠ خطاً للملتر الواحد، وضع المشبك على منصدة ضوئية، ثم أضئه بضوء أبيض مسدد. وجه المشبك بحيث تكون خطوطه أفقية.

٢ . جُمع ميكروسكوباً مركباً باستخدام عدسة مجمعة بعدها البؤري ٥ سم (الشيئية) وعينية هيجنز (١٠×) التي توضع على بعد ٣٠ سم تقريباً من الشيئية؛ انظر في العينية وركز على الجسم بتحريك الشيئية قليلاً إلى الأمام وإلى الخلف.



٣ . ولكي ترى نمط التداخل الأساسي ضع بطاقة بيضاء في مسار الضوء بين الشيئية والعينية، ثم حركها قليلاً إلى الأمام وإلى الخلف ببطء؛ لاحظ أن حزمة الضوء المقطوعة ستكون تقريباً بقعة ضوء منتشرة في كل الاتجاهات باستثناء موضع واحد على المستوى البؤري الخلفي للشيئية أو قريباً منه على بعد ٥ سم إلى يمينه (في منظومة عدسية معقدة قد يوجد المستوى البؤري الخلفي قريباً جداً من آخر سطح عدسي)؛ ويرافق الرتبة الصفراء (مركز النمط) بقع أقل شدة تقع في أعلى وأسفل النهايات العظمى ذات الرتب الأعلى (الشكل ٣ إلى اليسار)

الشكل ٣: نمط التداخل الأساسي لجسم مشبك يُخضَّل عليه من مصدر ضوئي نقطي (اليسار)؛ نفس النمط السابق إلا أن النهاية العظمى الصفراء هي التي تدخل فقط إلى فراغ الصورة (الوسط)؛ النهاية الصفراء والنهايتان العظميان من الرتبة الأولى تُدخلان إلى فراغ الصورة (اليمن).

إن الرتبة الصفراء بيضاء، أما الرتب الأعلى فملونة؛ حمراء من خارجها وزرقاء من داخلها؛ لأن الضوء الأحمر يُجَدُّ أكثر من الضوء الأزرق.

إن النهاية الصفراء والنهايات العظمى الأعلى رتبة هي حقيقة صور للثقب، أغلق بحرص الثقب بطرف قلم الرصاص المبري تجد أن نفس الشيء يحدث لجميع النهايات العظمى؛ أدر المشبك قليلاً حول المحور البصري تجد أن النمط يدور بنفس الكيفية وتترتب النهايات العظمى عمودياً على خطوط المشبك.

٤ . باستخدام شق قابل للتعديل احجب كل النهايات العظمى ما عدا الرتبة الصفراء (الشكل ٣ - الوسط)، ويمكنك أن تستعين بقطعة ورقة صغيرة موضوعة خلف الشق؛ ومن دون إزالة الشق انظر عبر العينية، فسيمر ضوء كاف، ولكنك لا ترى أية صورة.

استنتاج

لا يمكنُ للنهاية العظمى الصفريّة بمفردها أن تنتج صورة، ولا يوجدُ هنالك ميكروسكوبٌ أو أداةٌ أخرى تستطيعُ تبيينَ التفاصيلِ القريبيةِ جداً من بعضها البعض إذا لم تُدخلِ العدسةُ الاماميةُ للشيئية النهاياتِ العظمى من الرتبة الأولى.

٥ . وسّع الشقَّ قليلاً بحيثُ تُدخلُ النهايتان العظميان المجاورتان للرتبة الصفريّة (الشكل ٣ - اليمين)، فعندها تُصبحُ خطوطُ المشبكِ واضحةً؛ ثم افتح الشقَّ كلّهُ بعد ذلك مُدخلًا جميعَ النهاياتِ العظمى.

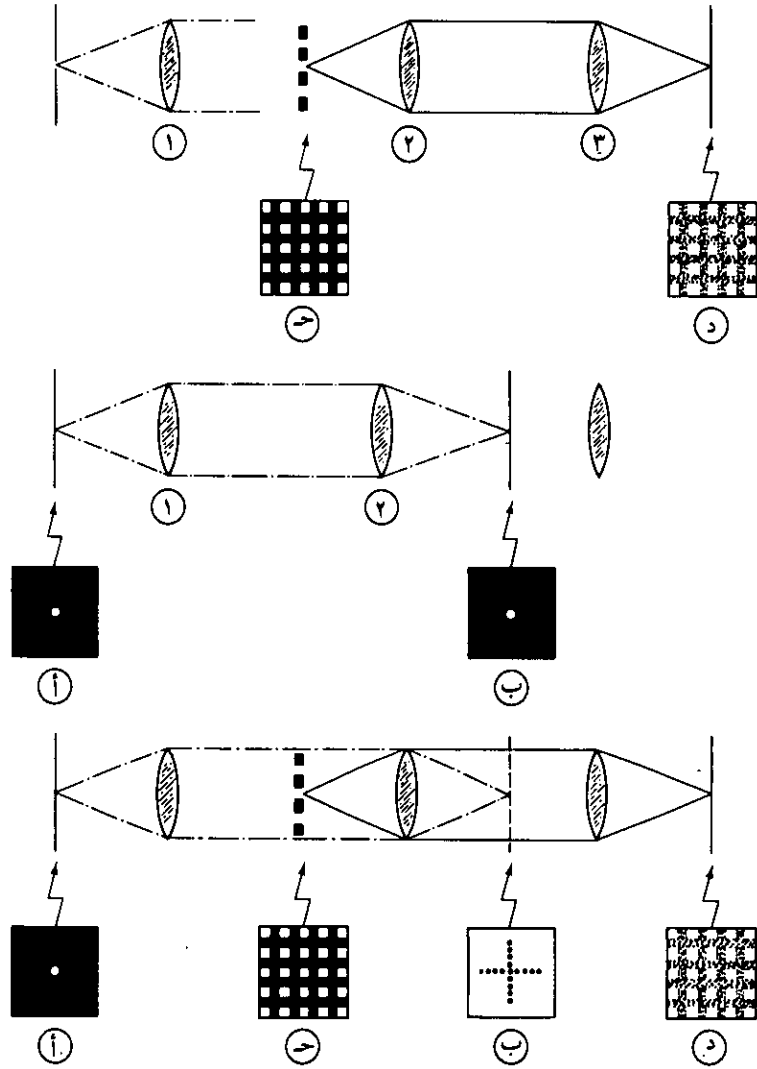
استنتاج

يلزمُ لرؤيةٍ مزيدٍ من التفاصيلِ وجودُ النهاياتِ العظمى ذاتِ الرتبِ الأعلى.

معالجة البيانات بصرياً Optical Data Processing

لننظرُ إلى نسقٍ من العناصرِ الضوئيةِ على نحوٍ أكثرَ عموميّةً: فالعدستان في الجهةِ اليمنى ٢، ٣ في الشكلِ ٤ (الرسم العلوي) تُنتجان صورةً حقيقيّةً د لجسمٍ حقيقيٍّ عبارةً عن مشبكٍ مصلبٍ ج، وعلاوةً على ذلك تُكوّنُ العدستان ١، ٢ لغشاءٍ فيه ثقبٌ أ صورةً حقيقيّةً ب (الوسط). وهكذا تعملُ العدساتُ الثلاثُ معاً عمليتينِ مستقلتينِ في تكوينِ الصورةِ (الرسم السفلي).

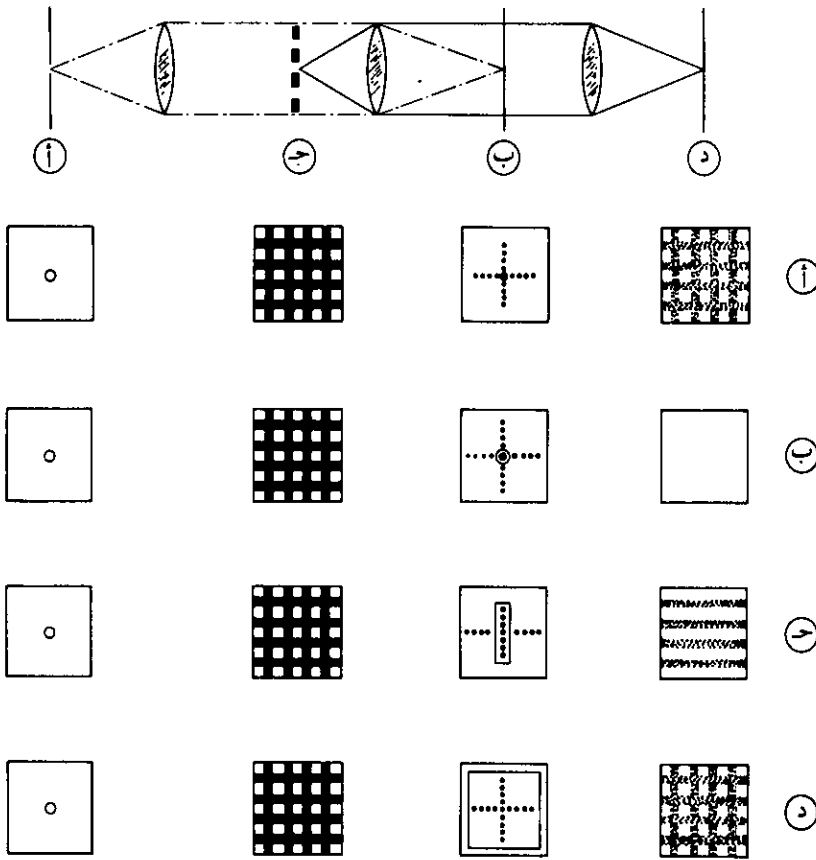
صنّع الآن عدداً من القناعاتِ في مستوى محوّلٍ فورييه الصحيح؛ وكما ذكر من قبلُ فالمستويان أ، ب هما مُترافقان وكذلك المستويان ج، د. وإذا ما اختيرت المسافاتُ بصورةٍ صحيحةٍ، فإنَّ المستوى ب يحتوي على محوّلٍ فورييه لتوزيع الشدةِ في ج، كما يظهرُ في الشكلِ ٥، الخطُّ أ. صنّع قناعاً في ب يحوي ثقباً عند موقعِ النهايةِ الصفريّة؛ تجذُّ أن الصورة د ستستقبلُ الضوءَ لكن من دونِ أيةِ معلوماتٍ (الخطُّ ب في الشكلِ ٥). وإذا ما احتوى القناعُ على شقٍّ رأسيٍّ، فسوف لا تُرى إلا الخطوطُ الأفقيةُ (الخطُّ ج)؛ وإذا كانَ للقناعِ ثقبٌ أوسعُ أو إذا لم يوجدَ هنالك أيُّ قناعٍ، فإنَّ الصورةَ بكاملِها تُرى (د). وتمثلُ هذه العملياتُ بعضَ أبسطِ خطواتِ الترشيحِ المكانيِّ.



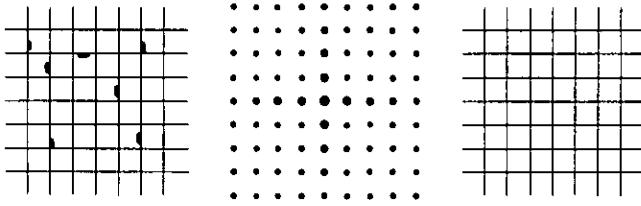
الشكل ٤ : العناصر الأساسية في معالجة الصورة

الترشيح المكاني Spatial filtering

الترشيح المكاني هو عملية تدعيم أو تخفيف تواترات مكانية مختارة لجسم ما؛ فالغرض الرئيس من المرشحة المكانية هو تسهيل الكشف عن إشارة ما مع وجود التشويش. ولذا فإن تصميم المرشحة المكانية يجب أن يُبنى على معرفة سابقة بخصائص الإشارة المعنية والتشويش Noise.



الشكل ٥: الترشيح المكاني لمشبك مصلب (جسم).



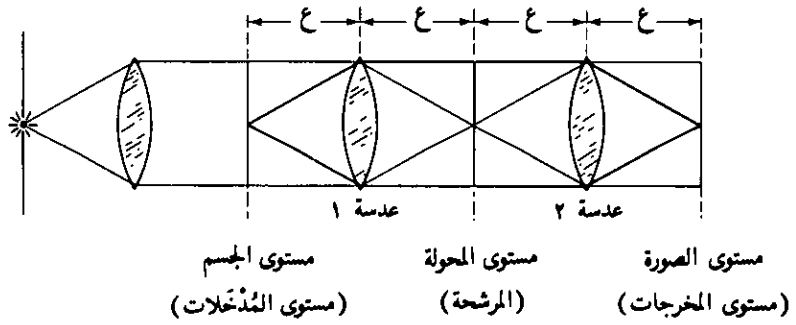
الشكل ٦ : صورة المشبك الاصلي مع الغبار (اليسار)؛ نمط الحيود للمشبك (الوسط)؛ صورة المشبك وقد أزيلت دقائق الغبار بالترشيح المكاني (اليمن).

وللتبسيط، افترض مرة أخرى أن الجسم عبارة عن مشبك مصلب (للسعة) أي هيئة من الخطوط المعتمدة المتصالبة. وقد يكون المشبك غير نظيف لوجود دقائق غبار لاصقة ببعض خطوطه (الشكل ٦). وكما ذكر من قبل فإن محوّة فوزيه أو حيود فرونهور هو ترتيب ذو

بعددين من النقاط التي تعتمد المسافات بينها على حجم الفراغات في المشبك؛ فإذا ما وضعت ستارة ذات ثقب تناظر نهايات الحيود العظمى في المستوى البؤري الخلفي ورتبت ترتيباً مناسباً يتوافق ونمط الحيود، فإن الضوء المحيّد من المشبك وليس ذلك الضوء المحيّد من دقائق الغبار هو الضوء الذي سينفذ، هذا الضوء يكون صورة للمشبك من دون الغبار بحولة فورييه الثانية.

معالجة تحليلية للالتفافات Analytical treatment of Convolutions

تسهل المعالجة التحليلية كثيراً إذا ما افترضنا عدداً من الافتراضات المبسطة، وحذفنا على سبيل المثال أي تكبير أو أية تغييرات في الحجم أو المقياس. ويوضح الشكل ٧ التركيب الأساسي لمنظومة معالجة البيانات.



الشكل ٧: الترتيب الأساسي لمعالجة صورة محولة فورييه: العدسة إلى اليسار تستخدم للتسديد فقط.

لقد رأينا من قبل أن توزيع الشدة ذا البعد الواحد في مستوى الصورة يُعطى بالمعادلة التالية:-

$$Q(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} Q(\xi) \cdot J(s - \xi) \cdot d\xi \dots [4-3:4]$$

حيث $Q(\xi)$ هو توزيع الشدة في مستوى الجسم أو دالة النشر، وحيث $J(s - \xi)$ هو استجابة الدفع للمنظومة impulse response.

أما معادلة الالتفاف لدوال ذات بُعدين فهي :

$$ق(س، ص) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} ق(ق، ع) ج(س-ع، ص-ق) د ع . د ق [٥-٣:٤]$$

حيث ق (ع ، ق) هو دالة الجسم، و ج(س-ع، ص-ق) هو استجابة الدفع للمنظومة. ومن ناحية طبيعية، فالمنظومة البصرية نادراً ما يكون لها استجابة واحدة على المجال كله؛ غير أنه من الممكن عادةً قسمة مجال الجسم إلى مناطق صغيرة تُسمى «الرقع متساوية الاستجابة» تكون فيها استجابة المنظومة تقريباً ثابتة.

افترض قطعة فيلم هـ، دالة نفاذيتها ت(س، ص) مُعرفة على كل نقطة في مستوى الجسم؛ فإذا عُرض الجسم لضوء متوازٍ شدته ش.، فإن توزيع الشدة للضوء المار في الجسم يُعطى بالمعادلة التالية:-

$$ش(س، ص) = ش. ت(س، ص) [٦-٣:٤]$$

وافترض بعد ذلك أن شفافية أخرى توضع الآن فوق الأولى أو أن الشفافية الثانية توضع في مستوى المُخرجات حيث تنطبق عليها صورة الشفافية (قطعة الفيلم) الأولى مكبرة مرة واحدة؛ ومن ثم يتبع أن توزيع الشدة في حزمة الضوء الصادرة من الشفافية الثانية هي:-

$$ش(س، ص) = ش. ت١(س، ص) ت٢(س، ص) [٧-٣:٤]$$

أي أن الشدة يُحصَلُ عليها من عملية ضرب ت١، ت٢. ومن الممكن إجراء تكامل ل ت(س، ص) بإسقاط المساحة المعنية على كاشف ضوئي؛ وإذا كانت المنطقة كبيرة، لزم استخدام عدسة مكثفة بين الفيلم والكاشف، الأمر الذي يؤدي إلى عملية تكامل من النوع التالي:-

$$ش = \int_{\rho_1}^{\rho_1^B} \int_{\rho_2}^{\rho_2^B} ت١(س، ص) ت٢(س، ص). د ص د س [٨-٣:٤]$$

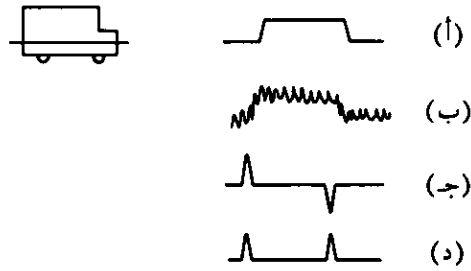
حيثُ حَدَا التكاملِ أ، ب هما ضلعا المساحة.

وَإِذَا كَانَ التكاملُ المطلوبُ في بُعدٍ واحدٍ فقط، فإنَّنا نضيفُ عدسةً أسطوانيةً؛ ولذا يكونُ التكاملُ على النحو التالي:-

$$\text{ش(ص)} = \int_P^B \text{ت}_1 (\text{س، ص}) \text{ت}_2 (\text{س، ص}) \text{د س} \dots \dots [4:3-9]$$

أما البعدُ الآخرُ فيُوفَّرُ لمعالجةِ قناةٍ أخرى. ويتحددُ عددُ القنواتِ بِتَبَيُّنِ فتحةِ المنظومةِ أو المستحلِّبِ الفوتوغرافي فقط؛ إذ يمكنُ بصورةٍ عامةٍ استيعابُ ٢٠ قناةً في الملمترِ الواحدِ.

ويمكنُ توضيحُ التفاضلِ بمثالٍ لجسمٍ مثلٍ شاحنةٍ (الشكل ٨): فمسحُ صورةِ الشاحنةِ عادةً يُنتِجُ منحنىً كما في (أ)، وتبدو الشاحنةُ في الضبابِ الكثيفِ مثلَ (ب) بِسَبَبِ

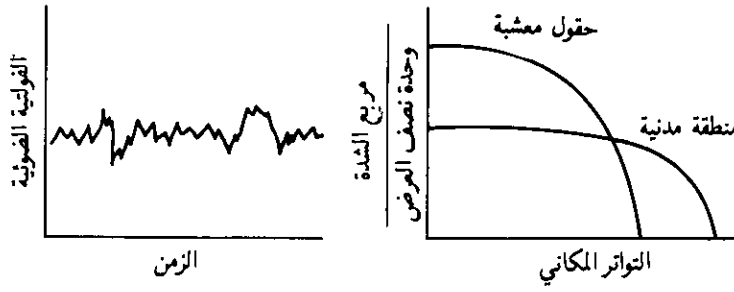


الشكل ٨: التفاضل في معالجة البيانات البصرية ذات البعدين

التشويش، أمَّا التفاضلُ فيعطي (ج)، ولأنَّ الكاشفَ يستجيبُ للطاقةِ أو لمربعِ السعةِ فإنَّ الشكلَ الذي يُرى يكونُ مثلَ (د)، وهكذا تأخذُ صورةُ الشاحنةِ شكلَ خَطِّ كنتوريٍّ لامعٍ مما يجعلُها أكثرَ وضوحاً مما كانتْ عليه في (ب).

تمثيل الإشارة Signal representation

تخيلُ جسماً معقداً مثلَ صورةٍ جويةٍ تحتوي على عدةِ تفصيلاتٍ: غاباتٍ، سهولٍ معشبةٍ، مناطقَ مدنيةٍ.. الخ. ومن الممكنِ تمثيلُ المعلوماتِ في هذه الصورةِ بِمَسْحِهَا وَتَسْجِيلِ



الشكل ٩ : طريقتان لتمثيل المعلومات البصرية : طريقة المسح والتسجيل الكهروضوئية (اليسار) وطريقة طيف القدرة (اليمن). [اعيد رسمه من د. ك. ماكدونالد، Physics Today الفيزياء اليوم ١٤ (١٩٦١ حزيران) ؛ استنسخت بإذن].

النتائج الكهربائي الضوئي (الشكل ٩ الى اليسار)؛ فهذه الطريقة يتم اختزال المعلومات فيها إلى إشارة تتغير زمنياً بحيث تكون سعة الفولتية voltage amplitude متناسبة مع شدة الضوء. وهذه الطريقة عائق كما هو واضح، ولها أن أمر الاحتفاظ بالمعلومات يتطلب كمية كبيرة من الشريط المغناطيسي؛ فالصورة التي بُعِثَها ٢٤ سم × ٢٤ سم والتي تؤخذ بتبيين مقداره ١٠٠٠ خط/مم تخوي من دقائق المعلومات ما يعادل ١٠,٠٠٠ ساعة من شريط السمع عالي الدقة.

وبتحويل المعلومات التي يحتويها الجسم بمحولة فورييه إلى متسلسلة من الأمواج الجيبية والجيتمامية، يكون لكل حد في المتسلسلة تواتر وسعة مختلفان، كما يكون هذه الدوال الدورية ساعات فولتية تتغير مع الزمن.

ويعرف توزيع السعة بطيف فورييه، ويعرف مربع السعة عند تواتر معين بالقدرة، كذلك يعرف التوزيع الكلي بطيف القدرة أو طيف ويتر Wiener؛ ويمكن تمثيل كمية كبيرة من البيانات بطيف واحد من أطياf ويتر. وعلاوة على ذلك، فلطيف ويتر مدنى دينامي واسع.

وعلى الرغم من أننا لا نعرف التفاصيل الخاصة في الصورة، فإن الارضيات المختلفة لها أطياf (ويتر) مختلفة؛ وسيكون مثلاً للسَّهل المعشَب الذي لا ملامح له محتوى أقل من التواترات العالية مما لمنظر عام في المدينة له حدود حادة (الشكل ٩ - اليمن). كذلك

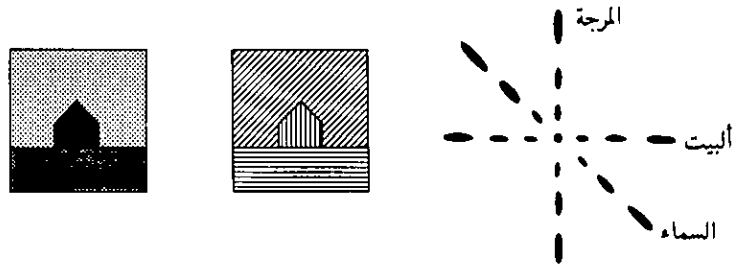
يكون للجسم الصغير كطائرة مثلاً طيف و يتر مُبَسِّط بصورةٍ أساسيةٍ لجميع التواترات حتّى التواتر الذي يبلغ نصف مقلوب العرض الزاوي للجسم؛ ومن جهةٍ أخرى فإنّ لمعظم السحب أبعاداً زاويةً كبيرةً، ومن ثم تواتراتٍ مكانيةً منخفضةً.

ويحدث تغيير هامّ إذا ما وُضِعَ قناع (مثل موجةٍ مربعةٍ) في مستوى محولةٍ فورييه. وإذا ما طابق التواتر المكاني للجسم التواتر المكاني للقناع فإنّ قيمة النقل تبلغ أقصاها، وستظهر قمة عند التواتر المكاني المعني في منحنى دالة النقل؛ أما الأجسام ذات التواترات المكانية العالية أو المنخفضة فتصنّف تقريباً. وتستخدم هذه الطريقة في منظومات عدة تستخدم للتعرف إلى الأهداف أو للتوجيه والتتبع، وكذلك في الأدوات الأخرى التي تُصمَّم لاسترجاع المعلومات.

أمثلة أخرى على معالجة البيانات البصرية

تعديل ثيتا Theta modulation

إنّ تعديل ثيتا هو شكل من أشكال الترشيح المكاني يتبع مباشرة من نظرية أبي في تكوين الصورة الميكروسكوبية. اعتبر منظرًا يحوي عناصر مختلفة مثل بيت، برج، وسماء (الشكل ١٠)؛ وتتمثل هذه العناصر بظلال رمادية مختلفة في الصورة العادية

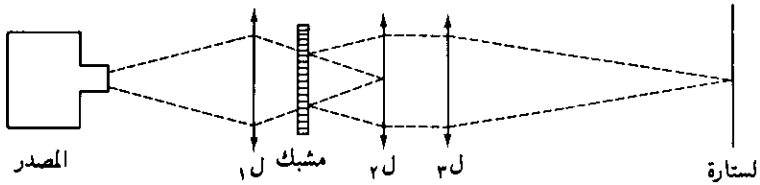


الشكل ١٠: تعديل ثيتا: منظر بسيط رُسم باللون النصفى (الى اليسار)؛ منظر معدّل بتعديل ثيتا (الرسم في الوسط)؛ ومنظر محوّل بمحولة فورييه (الرسم الى اليمين).

*J. D. Armitage and A. W. Lohmann, "Theta Modulation in Optics," *Applied Optics* 4 (1965), 399-403.

(بيضاء-سوداء) - إلى اليسار. وفي تعديل ثيتا، يُصنَّع كلُّ عنصرٍ من قطعةٍ من محزوز حيودٍ بلاستيكي موجهة في اتجاهٍ معين (زاوية السميت)؛ ومن هنا يأتي اسمُ تعديلِ ثيتا - الرسم في الوسط. وبإخضاع المنظرِ المعدَّل بتعديلِ ثيتا لحيود فرونفوفر، فإنَّ النمطَ الناتجَ سيتألف من صفوفٍ من النهاياتِ العُظمى تناظرُ عناصرِ المنظرِ الأصلي (الرسم إلى اليمين).

ويمكنُ إجراءُ تعديلِ ثيتا في التصويرِ الأبيض - الأسود والتصويرِ الملون. اعتبرُ أولاً حالةَ التصويرِ الأبيض - الأسود. فإذا ما أريدَ أن يَظهرَ البيتُ في الصورةِ الأخيرةِ أسوداً، حُجِّبَت النهاياتُ العُظمى التي تُناظرُ البيتَ، وإذا ما أريدَ أن تَظهرَ السماءُ فاتحةَ اللونِ سُمِّحَ لجميعِ النهاياتِ العُظمى بالنفاذِ؛ أمّا إذا أريدَ أن تبدو المَرجَةُ متوسطةَ الرمادية، فيسمحُ بالنفاذِ لجزءٍ من النمطِ الخاصِّ بالمرجة وربما للنهاياتِ العُظمى إلى أحدِ جانبي الرتبةِ الصفريّةِ فقط. وباختصارٍ، يمكنُ تخصيصُ أيِّ درجةٍ من اللونِ الرماديِّ لأيِّ عنصرٍ من المنظرِ من خلالِ صُنْعِ القناعِ الذي لا يُنفِذُ إلّا جزءاً من الضوءِ فقط. ولأنَّ النهايةَ الصفريّةَ لا تعتمدُ على زاويةِ سَمَتِ المُشَبَّكَاتِ، فإنَّها تُحجَّبُ في جميعِ الأحوالِ.



الشكل ١١: جهاز لتجربة تعديل ثيتا.

تجربة مخبرية

يستخدمُ مصدرٌ ضوئيٌّ أبيضٌ معَ عدسةٍ ١ ل تعملُ مثلَ مكثفٍ وذلك لإضاءةِ المنظرِ المعدَّل بتعديلِ ثيتا كما عُرِضَ سابقاً (الشكل ١٠ - الوسط والشكل ١١). وَينبغي تثبيتُ المنظرِ مقلوباً لتكونَ الصورةُ النهائيةُ له معتدلةً. ونستخدمُ العدستانِ ٢ ل، ٣ ل ذواتا القطر الكبير لتركيزِ الصورةِ على الستارة. وبعد التثبيتِ الصحيح، يُغطى الوجهُ المستوي للعدسةِ ٢ ل بالسحام، ثم توضعُ العدسةُ في

مكائنها الصحيح مرة ثانية؛ وهكذا يقع بوضوح نمط الحبيد يَصِفُ القطري المميز الذي يتسبب بالعناصر الثلاثة للمنظر على السخام. ومن السهل تبين أن الأطوال الموجية المختلفة لها مسافات زاوية مختلفة: فالأزرق يُحَيِّدُ أَقْلَ من الأحمر، ولذا فهو يقع أقرب إلى النهاية الصفريّة.

ثم يزاخ قليل من السخام بعد ذلك باستخدام عود كعود تنظيف السّر (وحذارٍ من استخدام عود ذي طرف معدني) عَنْ كُلِّ من النهايتين العظميين من الرتبة الأولى في المواقع التي ينفذ منها ضوء من لون معين. وَعَلَيْكَ أَنْ تفعل هذا بحذر، فَلَا تُزَكِّ من السخام ما يَسْمَحُ بنفاذ أَكْثَر من لَوْنٍ واحدٍ. وعلى سبيل المثال أزل قليلاً من السخام في الطرف الأحمر من النمط عَنْ النهايات العظمى الناشئة عن البيت، وأما لعنصر السماء فأزل بعض السخام من منطقة اللون الأزرق؛ وبالنسبة للمرجّة أزل بعض السخام في منطقة اللون الأخضر. ولذا سَتَبْدُو الصورة النهائيّة بألوان نابضة مشبعة جداً.

مغايرة الطور Phase Contrast

يعتبر مبدأ ميكروسكوب مغايرة الطور توسيعاً مباشراً لنظرية أبي. وقد افترض أبي دائماً أن الجسم عبارة عن محزوز سعة أي متسلسلة من الخطوط الشفافة والمعتمّة المتعاقبة؛ إذ أن نهايات التداخل العظمى التي تتكوّن من هذه المحزوزات لها جميعها نفس الطور. ومن جهة أخرى، فإذا كان الجسم عبارة عن محزوز طور أي أنه يتألّف من شرائط ثخينّة ورفيعّة متعاقبة من مادّة شفافة (الشكل ١٢)، نشأ هنالك فارق طور مقداره ٩٠ بين الضوء في



الشكل ١٢: محزوز السعة (اليسار) ومحزوز الطور (اليمن).

الرتبة الصفريّة والنهايات العظمى من الرتب الأعلى؛ وعلاوة على ذلك، فالنهاية العظمى الصفريّة تكون أكثر سطوعاً في هذه الحالة منها في حالة كون الجسم محزوز سعة. وباختصار، تتمايز أنماط التداخل الناشئة من محزوز السعة ومحزوز الطور.

وَقَدْ خَطَرَ لِرِزْنِيكَ Zernike * أَنَّهُ بِالْإِمْكَانِ جَعَلَ مَحْزُوزَ الطُّورِ يَبْدُو مِثْلَ مَحْزُوزِ السَّعَةِ إِذَا أُمِكنَ تَعْدِيلُ نَهَائِيَّاتِ التَّدَاخُلِ الْعُظْمَى تَعْدِيلًا صَحِيحًا؛ فَمِثْلُ هَذَا التَّحْوِيلِ ذُو أَمْهِيةٍ بِالْعَمَلِ وَلَا سِوَا لِعِلْمِ الْأَحْيَاءِ، ذَلِكَ أَنَّ الْكَثِيرَ مِنَ الشَّرَائِعِ المِيكْرُوسَكُوبِيَّةِ الَّتِي يُرَادُّ فَحْصُهَا فِي الْكَائِنِ الْحَيِّ هِيَ أَجْسَامٌ طَوِيرٌ يَصْغُبُ رُؤْيُهَا مِنْ دُونِ صَبْغِهَا.

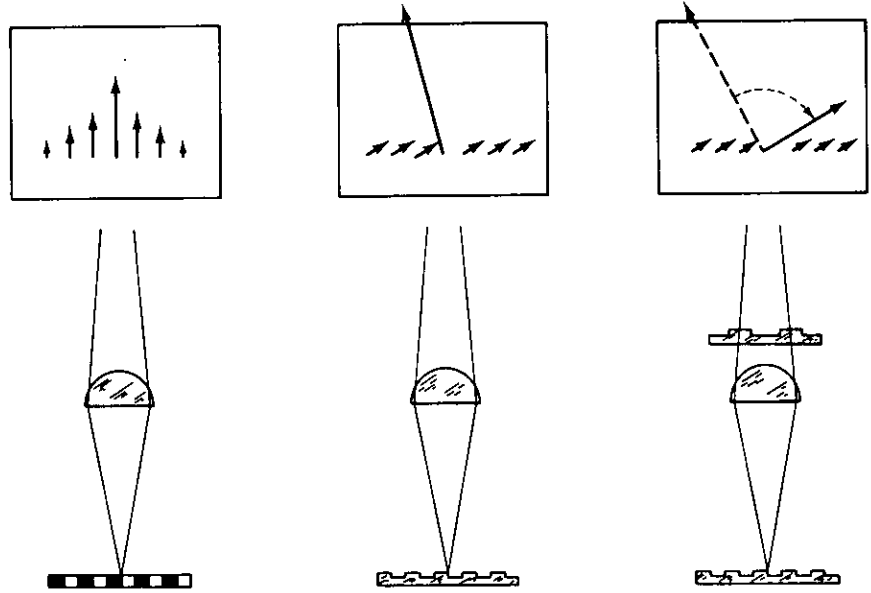
وَسَمَّى زِرْنِيكَ طَرِيقَتَهُ «طَرِيقَةُ شَرَائِطِ الطُّورِ phase-strip method» لِمُشَاهَدَةِ أَجْسَامِ الطُّورِ بِمُغَايَرَةٍ جَيِّدَةٍ، أَوْ بِاخْتِصَارٍ «مُغَايَرَةُ الطُّورِ»، وَطُوِّرَتْ هَذِهِ الطَّرِيقَةُ فِيمَا بَعْدُ+، وَأَصْبَحَتْ مِنْ ذَلِكَ الْوَقْتِ أَدَاةً مَعْيَارِيَّةً فِي مَخْتَبِرَاتٍ عَدِيدَةٍ.

وَيُمْكِنُ وَصْفُ عَمَلِيَةِ التَّرْشِيحِ الَّتِي تَتِمُّ بِمِيكْرُوسَكُوبِ مُغَايَرَةِ الطُّورِ -مُخْتَصِّدِينَ بِالْعَرَضِ السَّابِقِ- بِاسْتِخْدَامِ مَحَلَّاتٍ فُورِيَّةٍ؛ إِلَّا أَنَّا نَفْضِلُ هُنَا عِيُضًا مِنْ ذَلِكَ التَّمْثِيلِ الْمُتَجَهِّيِّ. وَبَيِّنُ الشَّكْلَ ١٣ (الرَّسْمُ إِلَى الْيَسَارِ) نَمَظَ الْحَيُودَ الْإِعْتِيَادِيَّ لِمَحْزُوزِ السَّعَةِ. وَلِمَحْزُوزِ الطُّورِ تَكُونُ النِّهَايَةُ الْعُظْمَى الصَّفْرِيَّةُ أَكْثَرَ سَطُوعًا (أَيُّ تَمَثُّلٍ بِمُتَجَوِّهِ أَطُولَ)، كَذَلِكَ تَخْتَلِفُ النِّهَايَاتُ ذَاتُ الرَّتَبِ الْأَعْلَى فِي طَوْرِهَا بِمُقْدَارِ ٩٠° عَنِ النِّهَايَةِ ذَاتِ الرَّتَبَةِ الصَّفْرِيَّةِ. وَلِذَا فَإِنَّ كُلَّ مَا يَلْزَمُ لَجْعَلِ مَحْزُوزِ الطُّورِ يَبْدُو مِثْلَ مَحْزُوزِ السَّعَةِ هُوَ إِرْجَاعُ الْأَطْوَارِ النَّسْبِيَّةِ وَالسَّعَاتِ إِلَى قِيَمِهَا فِي حَالَةِ مَحْزُوزِ السَّعَةِ. وَيُمْكِنُ إِنْجَازُ هَذَا بِوَضْعِ عَنَصَرٍ مُزَيِّجٍ لِلطُّورِ يُسَمَّى «لَوْحَةُ الْحَيُودِ» أَوْ «لَوْحَةُ الطُّورِ» فِي الْمُسْتَوَى الْبُورِيَّ الْخَلْفِيِّ لِلشَّيْءِ؛ كَذَلِكَ تُعْمَلُ الْمُنْطَقَةُ الَّتِي تَزِيحُ الطُّورَ فِي لَوْحَةِ الطُّورِ، وَالَّتِي تَتَرَاقُّ مَعَ مُنْطَقَةِ النِّفَازِ فِي حَاجِزٍ يَوْضَعُ فِي الْمُسْتَوَى الْبُورِيَّ الْأَمَامِيِّ لِلْمَكْتَشَفِ، ذَاتِ امْتِصَاصٍ قَلِيلٍ. وَيُمْكِنُ الْحَصُولُ عَلَى مَزِيدٍ مِنَ التَّفَاصِيلِ فِي «الْإِقْتِرَاحَاتِ لِلْقُرَآئَاتِ الْإِضَافِيَّةِ» الْمَثْبُتَةِ فِي نِهَآيَةِ الْفَصْلِ.

* فِرْتْسْ زِرْنِيكَ Fritz Zernike (١٨٨٨-١٩٦٦): الْفِيْزِيَاثِي الْمُولَنْدِي وَأَسَاطُذُ الْفِيْزِيَاءِ فِي جَامِعَةِ جِرُونْتِنْجِنْ؛ حَصَلَ عَلَى جَائِزَةِ نُوبَلٍ عَامَ ١٩٥٣ عَلَى اكْتِشَافِهِ مُغَايَرَةَ الطُّورِ. ف. زِرْنِيكَ: «كَيْفَ اكْتِشَفْتَ مُغَايَرَةَ الطُّورِ»، الْعِلْمُ science ١٢١ (١٩٥٥)، ٣٤٥-٣٤٩.

F. Zernike, "Beugungstheorieie des Schneidenverfahrens und seiner verbesserten Form. der Phasenkontrastmethode," *Physica* 1 (1934), 689-704; "How I Discovered Phase Contrast," *Science* 121 (1955), 345-49.

†Carl Zeiss Optical Works, *Einrichtung zur Verdeutlichung optischer Abbildungen*, German Patent 636, 168 (1936).

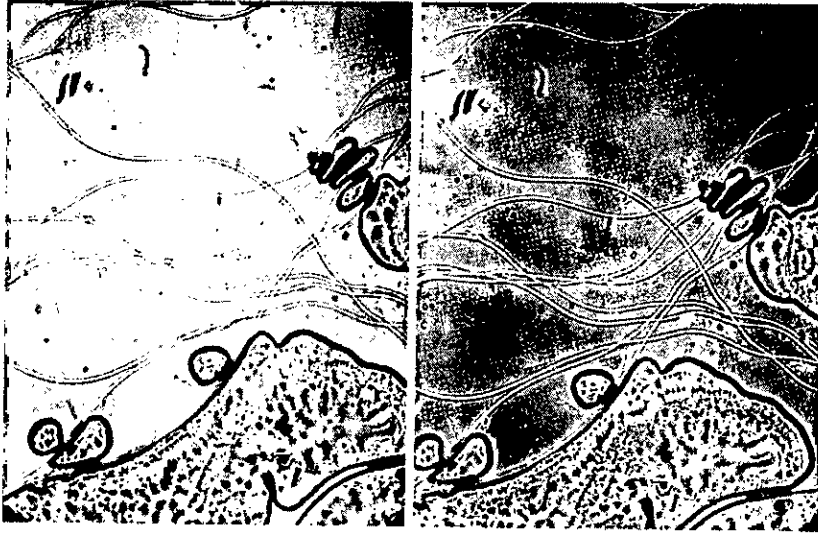


الشكل ١٣: تمثيل متجهي لعملية ميكروسكوب مغايرة الطور؛ من اليسار إلى اليمين: الجسم السعة، الجسم الطور، ومغايرة الطور.

تدعيم المغايرة باستخدام الزجاج الضوئي الكرومي

وهناك نوع خاص من المرشحات المكانية التي تُوفّر تدعيماً للمغايرة يقوم على استخدام الزجاج الضوئي الكرومي. فهذا الزجاج شفاف أضلاً كالزجاج العادي؛ غير أنه يُعتمّ تحت تأثير الضوء الأزرق أو البنفسجي، كما أنه يعود شفافاً مرة أخرى بالضوء الأحمر، وهو لا يتأثر بالضوء الأخضر. • وعند وضع صفيحة رقيقة من مادة كرومية ضوئية عالية الكثافة مثلاً في مستوى محولة فورييه، فإن الرتبة الصفرة الساطعة نسبياً ستُعتمّ الزجاج بفعالية أكثر من الرتب العالية التي تمر من دون تخفيف؛ ولكن لما كانت الرتب الأعلى هي التي تحيل المعلومات فستكون صورة ذات مغايرة مدعّمة. (إنّ الكثافة الضوئية العالية عند موقع الرتبة الصفرة قد تُغيّر من طَوَر الضوء). ويمكن مشاهدة الصورة بالضوء الأزرق أو الأخضر، كذلك يمكن مَحْو المرشحة بالضوء الأحمر.

*W. H. Armistead and S. D. Stookey, *Phototropic material and article made therefrom*, U. S. Patent 3,208,860, Sep. 28, 1965. G. K. Megla, "Optical Properties and Applications of Photochromic Glass," *Applied Optics* 5 (1966), 945-60.



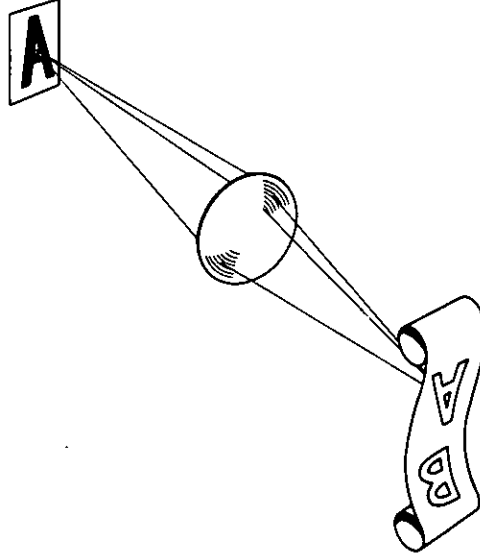
الشكل ١٤: خيوط من النسيج الاصطناعي وفقاعات هواء في بلاستيك شفاف يرى بمغايرة طبيعية (اليسار) وبعد وضع المرشحة المكانية الضوئية الكرومية (اليمن)؛ المعالجة التصويرية متماثلة في الحالتين [اعد بالتعاون مع نورمان ج. ولدن].

وتتمثل الفائدة الأساسية لمثل هذه الطريقة، مقارنةً مع طريقة المجال المعتم العاديّ أو مغايرة الطور، في أنّ المرشحة ترتّب نفسها بنفسها تماماً، الأمر الذي يُغني المشاهد من المحاولة الشاقة أو من استخدام منظومة آلية لتوفير المغايرة الأنسب لعدة أجسام ذات تواترات مكانية مختلفة. وتنتج الأجسام الصغيرة جداً كالـبكتيريا بكل تأكيد محولات مختلفة عن تلك التي للعناصر الكبيرة كخلايا الأنسجة. ويبين الشكل ١٤ مثلاً لتدعيم مغايرة جسم اختير عن قصد لكون تواتراته المكانية تتغير تغيراً واسعاً وكونه ذا مغايرة منخفضة.

تعرّف الرموز Character recognition

لقد أصبحت المنظومات التي تستطيع تعرّف نمط ما أو رمز ما ذات أهمية بالغة في استرجاع المعلومات ومعالجة البيانات البصرية وفي الأعمال المتخصصة مثل تصنيف المواد المجردة والآلات القارئة، وترجمة اللغات. وتعمل هذه الأنظمة إما بتكوين الصور الحقيقية وإما بفرز المعلومات واسترجاعها في صيغة محولة فورييه أو صيغ محولات أخرى.

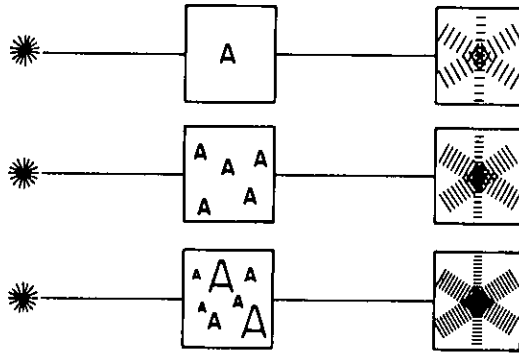
وفي آلة قراءة الصورة الحقيقية البسيطة، تُطَبَّعُ الرموزُ الهجائية-العديدية على شريحة فيلمية مثل صورة سلبية، ثم يحرك الشريط الفيلمي عبر مستوى الصورة بسرعة عالية حيث يتم إسقاط الرموز التي يراود قراءتها (الشكل ١٥). وإذا كان الرمز الذي يراود قراءته يطابق



الشكل ١٥: منظومة تُعرِّف الحروف القائمة على تكون الصورة الحقيقية.

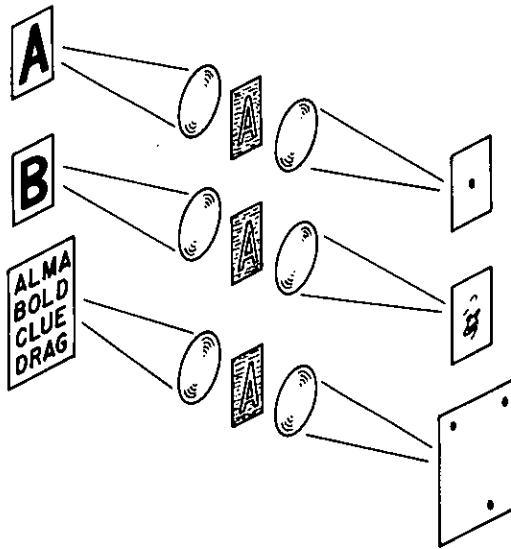
الرمز على الفيلم، فإن الناتج من الكاشف الضوئي يكون صفراً مما يؤدي بالمرحل relay الى تنشيط الطابعة. وتكمن الصعوبة من ناحية عملية في ضرورة انطباق الصورة والقناع بدقة حتى تعمل المنظومة. فعدم المطابقة match أو الترتيب غير الصحيح يؤلّد «الأخطاء» miss.

وفي الوقت الحاضر استعاض عن هذه المحاولات المبكرة بمنظومات أكثر تقدماً. حُد على سبيل المثال نمط حيود فرونهور الناشر عن الحرف A (الشكل ١٦ - الرسم العلوي)، ثم افترض أن الجسم المُحَيّد يحوي عدة حروف من النوع نفسه (الشكل ١٦ - الرسم في الوسط)؛ ولحسن الحظ فإن أنماط حيود فرونهور ثابتة انتقالياً أو موضعياً translation-invariant، بمعنى أن تحريك A لا يُغيّر النتيجة. وعلاوة على ذلك فإن محولات فوربيه هي ثابتة أيضاً من حيث التكبير أو المقياس scale or magnification-invariant، بمعنى أن تغيير حجم A مع الاحتفاظ بشكله لا يُغيّر النتيجة كذلك (الرسم السفلي).

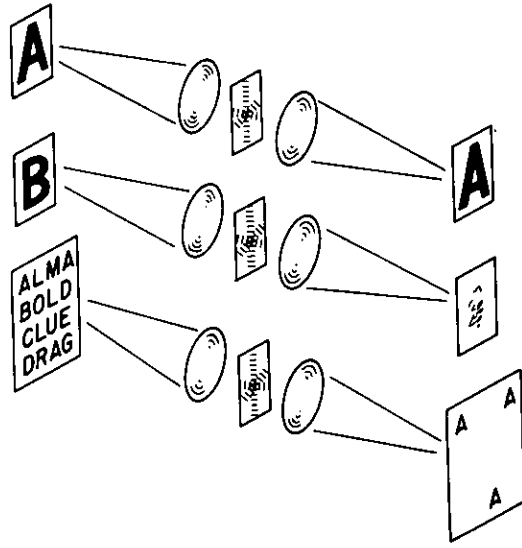


الشكل ١٦: الحرف الواحد يعطي نفس الاستجابة بصرف بعض النظر عن كيفية تحريكه أو حجمه .

اعتبر بعد ذلك حالة يصنع فيها قناع من حرف معين مثل A ، ثم يوضع في مستوى محولة فورييه الأول (الشكل ١٧ - الرسم العلوي) ؛ فإذا كان كل من الجسم والقناع الحرف A ، فإننا نحصل على مثال على الترابط الذاتي $auto-correlation$ ؛ وتكون النتيجة الحصول على بقعة ساطعة للرتبة الصفريّة في مستوى الصورة . أما إذا كان الجسم B والقناع A ، فإننا نحصل على مثال على الترابط البيني $Cross-correlation$ ، وتظهر في مستوى الصورة بقعة ضوء منتشرة (غير محددة) [الشكل ١٧ الرسم في الوسط] .



الشكل ١٧: تعرف الحروف باستخدام قناع هو عبارة عن صورة حقيقية للحرف المطلوب .



الشكل ١٨: تعرف الحروف باستخدام قناع مثل محولة الحرف المطلوب.

وإذا كان الجسم المراد قراءته عبارة عن مصفوفة حروف، فإننا نحصل على بقعة ساطعة لكل حرف من الحروف A، ولا نحصل على مثل ذلك للحروف الأخرى (الشكل ١٧ الرسم السفلي). أما إذا احتوى القناع على محولة فورييه بَدَل الصورة الهندسية للحرف فإننا نحصل على صورة حقيقية للحرف بدل بقعة الضوء (الشكل ١٨). ويشكل هذا من ناحية أساسية مثلاً آخر على الترشيح المكانيّ يُشبه بعض الشيء مثلاً السابق على المُشَبِّك بدقائق الغبار أو بدونها (الشكل ٦)، وهو أيضاً معادلٌ لمغايرة الطورٍ ولتدعيم المغايرة باستخدام الزجاج الضوئي الكرومي.

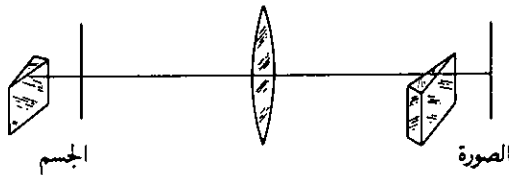
ومن السهل أن ترى كيف يُمكن ضمُّ مثل هذه المنظومة إلى آلية مسح وقراءة ذات سرعة عالية للكشف عن وجود حرف ما في النصّ المفحوص. ولسوء الحظ، فإن بعض الحروف والكلمات توجد «داخل» كلمات أو حروف أخرى مثل حرف F الذي يوجد في E، ومثل حرف C الذي يوجد في O، وحرف P الذي يوجد داخل R و B، ومثل كلمة mile التي توجد في smiles. ويمكن تطبيق المبدأ نفسه على أنواع أخرى من المعلومات: على الحروف الصينية والتسجيلات الزلزالية وبصمات الأصابع مثلاً.

وهناك العديد من الصعوبات التي ما زالتْ تعترضُ طريقَ جعلِ الآلاتِ القارئةِ الصحيحةِ حقيقةً واقعةً. ومن حُسنِ الخطِّ، فإنَّ الحروفَ من أحجامٍ مختلفةٍ، شريطة أن تتماثل في ماعدًا ذلك، تُغطي نفسَ محولاتِ فوزييه؛ ذلك لأنَّ محولاتِ فوزييه ثابتةٌ من حيثُ تكبيرُها، غيرَ أنَّه ينبغي من قبيلِ التفضيلِ، أن تكونَ منظومةُ تعريفِ الحروفِ ثابتةً دورانياً، أي أنها ممكنة على الأقلَّ رياضياً بتحويلِ ميلنِ Mellin transformation. ذلك أنَّ الصعوبةَ العظمى ستقومُ بكلِّ تأكيدٍ عندما نُحاولُ قراءةَ معنى حَرفٍ وُضِعَ في صيغِ طباعةٍ مختلفةٍ: فالحرفُ A يمكنُ طباعتهُ مثلَ A، A، A، A، وفي عددٍ لا متناهٍ من البدالِ عندَ كتابتهِ يدوياً.

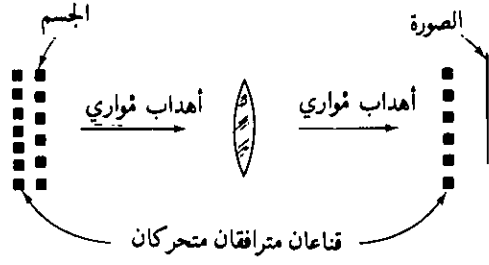
التبيينُ الفوقي Super-resolution

لا يوجدُ هنالكَ منظومةٌ بصريةٌ لها قدرةٌ تبيينٍ غيرُ محدودةٍ؛ فحدُّ التبيينِ يقرَّرُ بصورةٍ أساسيةٍ بالحيود. وبلغةٍ دوالِّ النقلِ، لا يوجدُ هنالكَ منظومةٌ تنقلُ تواتراتٍ مكانيةً أعلى من حدٍّ معلومٍ: فكلُّ منظومةٍ هي شبكةٌ من المرشحاتِ الحاملةِ منخفضةِ التمريرِ . passive low-pass filter

وقد أجريت تجاربٌ مثيرةٌ للتغلبِ على هذا الحدِّ ولتصميمِ منظوماتٍ ذاتِ تبيينٍ أعلى مما يُنتَبأُ به بالنظرية الكلاسيكية، ويقالُ لهذه المنظوماتِ بأنها توفرُ تبييناً فوقياً. فعلى سبيلِ المثالِ يمكنُ جعلُ أطوالِ موجيةٍ أو فوارقٍ طوريةٍ مختلفةٍ تتراكبُ على الجسمِ؛ ومن ثَمَّ لا تكونُ الشدةُ عندَ أيةِ نقطةٍ في الجسمِ متوقفةً على الموقعِ فحسبُ بلْ أيضاً على الطولِ الموجيِّ. ولذا يتمُّ استبدالُ المعلوماتِ اللونيةِ بالمعلوماتِ المكانيةِ (في بُعدٍ واحدٍ) أي: ش (س) ← ش (λ)، وهذا الاستبدالُ هو في حقيقتهِ عمليةٌ ترميزٍ يمكنُ تحقيقهَ بإسفينٍ أو موشورٍ مُتراكِبٍ على الجسمِ (الشكل ١٩).



الشكل ١٩: مبدأ التبيين الفوقي باستخدام الترميز اللوني.



الشكل ٢٠ : التئين الفوقي باستخدام أهداب مُواري .

وتُفكَّ المعلومات decode عِنْدَ المستقبل باستخدام إسفينٍ مماثلٍ للذي استُخدم في الترميز coding؛ فتُفكَّ الرسالة بذلك في صورة أجزاءٍ مجزأةٍ من الطيف شبيهة بالخطوط في طيف الإمتصاص. إنَّ الأمرَ المثيرَ هنا هو أنَّه من الممكنِ مشاهدة تفاصيل الجسم عند وضع وسط مضطرب بين الجسم والمشاهد طالما أنَّ فيض الضوء المارَّ كافٍ للمشاهدة البصرية أو التسجيل الفوتوغرافي*؛ ذلك لأنَّ الأطوال الموجية تُستخدَمُ في هذه الحالة بدلَ الموقع المكاني كبارامتراتٍ معرَّفةٍ.

ويمكنُ بدلَ اللونِ استخدامَ أهدابٍ مُواري+؛ فيوضعُ مُشبكاً رونشي في موضعين مترافقين في فراغَي الجسم والصورة، ثمَّ يُضاءُ الجسمُ بضوءٍ يتغيَّرُ شدتهُ دورياً، فنحصلُ على ظاهرة مُواري من تراكبِ تواتراتِ الجسم الأصلي والتواتراتِ الاصطناعية المضافة بالمرشحة. وهكذا تشكُلُ أهدابُ مُواري الإشارة المدخلة (الشكل ٢٠).

وبالطبع فإنَّ نمطَ مُواري ليس صورةً للجسم؛ ولذا ينبغي فكُّهُ أولاً. ويتمُّ هذا بقناع ثانٍ مماثلٍ للأول يتحرَّكُ في المستوى المترافق، وذلك لاسترجاع التواتراتِ المكانية الأصلية للجسم من فرقِ التواترِ الذي مرَّ في المنظومة. فعلى سبيلِ المثالِ فإذا كانت دالَّةُ نفاذية الجسم:

$$ت (س) = جتا ٢ ط \gamma م س،$$

ودالَّةُ نفاذية القناع الذي تواتره المكاني $\gamma ن$ هي:-

$$ق (س) = جتا ٢ ط \gamma ن س،$$

*A. I. Kartashev, "Optical Systems with Enhanced Resolving Power," *Optics and Spectroscopy* 9 (1960), 204-206.

†W. Lukocz, "Optical Systems with Resolving Powers Exceeding the Classical Limit," *J. Opt. Soc. Am.* 56 (1966), 1463-72.

فإنَّ الإشارةَ المدخلةَ في حالةِ كونِ الجسمِ والقناعِ متوازيين هي:-

$$r(s) = t(s) - q(s)$$

$$\frac{1}{p} = [جنا ط (\gamma + \gamma) - جنا ط (\gamma - \gamma)]$$

$$[س] \dots\dots [١٠-٣:٤]$$

وتشتملُ المعادلةُ الأخيرةُ على مجموعِ التواترين $\gamma + \gamma$ وعلى فارقِ التواترِ بينهما $\gamma - \gamma$. وكما يلاحظُ، ففارقُ التواترِ هو تواترُ أهدابِ موري.

افترضْ أنَّ المنظومةَ البصريةَ لا تُمرَّرُ إلاَّ التواتراتِ المكانيةَ دونَ حدِّ اعتباطيٍّ γ ، حيثُ $|\gamma| \geq \gamma$ ؛ فتواترُ الجسمِ γ لا يمكنُ تبيُّنه إذا كانت $\gamma < \gamma$ ؛ لكنَّ فارقَ التواترِ $\gamma - \gamma$ سوفَ يُمرَّرُ لأنَّ:-

$$[١١-٣:٤] \dots\dots |\gamma - \gamma| \geq \gamma$$

ومن ثَمَّ يحرِّكُ القناعانِ في المجالِ جانبياً وعمودياً على خطوطِ المشبكِ وفي تناوُعٍ تامٍّ. ففي حينِ يُمرَّرُ القناعُ ١ في فراغِ الجسمِ فارقَ التواترِ، يُعطي القناعُ ٢ فراغَ الصورةِ تواترَ المجموعِ ؛ ولذا يستعيدُ القناعُ ٢ التواترَ المكانيَّ الأصلي γ للجسمِ من فارقِ التواترِ:-

$$[١٢-٣:٤] \dots\dots \gamma = \gamma + (\gamma - \gamma)$$

وتكونُ النتيجةُ أنَّه يمكنُ تمريرُ التفصيلاتِ التي لا يمكنُ تبيُّنها بالمنظومةَ.

اقتراحات لقراءات اضافية

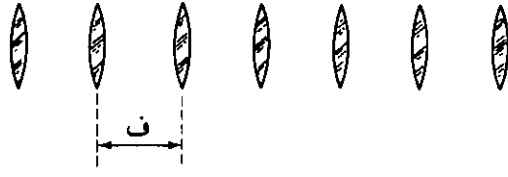
A. H. Bennett, H. Jupnik, H. Osterberg, and O. W. Richards, *Phase Microscopy. Principles and Applications* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1951).

R. G. Casey and G. Nagy, "Advances in Pattern Recognition," *Scientific American* 224 (April 1971), 56-64.

- L. J. Cutrona, E. N. Leith, C. J. Palermo, and L. J. Porcello, "Optical Data Processing and Filtering Systems," *IRE Trans. Info. Theory* (June 1960), 386-400.
- J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1968).
- R. K. McDonald, "Optics and Information Theory," *Physics Today* **14** (July 1961), 36-41.
- D. McLachlan, Jr., "The Role of Optics in Applying Correlation Functions to Pattern Recognition," *J. Opt. Soc. Am.* **52** (1962), 454-59.
- J. R. Meyer-Arendt, "Optical Instrumentation for the Biologist: Microscopy," *Applied Optics* **4** (1965), 1-9.
- A. R. Shulman, *Optical Data Processing* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1970).

المسائل

- ١-٣: ٤ (أ) بَيِّنْ كَيْفَ يَتَغَيَّرُ نَمَطُ الْحَيُودِ عِنْدَ تَحْرِيكِ الثُّقُوبِ فِي الشَّكْلِ ١ إِلَى الْأَعْلَى مَسَافَةً تُسَاوِي ضَعْفَ عَرْضِ الشَّقِّ.
- (ب) بَيِّنْ كَيْفَ يَدَوِّرُ النَّمَطُ إِذَا مَا أُدِيرَتِ الشُّقُوقُ فِي اتِّجَاهِ عِقَارِبِ السَّاعَةِ؟
- (ج) مَاذَا تَرَى فِي حَالَةِ تَضْيِيقِ الشَّقِّ فَأَكْثَرَ؟
- ٢-٣: ٤ أَخِذْ أَمْعِنِ الْإِعْتِبَارَ التَّحْلِيلَ اللَّوْنِيَّ الَّذِي يَخْدُثُ بِالْحَيُودِ، هَلْ يُمَكِّنُ فَتْحُ الشَّقِّ فِي الشَّكْلِ ٣ بِحَذَرٍ شَدِيدٍ بَحِثْ يَقْبَلُ جُزْءًا مِنَ النِّهَايَةِ الْعُظْمَى مَحْدَثًا بِذَلِكَ تَغْيِيرًا فِي لَوْنِ الصُّورَةِ؟ أَيُّ النِّهَايَاتِ الْعُظْمَى هِيَ الْأَنْسَبُ لِتَجْرِبِ ذَلِكَ؟ وَضَعْ إِجَابَتَكَ.
- ٣-٣: ٤ أَعِدَّتْ مَتَسَلْسَلَةٌ مِنَ الْعَدَسَاتِ الْمُتَمَاثِلَةِ ذَاتِ الْبَعْدِ الْبُورِيِّ الْوَاحِدِ عَ خَلْفَ بَعْضِهَا الْبَعْضُ بِحَيْثُ تَكُونُ الْمَسَافَةُ بَيْنَ أَيِّ اثْنَتَيْنِ مُتَجَاوِرَتَيْنِ مِنْهَا مُتَسَاوِيَةً وَذَلِكَ لِمُعَالَجَةِ الْبَيَانَاتِ الْبَصَرِيَّةِ (الشَّكْل ٢١)؛ فَإِذَا كَانَتْ ف هِيَ الْمَسَافَةُ بَيْنَ عَدَسَتَيْنِ مُتَجَاوِرَتَيْنِ، بَيِّنْ كَيْفَ تَمُرُّ الْأَشْعَةُ الزَّوَالِيَّةُ عِنْدَ حَافَةِ الْعَدْسَةِ عَبْرَ الْمَنْظُومَةِ فِي الْحَالَاتِ التَّالِيَةِ :-



الشكل ٢١

(ج) $f = 2 \text{ ع}$

(د) $f = \text{ع}$

(أ) $f = 4 \text{ ع}$

(ب) $f = 3 \text{ ع}$

٤-٣:٤ في معالجة البيانات البصرية، يلزم تكامل المعلومات في بُعد واحد فقط؛

كذلك يمكن استبدال عدسة أسطوانية بأحدى العدستين الكريتين في جهاز معالجة البيانات (الشكل ٧). فإذا ما أريد تكامل البيانات في اتجاه رأسي فأيّة عدسة كرية ينبغي استبدالها؟ وكيف ينبغي توجيه محور الأسطوانة؟

٥-٣:٤ إذا عانى جسم ما تغيرات في السعة والطور، فكيف تُمثل النهايات العظمى ذات الطور المختلف في مستوى مُحوّلة فورييه؟

٦-٣:٤ افترض أنّ نهايات التداخل العظمى في ميكروسكوب مغايرة الطور قد حُجبت في جهة واحدة فقط؛ فكيف يغير هذا الأمر من الصورة النهائية؟ اشرح إجابتك؟

٧-٣:٤ جسم له تفاصيل صغيرة جداً ($\lambda = 100 \text{ م} - 1$) لا يمكن تمييزها بعدسة تُغطي تبيناً مقداره ١٢ م-١ فقط. جد أقل تواتر مكاني ينبغي أن يكون لقناع ليكمل التبيين الفوقي بظاهرة فورييه ممكنة؟

٨-٣:٤ مصدر ضوئي صغير شدته منخفضة مثل نجم بعيد مثلاً، يُرى بصعوبة عند الغروب أو الفجر؛ بين كيف تزيد المغايرة باستخدام شبيكة دائرة تتألف من قطاعات شفافة ومعتمة متعاقبة؟ وباستخدام كاشف ضوئي كهربائي اذكر التغيرات التي تراها في التيار الناتج في الحالات التالية:-

(أ) إذا كان النجم أكثر لمعانا (ب) إذا كانت السماء عموماً أعتَم (ج) إذا كانت السماء عموماً أسطع. [اقترح هذه المسألة بروس هريك]

الفصل ٤ : ٤

أهلوغرافيا

Holography

(التسجيل الضوئي الكامل)

تتم الاكتشافات غالباً لأن الظروف تأتي مواتية. ومن الملاحظ أن هنالك اكتشافات اكتشفها أشخاص متعددون لا صلة بينهم في وقت واحد؛ لكن هذا الأمر لم يحدث في حالة أهلوغرافيا: فالهلوغرافيا اكتشاف رجل واحد هو دنيش جابور Dennis Gabor * من كلية العلوم والتكنولوجيا الامبراطورية في جامعة لندن. وقد أتى هذا الاكتشاف في وقت لم تكن فيه التكنولوجيا على حال تستفيد منه استفادة تامة، إذ انتظر الأمر سنوات عديدة ولما تم اكتشاف الليزر حتى وجد اكتشاف جابور فرصته الكاملة.

ومثل المحولات الأخرى التي تم بحثها في الفصل السابق، فالهلوغرافيا هي أيضاً عملية تحويل ثنائي البعد. ونتناول هنا أهلوغرافيا في فصل مستقل لكون ذلك مناسباً، إذ يتوافر قدر هائل من المعلومات التي تم إنتاجها بسبب الاهتمام في هذا الموضوع.

إعادة بناء الجبهة الموجية Wavefront Reconstruction

لقد تصوّر جابور أصلاً أهلوغرافيا أو إعادة بناء الجبهة الموجية كما كانت تُسمّى بعد ذلك وسيلةً لتصحيح الزوغانات الكرية الملازمة في الميكروسكوب الإلكتروني. ومن السخرية أن هذا الهدف لم يتحقق بعد؛ غير أن أهلوغرافيا قد أصبحت واحدة من

* دنيش جابور Dennis Gabor (١٩٠٠ -) : مهندس كهربائي وفيزيائي ولد في هنغاريا؛ د.

جابور: «مبدأ ميكروسكوبي جديد»، مجلة Nature، لندن ١٦١ (١٩٤٨)، ٧٧٧-٧٧٨؛ وقد

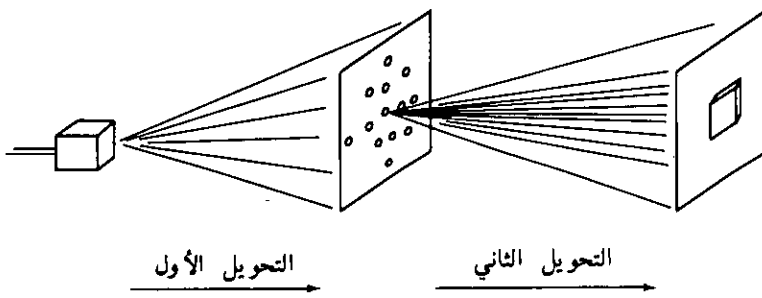
حصل جابور عام ١٩٧١ على جائزة نوبل للفيزياء.

الإنجازات الأساسية الواسعة الانتشار في البصريات في السنوات الحالية. وتكمن أهمية الهلوغرافيا في أنها تقدم البرهان الأكثر إقناعاً على أن عملية تكوين الصور هي حقيقة عملية من خطوتين.

وَيُشتقُّ لفظ الهلوغرافيا من اللفظ اليوناني $\epsilon\lambda\omicron\varsigma$ التي تعني الجميع أو الكل ولفظ $\gamma\rho\alpha\phi\epsilon\iota\nu$ التي تعني يكتب؛ ويمكنُ بذلك تعريفُها بأنها العملية التي يتمُّ بها جمعُ المعلومات البصرية عن جسم ثم خزنُها في طبقة حساسة فوتوغرافية تُسمى الهلوجرام (المُسجِّل الضوئي الكامل)، إذ لا يلزمُ تخزين المعلومات أية عدسة. وفي الخطوة الثانية أي خطوة إعادة البناء تُستخرجُ (تسترجعُ) المعلومات من المسجِّل الضوئي وتُعرضُ بصرياً في شكل صورة واضحة. ومن حيثُ المبدأ فلا يلزمُ أية عدسة في هذه الخطوة أيضاً.

إعادة بناء أشكال Laue diagrams

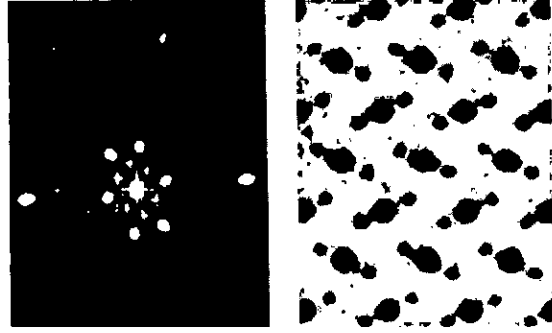
لقد رأينا من قبل أن الصورة هي حصيلة تحويل فورييه الذي يُتجزئ في خطوتين، ويحدث هذان التحويلان في تكوين الصورة الاعتيادي في وقت واحد وبضوء من طول موجي واحد؛ إلا أن هذا الأمر غير لازم. فعلى سبيل المثال يمكنُ أن تتمَّ المحولة الأولى بالأشعة السينية: فلو كان الجسم بلورة، فإنَّ أيَّ تحويلٍ لبنيته البلورية سيكون شكلاً لاو، على الرغم من أن هذا التحويل ليس بالضرورة تحويل فورييه (الفصل ٢: ٧)، ومن ثمَّ فينبغي أن يكون ممكناً من ناحية مبدئية تحويل شكل لاو فيما بعد إلى صورة للبلورة (الشكل ١)



الشكل ١: تكون الصورة في جوهريه هو مجموع تحويلين.

ومن الأسهل تقريرُ هذا الأمرِ بَدَلِ عمله؛ لأنَّ الطبقةَ الحساسةَ الفوتوغرافية لا تَسْتَطِيعُ تَسْجِيلَ طَوْرِ الضَّوءِ؛ وَلِذَا تَصْبِغُ مَعْلُومَاتُ الطَّوْرِ. وقد حَلَّ هذا الإشْكَالَ بُوِيَرَجَر Buerger* الذي حَسَبَ مَسْبَقاً الطَّوْرَ عِنْدَ كُلِّ نَهَايَةٍ مِنْ نَهَايَاتِ لَأَوِ الْعَظْمَى، ثُمَّ وَضَعَ فِي ذَلِكَ الْمَكَانِ فِي الْقَنَاجِ رُقَاقَةً صَغِيرَةً مِنَ الْمَيْكَالَةِ الَّتِي أُمِيلَتْ بِحَيْثُ تَوْفُرُ عِنْدَ إِعَادَةِ الْبِنَاءِ فَارَقَ الطَّوْرَ الصَّحِيحَ.

وَالنَّاتِجَةُ الْحَاصِلَةُ هِيَ صُورَةٌ مَكْبَرَةٌ جَدًّا لِلْبَنِيَةِ الذَّرِيَّةِ لِلْبَلُورَةِ الَّتِي مِنْهَا عُمِلَ ابْتِدَاءً نَمَطُ لَأَوِ. وَتَعْتَمِدُ دَرَجَةُ التَّكْبِيرِ عَلَى نَسْبَةِ الطَّوْلَيْنِ الْمَوْجِيْنِ الْمَعْنِيَيْنِ. وَقَدْ أُمَكِّنَ رُؤْيَا ذَرَاتِ الْحَدِيدِ الْمَرْكَزِيَّةِ وَذَرَّتَيْ الْكَبْرِيْتِ عَلَى جَانِبِي ذَرَّةِ الْحَدِيدِ فِي بِنَاءِ مِثِيلٍ لِلْمَارْكَسَيْتِ (FeS_2) كُبَّرَ ٦,٢ × ١٠ مرةً (الشَّكْلُ ٢ - الرَّسْمُ إِلَى الْيَسَارِ).



الشَّكْلُ ٢: إِعَادَةُ بِنَاءِ الْمَارْكَسَيْتِ FeS_2 إِلَى الْيَسَارِ وَإِعَادَةُ بِنَاءِ ذَرَاتِ الْكَرْبُونِ فِي مِثِيلِ الْبَنْزِينِ السَّدَاسِيِّ $\text{C}_6(\text{CH}_3)_6$ إِلَى الْيَمِينِ [الصُّورَةُ الْيُسْرَى مِنْ م. ج. بُوِيَرَجَر، مَجَلَّةُ الْفِيْزِيَاءِ التَّطْبِيقِيَّةِ J. Appl. Physics ٢١ (١٩٥٠)، ١٩٠٩، اسْتُنْشِخَتْ بِأَذْنٍ؛ أَمَّا الصُّورَةُ الْيَمْنَى فَهِيَ لِلْمُؤَلِّفِ].

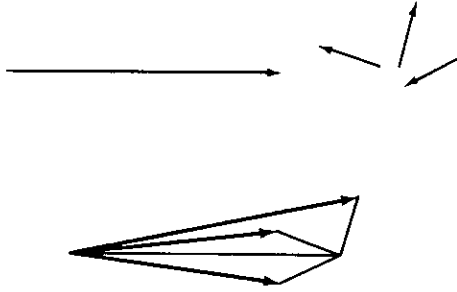
وَتُمَثِّلُ النُّقَاطُ الدَّاخِلِيَّةُ السَّتُّ فِي الشَّكْلِ ٢ (إِلَى الْيَمِينِ) حَلَقَةَ الْبَنْزِينِ السَّدَاسِيَّةِ فِي جُزْئِيٍّ مِثِيلِ الْبَنْزِينِ السَّدَاسِيِّ $\text{C}_6(\text{CH}_3)_6$ ؛ وَقَدْ تَمَّ إِعَادَةُ هَذَا الْبِنَاءِ مِنْ نَمِطِ حَيُودِ فِرُونْهوفرِ النَّاشِيءِ عَنْ رَسْمِ لِلْبَنِيَةِ الْجَزْئِيَّةِ لِذَلِكَ الْمَرْكَبِ أَخَذَ بِشَيْثِيَّةِ عَيْنِي الذَّبَابَةِ الَّتِي

*M. J. Buerger, "Generalized Microscopy and the Two-Wavelength Microscope." J. Appl. Physics 21 (1950), 909-17.

تتألف من نسقٍ ثنائي البعد من العدسات الصغيرة العديدة (التي يبلغ عددها في هذه الحالة مئة) مكونة بذلك مئة صورة إلى جانب بعضها البعض.

شرط الأرضية المتحالفة أو الحزمة المرجعية

أنجز جابور التقدم المصيري في هذا الصدد، فَبَيَّنَ أنه يلزم لإعادة بناء أي جسم (وليس بالضرورة بلورة)، ومن دون معرفة العلاقات الطورية، «أرضية متحالفة»؛ فالفيلم الفوتوغرافي كما قيل من قبل لا يَسْتَطِيع تسجيل طور الضوء مثله في ذلك مثل أي كاشف للطاقة الإشعاعية، فهو يُسَجِّلُ الشدة فقط. ولكن الطور يمكن ضبطه بضم الضوء المشتت من الجسم إلى ضوء الأرضية الإضافي بالتداخل؛ وإذا ما أريدَ لهذين الجزئين من الضوء أن يتداخلا، فلا بُدَّ أن يكونا متحالفين بشكل كاف. ومن هنا يظهر شرط الأرضية المتحالفة Coherent background. وَحَتَّى لو كانت سعات الإشارات موزعة عشوائياً كما هي حال الإشارات بعد حيودها من جسم غير منتظم، فإنَّ وجودَ سعة قوية للأرضية الضوئية تجعلُ محصلة المتجهات تبدو متشابهة تقريباً (الشكل ٣).



الشكل ٣: اضافة ارضية قوية (الرسم العلوي الى اليسار) الى الإشارة عشوائية الطور (الرسم العلوي الى اليمين) يعطي محصلة متجهات متشابهة (الرسم السفلي)

فكيف يمكن الحصول على مُسَجِّلٍ ضوئي كاملٍ ومرصٍ أي هلوغرام من إشارة شدتها منخفضة ولا سيما في حضور أرضية ضوئية ساطعة؟ ويعود سبب صعوبة ذلك إلى أنَّ سعات الضوء المتخالف هي التي تُجمَع وليس الشدات. فعلى سبيل المثال، فقد تكون شدة

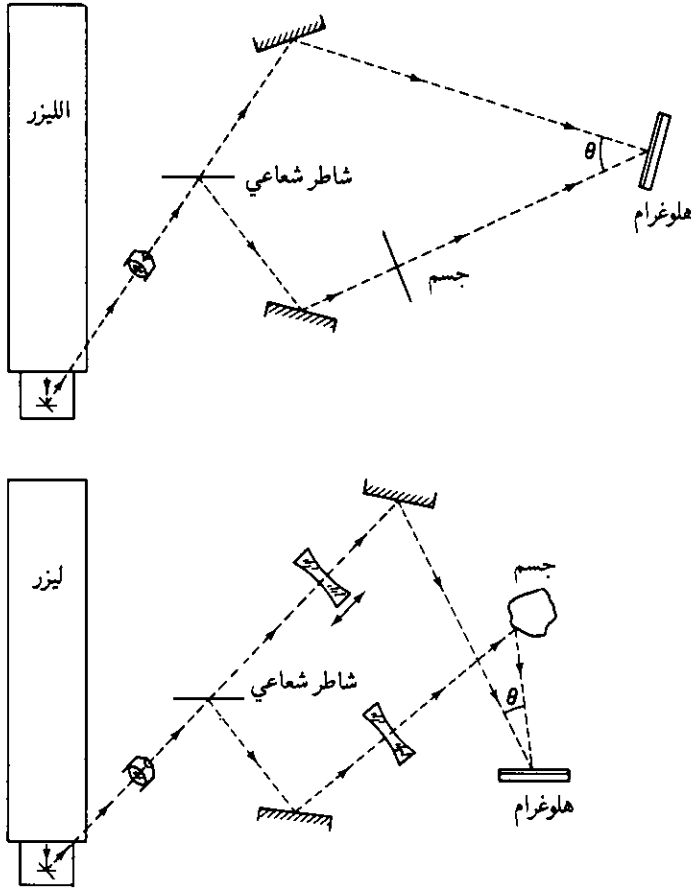
الإشارة $\frac{1}{10}$ من شدة الأرضية الضوئية؛ إلا أن سعتها تبلغ ١٠٪. وباعتبار الحدين في المثال الذي أعطاه جابور وبأخذ حزمتين من الضوء متحدتين في الطور، نجد أن محصلة الشدة تتغير من $^2(0,1+1) = 1,21$ الى $^2(0,1-1) = 0,81$ ، أي إلى درجة كافية لحدوث مغايرة عالية معقولة في المسجل الضوئي الكامل. ومن ناحية عملية ينبغي أن تتردد شدة الأرضية بين ثلاث مرات وإلى ما لا يزيد على عشر مرات قدر شدة الإشارة.

انتاج الهلوغرام (المسجل الضوئي الكامل)

من محددات خطة جابور أنه من السهل الحصول على هلوغرام من جسم كحرف مُعْتَمِد على أرضية شفافة، بينما لا يمكن الحصول على هلوغرام من حُرُوف شفافة على أرضية معتمة. وعلاوة على ذلك نحصل في العادة على صورتين تَوَافُقِيَّتين في عملية إعادة البناء. ومن الممكن تجنب هاتين المشكلتين في هلوغرام ليث-أوباتنيك Leith-Upatnieks الذي يُعرف أيضاً بهلوغرام المرجع المائل offset - reference؛ ففي هذا الهلوغرام لا تمرُّ الحزمة المرجعية مباشرة عبر الجسم وإنما تضاف على حدة في زاوية مائلة بَدَل اشتراكها مع الحزمة الإشارة في محور واحد.

وتوجد هنالك طرق عدة لإنجاز هذا الأمر؛ إذ يتم الحصول أولاً على ضوء من مصدر مناسب ثم يقسم إلى جزئين. ولا يشترط أن يكون الضوء من ليزر؛ غير أن الليزر بما له من سطوع وتحالف، ولكونه أحادي اللون، يجعل الحصول على الهلوغرافيا أمراً أسهل بكثير؛ ثم يمرر أحد الجزأين عبر الجسم أو يجعل تنعكس عنه بينما يمرر الجزء الآخر من طريق آخر، وأخيراً يتحدان عند الفيلم الفوتوغرافي (الشكل ٤).

وفي العادة نحتاج إلى شبيثة ميكروسكوب لنشر الحزمة الضوئية وإلى شاطئ شعاعي وعدة مرايا مستوية تُثبت جميعها على قاعدة ثقيلة، كذلك يمكن الاستعانة بعدستين مفرقتين: إحداهما متحركة لمطابقة شدتي الإشارة والحزمة المرجعية مطابقة صحيحة، فتتداخل



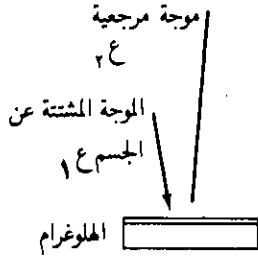
الشكل ٤ : تجربة لانتاج هلوغرام لجسم شفاف (الرسم العلوي) وجسم معتم (الرسم السفلي). ويجب جعل الزاوية θ صغيرة نوعاً ما.

الحزمتان داخل الطبقة الحساسة الفوتوغرافية وخارجها مكونتين أهداباً متقاربة جداً تُشكّلُ معاً الهلوغرام.

نظرية الهلوغرافيا

لقد وَصَفَ العديدُ من المؤلفين * نظرية الهلوغرافيا؛ فالهلوغرام من حيثُ المبدأ تُسجِلُ

* beamsplitter, and several plane wave-fronts," *Proc. Roy. Soc. London* **A197**, (1949), 454-87; "Microscopy by Reconstructed Wave Fronts: II," *Proc. Physical Soc.* **B64** (1951), 449-69. Also see J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (New York: MacGraw-Hill Book Company, 1968.). E. J. Feleppa, "Biomedical Applications of Holography," *Physics Today* **22** (July 1969), 25-32. E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront Reconstruction with Continuous-Tone Objects," *J. Opt. Soc. Am.* **53** (1963), 1377-81. E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects," *J. Opt. Soc. Am.* **54** (1964), 1295-1301.



الشكل ٥: موجتان مسهمتان
تكونان هلوغراما.

لنميط تداخلِيّ. ويحدثُ التداخلُ بينَ سعة موجة الإشارة ع_١ المشتتةً بالجسم وسعة الموجة المرجعية ع_٢؛ فتترابط السعتان مكونتين أهداب التداخل التي تُسجّل بدورها على فيلم فوتوغرافي مُنتجةً الهلوغرام (الشكل ٥).

ولأنّ شكلَ نمط التداخل يعتمدُ على الطور وعلى السعة النسبية للأمواج المسهمة، وجب أن تبقى هذه الأمواج في أثناء التسجيل على علاقة طوريّة ثابتة أي أنها ينبغي أن تتحالف.

ولدى وصولها الفيلم، تتضام الموجتان المسهمتان لتُغطيا ع_١ + ع_٢؛ غير أنّ الفيلم يُسجّل الشدة فقط. ولذا فإنّ الشدة الناتجة في المستوى س ص هي:-

$$\text{ش (س، ص)} = (ع_١ + ع_٢)^2 = (ع_١ + ع_٢)(ع_١ + ع_٢)^* = |ع_١|^2 + |ع_٢|^2 + ع_١^* ع_٢ + ع_٢^* ع_١ \dots\dots [١-٤:٤]$$

وتشيرُ العلامة * إلى المترافق المركب Complex conjugate؛ كذلك فإنّ النفاذية ت للطبقة الحساسة الفوتوغرافية عند تعريضها للشدة ش لفترة زمنية Δ ز تكون:-

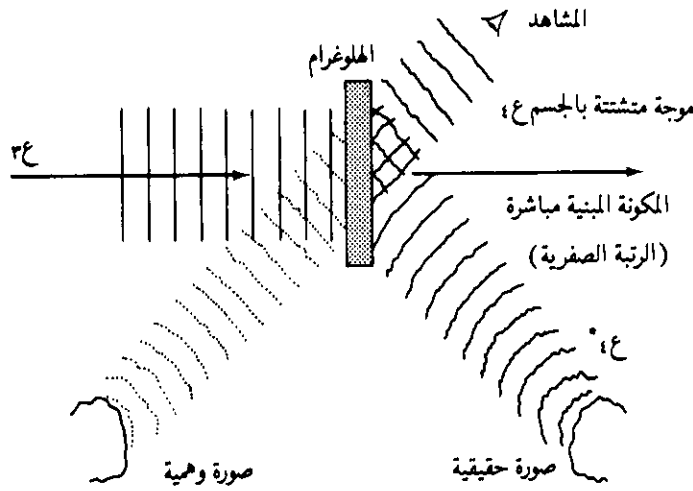
$$\text{ت} = \text{ض}^{-\gamma/\gamma} \dots\dots [٢-٤:٤]$$

حيث ض هو التعريض (ض = ش Δ ز)، و γ هو ميل منحنى استجابة الطبقة الحساسة أو منحنى هيرتز-ذرفيلد؛ ويظهرُ العامل $\frac{1}{\gamma}$ في الأسّ لأننا نُشيرُ مرةً أخرى إلى السعة وليسَ إلى الشدة التي هي مربعُ السعة. ولذلك، ولفترة زمنية ثابتة Δ ز، نجدُ أنّ:-

$$\text{ت}^\alpha \text{ ش}^{-\gamma/\gamma} = |ع_١|^2 + |ع_٢|^2 + ع_١^* ع_٢ + ع_٢^* ع_١ \dots\dots [٣-٤:٤]$$

لقد رأينا سابقاً (في الشكل ٣) أنّ $|ع_١|^2 + |ع_٢|^2$ أي شدة الحزمة المرجعية ينبغي أن

تكونَ كبيرة مقارنةً مع الحدين الأخيرين ع_١ ع_٢* + ع_٢ ع_١* اللذين يُمثّلان الإشارة.



الشكل ٦: عملية إعادة البناء: الهولوجرام يحيد الضوء الساقط ع ٣ متسبباً في ظهور صورة حقيقية وصورة وهمية.

وفي عملية إعادة البناء، تُدخل موجة ثالثة ع ٣، وتُجعل هذه الموجة تسقط على الهولوجرام (كما في الشكل ٦) منتجة موجة ع ٤، تُعدّل بالهولوجرام:

$$ع ٤ = ع ٣ ت (س، ص) \dots\dots [٤-٤:٤]$$

وباعتبار جزء الإشارة فقط من الضوء المُحَيّد، نلاحظ أن:-

$$ع ٤ \propto ع ٣ ع ١ ع ٢ + ع ٣ ع ١ ع ٢ \dots\dots [٥-٤:٤]$$

وإذا كانت سعة حزمة إعادة البناء ع ٣ مماثلة للحزمة المرجعية ع ٢ أو على علاقةٍ طوريّةٍ ثابتةٍ معها، فإنَّ الحدود في المعادلة [٥-٤:٤] تصبح ثابتةً، ونحصلُ على:-

$$ع ٤ \propto ع ١ \dots\dots [٦-٤:٤]$$

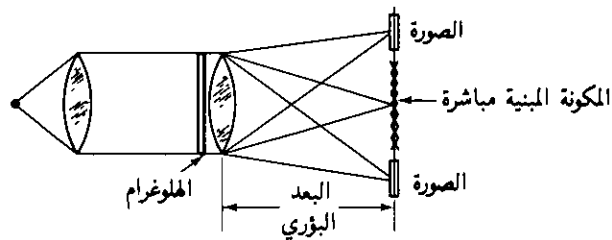
وهكذا يُشبهُ الضوء المُحَيّدُ بالهولوجرام حقيقة السعة المشتتة ابتداءً بالجسم، أي أن الصورة هي إعادة بناء للجسم.

وإذا كانت e_1, e_2 موجتين مستويتين، فإن $e_1 = e_2^*$ ؛ وتتكون صورتان: حقيقية ووهية، كلٌّ منهما ذات تكبير قدره واحد. أما إذا أضيء الهلوجرام بموجة كرية، فإن الصورة الحقيقية تكبر في حين تصغر الصورة الوهية.

ويمكن تفسير الصورة الوهية بسهولة؛ فعزّمة إعادة البناء، عندما تمر في الهلوجرام، تأخذ السعة والطور من الضوء الصادر من الجسم الأصلي، ولذا تبدو أنها تأتي من نقاط خلف اللوحة وعلى بُعْدٍ مساوٍ لبُعْدِ الجسم الأصلي وقت أخذ الهلوجرام. أما الصورة الحقيقية، في موقعها واتجاهها، فهي تشبه صورة مرآة للصورة الوهية المنعكسة في مستوى الهلوجرام. وتحسن عملية إعادة البناء إذا ما أميل الهلوجرام قليلاً لكي يُوقَر (يقدم) مقطعاً عرضياً أكبر في اتجاه الصورة الوهية أو الحقيقية كما يستلزم الأمر.

هلوغراما فرونهورف وفرنل Fraunhofer and Fresnel holograms

لقد افترضنا حتى الآن أن الهلوجرام أي جسم نُقْطِي مُمَثِّل خصائص لا تختلف عن خصائص لوحة المناطق؛ ويُسمى هذا الهلوجرام هُلوغراماً فَرْنِل، فلوحة المناطق على سبيل المثال هي هُلوغرام فَرْنِل لنقطة واحدة، فهي حقاً تعيد تركيز الضوء، كما تتذكر، في النقطة. وإذا لم تكن لها مثل هذه الخصائص التركيزية فهناك حاجة إلى عدسة لتركيز الجبهات الموجية المارة في الهلوجرام في صورة؛ ويُسمى هذا الهلوجرام هُلوغراماً فرونهورف أو هُلوغراماً مُحَوَّلَةً فورييه (الشكل ٧). ويُحصل على هُلوغرام فرونهورف بصورة أفضل بوضع



الشكل ٧: إعادة بناء هُلوغرام مُحَوَّلَةً فورييه.

لوحة ناشرة كالزجاج خفيف الصقل في مستوى يسبق سقوط الضوء على الجسم ه؛ فتصبح لوحة التشتت والجسم الذي قد يكون شفافية معاً الآن الجسم. وفي عملية إعادة البناء من هذا الهلوغرام، فإن الصورة الوهمية تستنسخ لوحة التشتت؛ ولكن لما كانت لوحة التشتت لا تحوي أي تفصيل هام، فإنها تخدم مجرد جعل الشفافية مرئية عبر الهلوغرام كله.

وفي عملية إعادة البناء كما مرّ سابقاً، تتكون صورتان ولكنهما تقعان في مالا نهاية، وهما تقعان متماثلتين حول الرتبة الصفريّة كما هو مبين. وتبدو الصورة الوهمية الناتجة من عملية إعادة البناء مختلفة عن الصورة الوهمية العادية: فهي مجسّمة من دون الحاجة إلى الرؤية ذات المحورين، كما أنها تظهر انحراف المنظور parallax بين الأجزاء القريبة والبعيدة.

المتطلبات الفوتوغرافية

تستخرج المسافة بين الأهداب في الهلوغرام من معادلة المحزوز العادية: $\theta = n \lambda$ ؛ وإذا كانت حزمة الإشارة عند أخذ الهلوغرام تعمل زاوية كبيرة مع الحزمة المرجعية، فإن نمط الأهداب الناتج يكون دقيقاً جداً مما يتطلب فيلماً فوتوغرافياً ذا تبيين عال جداً. ويوفر التبيين الأعلى (حوالي ٢٠٠٠ خط/مم) حالياً بأفلام كوداك ٦٤٩ ف أو GH-٦٤٩. أما سرعة ASA المكافئة فهي منخفضة (حوالي ٠,٣). وفيلم كوداك SO-243 تبيين يتردد بين ٥٠٠ و ١٠٠٠ خط/مم، كذلك فقد لقي فيلم أجفا - جيفرت 10E70 وفيلم البولارويد 55P/N تطبيقات واسعة أيضاً.

إن كل جزء من الهلوغرام يفضّ النظر عن صغر حجمه يستنسخ المنظر بكامله؛ ولكن كلما صغرت الأجزاء، نقص التبيين، لأن التبيين يتوقف على فتحة المنظومة المصوّرة.

ومن الخصائص المثيرة أيضاً أن عملية إعادة البناء لا تغطي الفيلم السالب؛ وإذا ما عملت نسخة عن الهلوغرام، وقُلب الهلوغرام من الأبيض إلى الأسود أو العكس فإن الصورة المبنية تبقى موجبة، ولا يمكن تمييزها عن البناء الأصلي باستثناء هبوط صغير في النوعية.

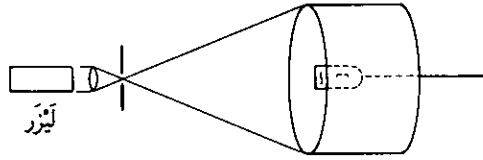
*Leith and Upatnieks, J. Opt. Soc. Am. 54 (1964).

ويعود سبب ذلك إلى أن معلومات الهلوجرام تُخزن في شكل فراغات بين الأهداب وفي شكل مغايرة الأهداب، وهما لا يتغيران بعكس الامتصاصية.

وتختلف هلوجرامات الطور في سُمك المادة الشفافة بَدَل اختلافها في الكثافة، ويمكن صنُّعها بِقَصْر bleaching الهلوجرامات العادية بالطريقة الترموبلاستيكية أو بـخزنها في بلورات معينة كما سيُنَحِّث قريباً.

أنواع خاصة من الهلوجرامات

يمكنُ صنُّع هلوجرامات تَغطِّي المجالَ تَغطيةً كاملةً أي لـ ٣٦٠°. وفي هذه الحالة يوضع الفيلمُ داخل أسطوانة بحيث تكون طبقته الحساسة باتجاه الداخل * (الشكل ٨)، كما



الشكل ٨: الهلوجرافيا ذات المجال ٣٦٠°

يوضع الجسم في مركز الأسطوانة. أمّا الضوء الذي ينبعث من لَيَزَر والذي ينتشرُ بشيئية ميكروسكوب ذات قوة عالية فيسقطُ جزئياً على الجسم ويتشتت نحو الفيلم، في حين تسقطُ بقيه الضوء مباشرة على الفيلم موفرةً بذلك المرجع. ويُعملُ الفيلمُ في شكل حَلَقَةٍ لتسهيل النظر أو الرؤيا؛ إذ يُشاهدُ بضوء من قوس الزئبق أو الصوديوم مُظهِراً بذلك إعادة البناء في أي اتجاه مرغوب فيه.

وعندما تكون الطبقة الحساسة سميكة بصورة كافية، فإنه يمكن تسجيل عدة هلوجرامات لمنظرٍ واحدٍ في وقتٍ واحدٍ: كُلُّ منها بضوءٍ مختلف اللون، وكُلُّ منها يُكوّنُ مجموعته الخاصة

*T. H. Jeong, P. Rudolf, and A. Lockett, "360° Holography," *J. Opt. Soc. Am.* 56 (1966), 1263-64.

من الأهداب* . وإذا ما أُريدَ بناءُ هذا الهلوغرامِ الحجميِّ بالضوءِ الأبيضِ، فإنَّ إعادةَ البناءِ سيبدو بِلَوْنِهِ التامِ.

والهلوغراماتُ الاصطناعيةُ عبارةٌ عن هيئاتٍ من الخطوط والمنحنيات التي تُرَسَّمُ بالحرز والقلم+؛ فلوحةُ المناطقِ مثلاً هي هلوغرامٌ لنقطة. كذلك يمكنُ توليدُ الهلوغراماتِ أيضاً بالحاسبة الإلكترونية†. كذلك يمكنُ اعتبارُ حتى الهلوغرامِ الاعتيادي، الذي يفضَّلُ أن يكونَ مُسَجَّلَ تداخلٍ ذا خطوطٍ متقاربةٍ جداً هلوغراماً يُخَصَّلُ منه على إعادةِ البناءِ المطلوبة§.

تطبيقات الهلوغرافيا

للهلوغرافيا جوانبٌ عدة؛ وقد بدأ تأثيرُها في التصويرِ الفوتوغرافي والميكروسكوبية والفلك وتعرف الحروف يُعْطَى بالكادِ ثماره. ولعلَّ أهمَّ تأثيرٍ لها هو قيمتها في توجيه الكشفِ إلى أنَّ حقيقةَ عمليةِ تكوينِ الصورة تتألف من عمليتين متميزتين من تحويلٍ فورييه أو فِرْنِلْ.

أهلوغرافيا الصوتية

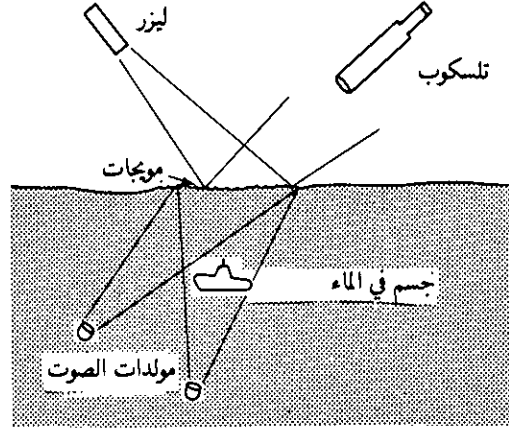
لقد اختُرِعَ إعادةُ بناءِ الجبهة الموجية أضلاً لتصحيح الزوغانِ في الميكروسكوب الإلكتروني، وقد وُسِّعَ فيما بعدُ ليشملَ منطقةَ الأشعة السينية والأشعة تحت الحمراء العالية. كذلك فقد عُمِلَتْ حتى هلوغرامات ميكرويفية من دونِ إضافة الكثير الجديد إلى المبدأ الذي تَعْمَلُ عليه الهلوغرامات. ويمكنُ تحقيقُ الهلوغرافيا الصوتية بتثبيتِ مُحَوِّلٍ للطاقة الصوتية تحتَ الماءِ قريبين من بعضهما بعضاً بحيثُ يمرُّ الصوتُ من أحدهما في جسمٍ في الماء (الشكل ٩). ويكونُ الهلوغرامُ عبارةً عن نمطِ الموجات المتكونِ على سطحِ الماء من تداخلِ

*Y. N. Denisyuk, "On the reproduction of the optical properties of an object by the wave field of its scattered radiation.," *Optics and Spectroscopy* 15 (1963), 279.
L. H. Lin and C. V. LoBianco, "Experimental Techniques in Making Multicolor White Light Reconstructed Holograms," *Applied Optics* 6 (1967), 1255-58.

†G. L. Rogers, "Artificial Holograms and Astigmatism," *Proc. Roy. Soc. Edinburgh A* 63 (1951-52), 313-25.

‡A. W. Lohmann and D. P. Paris, "Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer," *Applied Optics* 6 (1967), 1739-48.

§O. Bryngdahl and A. W. Lohmann, "Interferograms are Image Holograms," *J. Opt. Soc. Am.* 58 (1968), 141-42.



الشكل ٩: ألهولوجرافيا الصوتية

الخزمتين الصوتيتين. وباستخدام ضوء الليزر المنعكس عن سطح الماء يمكن الحصول حالياً على إعادة البناء^٩.

تحليل الاجهاد Strain Analysis

تُسجَلُ الهلوجرامات عادةً تحت ظروف من الاستقرار الميكانيكي العالي؛ ولذا يمكن الكشف عن أية انحرافات عن ذلك الاستقرار. وقد أدى هذا الأمر إلى استخدام الهلوجرافيا في دراسة التوترات والإجهادات^{١٠}، والتشوهات السطحية الناشئة عنها. كما تم عمل هلوغرامات للأجسام المهتزة^{١١}؛ وفي هذه الحالة يكون البناء قد تراكب عليه قنطورات الاهتزازات ذات السعة الثابتة.

توزيع حجم الدقائق

ويمكن بالهلوجرافيا تعيين حجم قطرات الماء والدقائق الأخرى وكذلك توزيع حجمها. ويجب أن تُفحص هذه الدقائق آنياً نظراً لأنها في حركة دائمة، أي أنه يجب تصويرها فوتوغرافياً. إلا أنه من المستحيل بالتصوير الفوتوغرافي العادي التركيز على دقيقة واحدة مدة

^٩A. F. Metherell, H. M. A. El-Sum, J. J. Dreher, and L. Larmore, "Introduction to Acoustical Holography," J. Acoust. Soc. Am. 42 (1967), 733-42.

^{١٠}K. A. Haines and B. P. Hildebrand, "Surface-Deformation Measurement Using the Wavefront Reconstruction Technique," Applied Optics 5 (1966), 595-602.

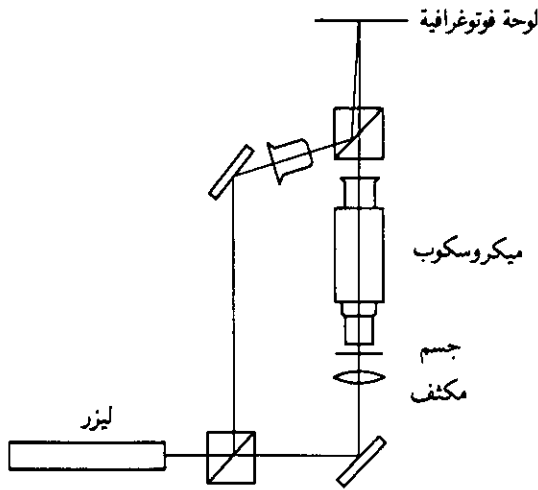
^{١١}R. L. Powell and K. A. Stetson, "Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction," J. Opt. Soc. Am. 55 (1965), 1593-98.

كافية لتصويرها، كذلك فمن المستحيل تصوير كل الدقائق دفعة واحدة.

ولكن الأمر مختلف بالهلوغرافيا؛ إذ يُعملُ الهلوغرام بالليزر النابض pulsed laser مما يُجمد حركة الدقيقة ويسمح للمشاهد بتعد إعادة بنائها أن يفحص على راحته كلاً من الدقائق على حدة، كما يفحص حجمها وتوزيعها المكاني عند لحظة أخذ الهلوغرام لها[‡].

المجهرية (الميكروسكوبية) الهلوغرافية

يوجد للميكروسكوب العادي ذي القوة العالية عمق مجال صغير جداً؛ أما الميكروسكوب الهلوغرافي، فعلى خلاف ذلك، فله عمق مجال كبير بحيث لا يلزم تهيئته للتركيز أبداً. أضيف إلى ذلك أن عملية إعادة البناء هي ثلاثية الأبعاد في حين أن الهلوغرام يؤخذ على محور واحد فقط. ويشبه الميكروسكوب الهلوغرافي من حيث المبدأ مقياس تداخل ماخ-زندر (الشكل ١٠)، فالضوء المتحالف الآتي من ليزر يُشطر إلى



الشكل ١٠: الميكروسكوب الهلوغرافي

كشرتين غير متساويتين، ثم يقاد الجزء الأصغر ليمر في الجسم في حين يقاد الجزء الأكبر ليدور حول الجسم. وكما هو الحال في الهلوغرافيا العادية، فإن الحزمة ذات الشدة الأخفض

[‡]B. J. Thompson, J. H. Ward, and W. R. Zinky, "Application of Hologram Techniques for Particle Size Analysis," *Applied Optics* 6 (1967), 519-26.

تَحْمِلُ المَعلُومَاتِ بَينَما تَحْمِلُ الحِزْمَةُ ذاتُ الشِدَّةِ الأَعلى الجِزءَ الأَظمَ من الطاقَةِ. وَفي تَصمِيمِ جابور لعمليَّةِ إِعادَةِ البَناءِ تَتَوافَرُ كُلُّ مَعلُومَاتِ الشِدَّةِ والطَوَرِ للبَناءِ، ولِذا نَتَخَلَّصُ من الصُورَةِ المَترافِقَةِ أو «الشِبحِ». و يَتِمُّ هَذا بِاسْتِخدامِ هَلوْغرامِ ثَاني مُتَمِّمٍ مَعَ إِزاحَةٍ طَوَرِ الضَّوءِ بِمَقْدارِ ٩٠° وَمِن ثَمَّ ضُمَّهُ إلى الضَّوءِ الصَّادِرِ من الهَلوْغرامِ الأَصلي بِمَنظُومَةٍ مُواشِيرٍ مَماثِلَةٍ لِشَاطِرِ الشَّعاعِ مِنْ نَوعِ أَبِي •.

خِزَن المَعلُومَاتِ Information Storage

تَسجَلُ الهَلوْغراماتُ عادَةً في الطَبقاتِ الحِساسَةِ الفُوتوغرافيَّةِ؛ غَيرَ أَنَّهُ يَمكِنُ اسْتِخدامُ أوساطٍ أُخرى، مِنْها على سَبيلِ المِثالِ بَلوراتُ نَيوباتِ اللَّيْثيوم LiNbO_3 .

وَتَسْتَطِيعُ البَلُورَةُ الواحِدَةُ أَنْ تُخزِنَ ١٠٠٠ هَلوْغرامِ في مَكعِبِ حِجْمِهِ ١ سم^٣. وَعِندَ إسقاطِ الإِشعاعِ على البَلُورَةِ يَحْدُثُ تَغْيِيرٌ في مُعامِلِ انكِسارِها، فَتَعْمَلُ مِثْلَ وَسْطٍ نَقِيٍّ الطَوَرِ لِلهَلوْغرافيا مُتعدِّدةِ الطَبقاتِ، مِمَّا يَؤدِّي إلى اِزديادِ التَبْيِينِ على ١٦٠٠ خط/مم. وَمِن المَكانِ إِنْجَازُ الخِزَنِ بِضَوءِ لَيزِرِ الأَرْجون ($\lambda = ٤٨٨$ نَم)، كَذلكَ يَمكِنُ القِراءَةُ (أَيِ اسْتِخراجُ المَعلُومَاتِ المُخزَنة) بِنَفسِ الضَّوءِ أو بِضَوءِ لَيزِرِ الهِيلِيوم - النَيون ($\lambda = ٦٣٣$ نَم) ••. وَيُعتَبَرُ خِزَنُ الهَلوْغراماتِ المُتعدِّدةِ في إِطارٍ واحِدٍ من الفِيلمِ أو في بَلُورَةٍ بِمَفرَدِها مَوضُوعاً من المَوضُوعاتِ الَّتِي تُسْتَقْصَى الآنَ بِنِشاطِ.

وَتَتَوافَرُ بَعضُ الأدلَةِ على أَنَّ المَعلُومَاتِ عُمُوماً يَمكِنُ خِزَنُها بِصُورَةٍ أَفضَلِ واسْتِرجاعُها بِفاعِلِيَّةٍ أَعلى في صُورَةِ هَلوْغراماتٍ أو كَمَعلُومَاتٍ مُحولَةٍ بِتَحَوِيلِ فُوريِّهِ بِذلِكَ خِزَنُها في هِئَةِ صُورَةٍ حَقِيقِيَّةٍ؛ وَرُبَّما تَكونُ طَريقَةُ الخِزَنِ هَذهِ هِيَ الطَريقَةُ الَّتِي يَخزِنُ بِها الدِماغُ المَعلُومَاتِ الَّتِي تُسمَّى «الآثارُ المُخلَفةُ engrams»، فَهِيَ على الأَقَلِّ تَعيُنُ في فَهْمِ الفِشلِ النَسيبيِّ لِمَحاوَلاتِ تَحديدِ مَراكِزِ خِزَنِ المَعلُومَاتِ في الدِماغِ وَكونِ إِصاباتِ الدِماغِ الرَئيسَةِ لا تَتَسبَّبُ في عَجْزٍ شامِلٍ يَمكِنُ التَنبُّؤُ بِهِ.

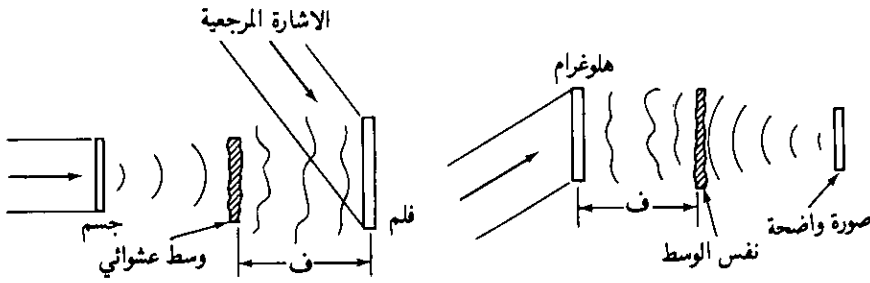
*D. Gabor and W. P. Goss, "Interference Microscope with Total Wavefront Reconstruction," *J. Opt. Soc. Am.* 56 (1966), 849-58. R. F. Van Ligten and H. Osterberg, "Holographic microscope," *Nature* 211 (1966), 282.

**F. S. Chen, J. T. LaMacchia, and D. B. Fraser, "Holographic Storage in Lithium Niobate," *Applied Physics Letters* 13 (1968), 223-24.

تكون الصور عبر الاوساط العشوائية

من المشكلات ذات الاهتمام الراهن مشكلة تكون الصورة عند مرور الضوء في وسط عشوائي مثل الجو المضطرب؛ ومن الواضح أن الصور التي تؤخذ عبر قطعة زجاج في حجرة تكون مشوهة بشدة بحيث لا يمكن التعرف إليها غالباً. ويحدث الشيء نفسه في حالة الهواء المضطرب. ولقد ابتكرت عدة طرق للتغلب على هذه الصعوبة، يستخدم بعضها طريقة الهلوغرافيا. ويُميز جودمان+ على سبيل المثال ثلاثة مواقف:

١. يمر الضوء من الجسم عبر وسط مشوه متحرك مكانياً وثابت زمانياً (مثل زجاج البَرَد)؛ غير أن الحزمة الضوئية المرجعية لا تمر. وتكون النتيجة تكون هلوغرام للأموح الإشارية الزائفة تُضم إليها الأمواج المرجعية غير الزائفة. وإذا ما وضع لغرض إعادة البناء نفس الوسط المشوه أو نسخة عنه في نفس موقعه السابق تماماً، فإن الزوغانات تُلغى ويُحصل على صورة غير مشوهة (الشكل ١١).



الشكل ١١: تكون الهلوغرام وتعويضه عبر وسط مشوه

٢. وبوجود الوسط العشوائي، يُحصل أولاً على هلوغرام لمصدر نقطي؛ ويستخدم الهلوغرام كلوحة مُعَوَّضة. ومن ثم فإذا استبدل جسم ما بالمصدر النقطي ووضع الهلوغرام في نفس موضعه الذي تم فيه تسجيله، فإن التشوهات في الأمواج الأصلية تُمحي وتكون صورة كتلك التي تكون في إعادة البناء الاعتيادي.

٣. وأخيراً تمر الإشارة والضوء المرجعي في الوسط المشوه، بافتراض أن الوسط يوجد مباشرة

†J. W. Goodman, W. H. Huntley, Jr., D. W. Jackson, and M. Lehmann, "Wavefront-Reconstruction Imaging Through Random Media," *Applied Physics Letters* 8 (1966), 311-13.

أمام مستوى التسجيل. ويتركُ تداخلُ الموجتين المشوهتين نمطاً تداخلياً لا يتأثرُ بوجود الوسط المشوه؛ وفي هذه الحالة يمكنُ بناءُ الهلوجرام مباشرة من دون لوحة تفويض.

ومن ناحية عملية، لا يشكلُ الحصولُ على حُزمية مرجعية أية مشكلة ولا سيما عند وجود هدف طيع وعند أخذ الصور عبر الهواء المضطرب. ويمكنُ وصلُ أحد طرفي الهدف بعاكس خلفي زاوي مكعبي إما مباشرة وأما عبر واصلية ممتدة من الهدف. أما في حالة وجود هدف غير طيع، فيمكنُ استخدامُ ومضة قوية منتظمة بعيدة عن الهدف مثل مرجع.

اقتراحات لقراءات إضافية

D. Gabor, "Diffraction Microscopy," *Research, London* 4 (1951), 107-12.

E. N. Leith and J. Upatnieks, "Photography by Laser," *Sci. American* 212 (June 1965), 24-35.

J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1968).

H. M. Smith, *Principles of Holography* (New York: Interscience Publishers, Inc., John Wiley & Sons, Inc., 1969).

M. Françon, *Holographie* (Paris: Masson et Cie., 1969).

J. B. DeVelis and G. O. Reynolds, *Theory and Applications of Holography* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., 1967).

R. J. Collier, C. B. Burckhardt, L. H. Lin, *Optical Holography* (New York: Academic Press, 1971).

المسائل

٤-٤: ١ إذا كانت النسبة بين سعتي الإشارة والمرجع ١: ٤، وإذا كان طور الإشارة أي طور؛ فجد بالرسم المتجهي وبدلالة الطول الموجي أعلى فارق طور يوجد داخل الضوء الساقط على الفيلم الفوتوغرافي.

٤-٤: ٢ عُمِلت عملية إعادة بناء هولوجرام هوفي الحقيقة جزء من الطرف الخارجي للوحة مناطق فرنل (لا يشمل على مركز اللوحة): (أ) فإذا أُريدَ بناء هذا الهولوجرام

باستخدام ضوء متوازٍ، فبين بالاستعانة بشكل شعاعي موقع تكون كل من
الصورتين: الحقيقية والوهية (ب) ماذا ترى عندما تشاهد الهلوغرام بضوء
الشمس غير المرشح؟

٣-٤:٤ أُخِذَتْ الهلوغرامات بضوء ليزر الهيليوم-النيون ($\lambda = 633 \text{ nm}$) على الرتبة
الأولى، فجد الزاوية الحدية بين الإشارة والحزمة المرجعية إذا ما أريد للتواتر
المكاني أن لا يزيد على ٢٠٠ مم^{-١}.

٤-٤:٤ توفر الهلوغرامات تأثيراً مجسماً ثلاثي الأبعاد من دون الحاجة إلى
استريوسكوب (مجسم الصورة)؛ افترض أنه يمكن تغيير حجم الهلوغرام من
دون التأثير في محتواه المعلوماتي؛ بين كيف يؤثر هذا التغيير في الحجم في هذه
الترجمة المجسمة للصورة. اشرح إجابتك.

٥-٤:٤ عند النظر بدقة إلى الفيلم الفوتوغرافي السالب المعالج، يشاهد غالباً أن سطح
الطبقة الحساسة في المناطق التي تعرضت للضوء يرتفع قليلاً عن سطحها
للمناطق غير المعرضة. افترض أن سمك الطبقة ابتدائياً هو ٠,٠٢ مم وأن
متوسط معامل انكسارها هو ١,٣٨. فما النسبة المئوية للزيادة في السمك
التي تلزم لتعطي فارق طور مقداره ١٨٠° للضوء الأحمر الذي طوله الموجي
٦٣٣ nm؟

٦-٤:٤ تظهر شطآن المحيطات عند الجزر والمد المنخفض نمطاً متموجاً يتكون في الرمل
يُشبه تأثير التداخل؛ بين كيف يمكن استخدام هذا النمط مثل هلوغرام،
وبين ماذا تتوقع أن يكون شكل إعادة بنائه؟

أجزاء الخامس

البصريات الكوانتية

(بصريات الكم)

Quantum Nature of Light

ظنَّ إسحق نيوتن قبل ثلاثة قرونٍ تقريباً أن مصدرَ الضوء يرسلُ سَيْلاً مستقراً من الدقائق الصغيرة، وأنَّ الحيودَ والتداخلَ يحدثان بسببِ قوى الجذب أو الثُّغور التي تؤثرُ بها عارضةُ (الجسمُ المعترضُ) في الدقائق. وَقَدْ أَبَقَتِ النظريةُ الموجيةُ على هذه الأفكارِ لبرهةٍ من الزمنِ على الأقل. غَيْرَ أَنَّا نَعْرِفُ اليومَ أَنَّ الطاقةَ الكهرومغناطيسيةَ تتولَّدُ حقاً، وتُسَعُّ وتنتشرُ وتُستقبلُ في صورةِ كَمّاتٍ منفصلةٍ من الطاقةِ تُعرَفُ بالكوانتا.

وتترتبُ نتائجُ هامةٌ على النظريةِ الكوانتية: بعضها لهُ طابعٌ تطبيقي. فتفسيرُ عملِ الليزرِ لا يتمُّ بدونِ ذلك. وأهمُّ من ذلك على كُلِّ حالٍ هُوَ كَمالُ صورةِ البصرياتِ وَجمالُها التي نكسبُها في محاولَتينا فَهَمَ الظواهرِ كالأطيافِ الذرية، الانبعاثِ المُستَحَثِّ، والفلُورةِ والتي تقومُ جميعُها على مفاهيمِ البصرياتِ الكوانتية.

الفصل ٥ : ١

الطبيعة الكوانتية للضوء

صاغ ماكس بلانك عام ١٩٠٠ نظرية تنبأت تنبؤاً صحيحاً بالطيف الذي يتبعه الجسم الأسود المشع. ويقصد بالجسم الأسود أن هذا المشع يمتص كل الطاقة الإشعاعية التي تسقط عليه ولا يعكس شيئاً منها.

ويمكن الحصول على جسم أسود (أو مقارنة للجسم الأسود على الأقل) من قطعة كربون أو على الأشيع من وعاء فارغ أو من فجوة في مادة كالحديد لها فتحة صغيرة لغرض المشاهدة.

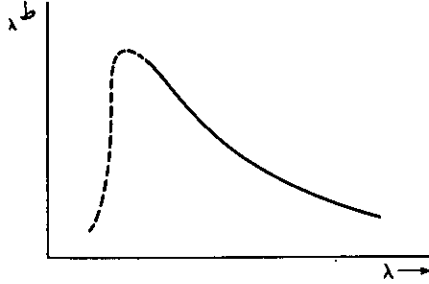
ثابت بلانك Planck's Constant

وفق النظرية الكلاسيكية، يمكن تصور الاهتزازات الكهرومغناطيسية الناشئة عن مصدر مشع مثل أمواج موقوفة داخل فجوة أو تجويف. ويعتمد عدد الأمواج التي تغطي الفجوة على الطول الموجي. وتوجد للأطوال الموجية الطويلة صيغ أو أوضاع اهتزازية داخل الفجوة قليلة في عددها، إلا أن عدد الأمواج التي تغطي نفس الفراغ في الفجوة يزداد بقصر الطول الموجي. وتشير الاعتبار الهندسية إلى أن عدد الصيغ الاهتزازية modes يتناسب مع $\frac{1}{\lambda}$ وإلى أنه يزداد بلا حدود كلما قصرت λ . ومن ثم يتوقع المرء من النظرية الكلاسيكية أن طاقة الصيغة الاهتزازية الواحدة تتحدد بقوانين الديناميكا الحرارية أي أنها واحدة لكل الصيغ.

غير أن الأدلة التجريبية تظهر خلاف ذلك. فالصيغ الاهتزازية ما زالت موجودة، إلا أنها لا تشغل المكان في الفجوة وفق القوانين الكلاسيكية (الإحصائية). وبشكل أكثر

• ماكس بلانك (١٨٥٨-١٩٤٧) استاذ في جامعة برلين، حصل على جائزة نوبل للفيزياء عام

تحديداً، فقد وُجِدَ للأطوال الموجية الأقصر أن الطاقة التي تُبعث هي طاقة أقل من التي تتنبأ بها النظرية، وهي حقيقة تُعرَف «بالاخفاق فوق البنفسجي» - ultraviolet Catastrophe - الشكل (١).



الشكل ١: الاخفاق فوق البنفسجي

وَعَلَّلَ بلانك ذلك بأن جدران الفجوة المشعة تتألف من ذرات أو جزيئات تعمل ككل منها كمهتز كهرومغناطيسي صغير جداً. وتبعث هذه المهتزازات أو تُشعُّ طاقة كهرومغناطيسية داخل الفجوة، أو تمتص الطاقة الكهرومغناطيسية منها. غَيْرَ أَنَّهَا لَا تُشعُّ الطاقة أو تمتصها في صورة سَيْلٍ متصلٍ وإنما مِثْلَ رُزْمٍ أو كَمَّاتٍ منفصلة: كُلُّ منها له طاقة من مقدار محدد. وَقَدْ سُمِّيَ هذا الكمُّ بـ«كوانتم» الطاقة أو الكوانتم للاختصاره. وقد وُجِدَ أَنَّ طاقة الكوانتم هي مُضاعَفٌ صحيحٌ للتواتر:-

$$ط = h \nu$$

..... [١-١:٥]

حيث h هو ثابتٌ يُعرف بثابت بلانك. وَتَبْلُغُ قيمةُ هذا الثابت $٦,٦٢٥ \times ١٠^{-٣٤}$ جول/ثانية. وَينبغي أَنْ يُحَدَّدَ مقدارُ هذا الثابت تجريبياً إذ لا يمكنُ التنبؤ به من النظرية. وقد قيسَ هذا الثابت بطرقٍ عدةٍ، وَوُجِدَ أَنَّ القياسات جميعها تتوافقُ.

لم تُقَبَلْ نظرية بلانك أَوَّلَ الأمرِ بسرعةٍ، بَلْ كَانَ قَبُولُهَا بطيئاً جداً، حَتَّى أَنَّ بلانك نَفَسَهُ قَاوَمَهَا لسنواتٍ عديدةٍ. وَقَدْ كَتَبَ مرةً يقولُ: «إِنَّ محاولاتي الفاشلة لِجَعْلِ كوانتم الفعل الأولي يتوافقُ والنظرية التقليدية استمرت عدة سنواتٍ وكلفتني جُهداً كبيراً».

*From the Latin *how much*. The plural is *quanta*.

ونستطيع بسرعة من قيمة h إيجاد طاقة كوانتم واحد (الذي يسمى الفوتون) لضوء تواتره ν . فالضوء المرئي له طول موجي يبلغ في المتوسط ٥٠٠ نانومتر تقريباً؛ ولذا فإن تواتره يبلغ:-

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ م/ث}}{5 \times 10^{-7} \text{ م}} = 6 \times 10^{14} \text{ هرتز} \dots\dots [2-1:5]$$

ومن ثم فإن كوانتم الضوء يَحْمِلُ في المتوسط طاقة تساوي:-

$$ط = (6.63 \times 10^{-34} \text{ جول-ثانية}) (6 \times 10^{14} \text{ هرتز}) = 4 \times 10^{-19} \text{ جول} \dots\dots$$

[3-1:5]

ومن الملائم غالباً قياس طاقات الإلكترونات بوحدة تُسمى الإلكترون فولت (إف) وليس بالجول. وبالتعريف فإن ١ إلكترون فولت هو كمية الطاقة التي يكتسبها الإلكترون (أو أية دققة أخرى مماثلة للإلكترون في الشحنة) أُوْفَقْدَها عند مروره في فرق جهد مقداره ١ فولت. إن الجهد الكهربائي هو الطاقة الوضعية لوَحْدَةِ الشحنة الكهربائية، كذلك فإن ١ إلكترون فولت يساوي ١ جول/كولم. وبذلك فإن وَحْدَتِي الطاقة ترتبطان ببساطة بالحقيقة التالية: ١ إلكترون فولت = ١ شحنة الإلكترون $\times$ ١ فولت. ولما كانت شحنة الإلكترون $= -1.6 \times 10^{-19}$ كولم، فإن:-

$$١ \text{ إلكترون فولت} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ جول} \dots\dots [4-1:5]$$

وتبلغ طاقة كوانتم الضوء المرئي إذاً حوالي ٢,٥ إلكترون فولت. وللضوء الأزرق تكون الطاقة أعلى في حين أنها أقل للضوء الأحمر (الجدول ١). وَيُقَدَّرُ العدد الأدنى من الفوتونات اللازمة لإحداث الإحساس البصري بحوالي ٢ إلى ٤ كوانتم في الثانية الواحدة.

أمواج دو بروي De Broglie Waves

أَتَمَّ الخطوة الثانية لويس دو بروي * الذي فَكَّرَ أنه إذا كَانَ للضوء طبيعة مزدوجة

* لويس فكتور دو بروي (١٨٩٢ - ...) الفيزيائي الفرنسي، استاذ في جامعة السوربون، والفائز بجائزة نوبل عام ١٩٢٩.

حيث يسلكُ مرةً مثل الأمواج ومرةً أخرى مثل الدقائق فمن المحتمل أن تظهر الدقائقُ الماديةً سلوكاً مزدوجاً كذلك. وفي الواقع، فهناك عددٌ من الظواهرِ التداخلية التي تُظهرها الالكترونات والنيوترونات وغير ذلك من الدقائقِ المادية الأخرى والتي لا يمكنُ تفسيرها من دون الافتراض بأنَّ هذه الدقائقَ لها خصائصٌ موجيةٌ كذلك.

الجدول ١ : طاقة الكوانتم (بالإلكترون فولت)
لمناطق مختلفة من الطيف الكهرومغناطيسي

١ إلكترون فولت	فوق الحمراء
٢,٥ إلكترون فولت	المرئي
٥ إلكترون فولت	فوق البنفسجي
١٠ إلكترون فولت	الاشعة السينية
١٠ (١٠ مليون) إلكترون فولت	اشعة جاما

لقد رأينا أنَّ:

$$[١-١:٥] \quad \dots\dots \quad \nu h = ط$$

وَبِضْمٍ هذه المعادلةُ إلى معادلةِ أينشتين التي تربطُ بَيْنَ الكتلةِ والطاقةِ:-

$$[٥-١:٥] \quad \dots\dots \quad ط = ك c^2$$

فإننا نَحْصِلُ على:-

$$[٦-١:٥] \quad \dots\dots \quad \frac{\nu h}{c^2} = ك$$

ولكن كميةَ التحركِ (الزخم) تساوي حاصل ضربِ الكتلةِ في السرعةِ، أي أنَّ:-

$$ي = ك ر؛ \text{ وللضوء } ر = c، \text{ وبذلك فإنَّ:-}$$

$$[٧-١:٥] \quad \dots\dots \quad \frac{\nu h}{c^2} = (ر) \left(\frac{\nu h}{c} \right) = ي$$

كذلك:

[٨-١:٥]

$$r = \lambda \nu \dots\dots$$

ومن ثم فإن:

[٩-١:٥]

$$y = \frac{h}{\lambda} = \frac{\nu h}{\lambda} \dots\dots$$

ولذا فالطول الموجي للدقيقة يساوي:-

[١٠-١:٥]

.....

$$\boxed{\frac{h}{r.k} = \frac{h}{y} = \lambda}$$

وهذه المعادلة الأخيرة هي معادلة دو بروي الموجية، حيث ك. هي كتلة السكون. ولتحديد أكثر صرامة ودقة يجب استخدام الكتلة النسبوية relativistic mass عوضاً من كتلة السكون. أما الأمواج نفسها فتسمى أمواج دو بروي، ويسمى طولها الموجي بطول دو بروي الموجي. لاحظ أن الحد الأيمن λ في المعادلة السابقة هو بارامتر موجي مميز، في حين أن الحدين الآخرين في الجهة اليسرى يميزان الدقائق.

وتساوي طاقة الكوانتم:-

[١١-١:٥]

$$p h = \nu \quad \dots\dots \frac{ch}{\lambda}$$

و يتبع من المعادلة [٤-١:٥] أن:-

١ جول = $١٨١٠ \times ٦,٢٥$ إلكترون فولت، وهكذا يكون:-

$$ch = ١٨١٠ \times ٦,٦٣ - \text{جول} - \text{ثانية} \times ١٨١٠ \times ٣ / \text{م} = ١٨١٠ \times ١,٩٩ - \text{جول} - \text{متر}$$

$$(١٨١٠ \times ١,٩٩ - \text{جول} - \text{متر}) \times (١٨١٠ \times ٦,٢٥) \times (\text{م} / \text{ثانية}) = ١٨١٠ \times ٦,٢٥ \text{ إلكترون فولت} / \text{جول}$$

$$= ١٨١٠ \times ١,٢٤ \text{ إلكترون فولت} - \text{نم} = ١٨١٠ \times ١,٢٤ \text{ إلكترون فولت} - \text{نم}$$

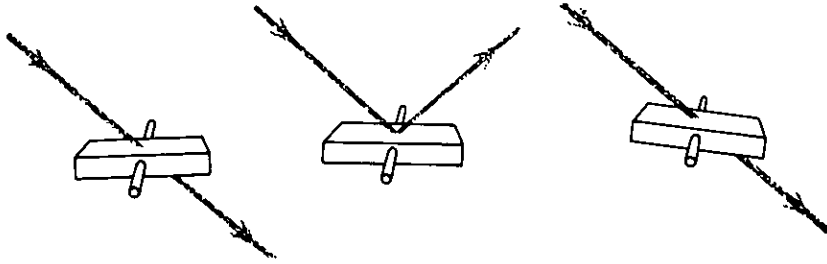
[١٢-١:٥]

$$\lambda = (nm) = \frac{310 \times 1,24}{ط(الكترن فولت)} \dots\dots$$

ولا توجد الفوتونات ما لم تنتقل بسرعة الضوء (c). [وربما يستطيع المرء أن يقول إنَّ السرعة الوحيدة الأقل من c التي يمكن أن تكون للفوتون هي الصفر. فيمثل هذا الفناء التام يحدث في العملية الكهروضوئية].

التحقق التجريبي Experimental Verification

لقد تحقق بالتجربة من معادلة دو بروي العالمان دافيسون وجرمر* في الولايات المتحدة الأمريكية والعالم ثومسون Thomson في إنجلترا. فالإلكترونات والنيوترونات والدقائق الأخرى تظهر عند سقوطها على بلورات ذات مسافات بينية مناسبة بين مستويات تأثيرات حيود تماثل على نحو مثير تلك التي تنتجها الأشعة السينية (الشكل ٢).



الشكل ٢: تظهر الخصائص الموجية للنيوترونات عند إسقاط حزمة من النيوترونات على بلورة كلوريد الصوديوم. ومن الملاحظ أن الحزمة ستمر في البلورة لمعظم زوايا السقوط. ولكن بدوران البلورة، نحصل على زاوية يحدث عندها انعكاس قوي مفاجيء.

نشأت كومبتون Compton Scattering

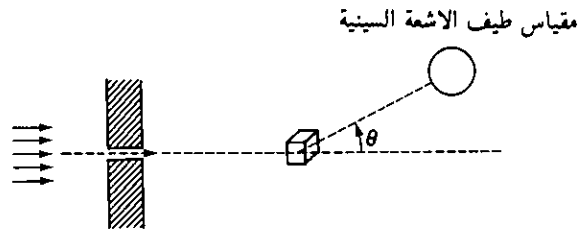
توفر ظاهرة كومبتون + دليلاً جديداً على الطبيعة الكوانتية للطاقة الكهرومغناطيسية.

*C. Davisson and L. H. Germer, "Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel," *Phys. Rev.* (2) 30 (1927), 705-40.

+ آرثر كومبتون (١٨٩٢ -) : استاذ الفيزياء في جامعة شيكاغو، منح جائزة نوبل على اكتشافه ظاهرة كومبتون. آ. هـ. كومبتون «طيف الأشعة السينية المشتتة» مجلة *Physical Review* (٢)، ٢٢، (١٩٢٣)، ٤٠٩-٤١٣.

A. H. Compton, "The Spectrum of Scattered X-Rays," *Phys. Rev.* (2) 22 (1923), 409-13.

فعند تمرير حزمة رقيقة من الأشعة السينية أحادية الطول الموجي في مادة ما، فإن معظم الأشعة السينية تصدر منها من دون تغيير في اتجاهها أو طاقتها. غيّر أنّ بعضها يخسر طاقة كما يظهر ذلك من النقصان الحاصل في تواترها. ويكون هذا التأثير أي الخسران لزاوية تشتت معينة واحداً لكل تواترات الأشعة السينية، وهو لا يعتمد على المادة المستخدمة للتشتت، لكن الخسران في التواتر يزيد لزاويا التشتت الكبيرة (الشكل ٣).



الشكل ٣: مقياس الطيف كما يستخدم لقياس الطول الموجي للأشعة السينية المشتتة.

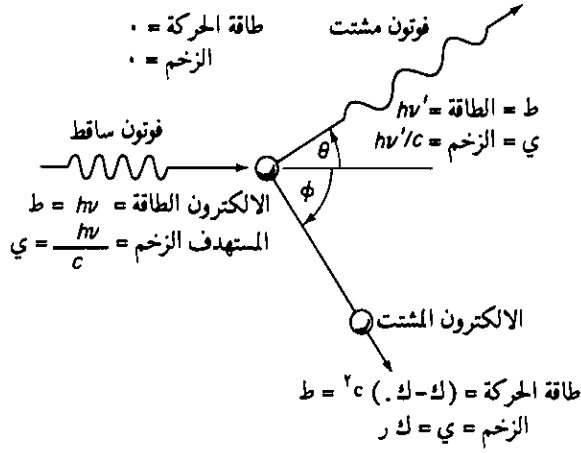
وقد افترض كومبتون أنّ هذه الخسارة تحدث بسبب بعض التفاعل بين كوانتم الطاقة الكهرومغناطيسية والإلكترون في المادة المشتتة. ومن معادلة أينشتاين لتكافؤ المادة والطاقة:

$$ط = ك c = h \nu \dots\dots [١٣-١:٥] ، أن :$$

$$[١٤-١:٥] \dots\dots \frac{h \nu}{c} = ك$$

وتشير هذه المعادلة الأخيرة إلى خصائص الفوتون. ويسقط الفوتون على إلكترون طاقته الحركية صفر وكذلك كمية تحركه أو زخمه (الشكل ٤). وعند نقطة التصادم، تنتج مكونتان: الفوتون المشتت الذي يملك الآن طاقة أقل ($h \nu'$) وكمية تحرك أو زخماً أقل ($\frac{h \nu'}{c}$)، والإلكترون المشتت الذي يملك طاقة حركية (ك-ك.) $\frac{1}{2} m v^2$ وكمية تحرك ك ر. ولما كانت عملية التشتت هذه تصادماً مرناً بين الفوتون والإلكترون، فإن كلاً من الطاقة والزخم (كمية التحرك) يجب أن يبقى ثابتاً. وبحسب قانون حفظ الطاقة، نجد أنّ:-

التغير في طاقة الفوتون = طاقة الحركة للإلكترون المشتت



الشكل ٤ : ظاهرة كومبتون: شكل متجهي يبين طاقة الإلكترون والفوتون وزخم كل منهما.

$$[١٤-١:٥] \quad \dots\dots \gamma c (1 - \cos \theta) = h\nu - h\nu' \quad \dots\dots$$

ومن قانون حفظ الزخم، نجد كذلك أن:-

الزخم الابتدائي = الزخم النهائي

$$[١٥-١:٥] \quad \dots\dots \frac{h\nu}{c} \cos \theta + \gamma m_e v \cos \phi = \frac{h\nu'}{c} \quad \dots\dots$$

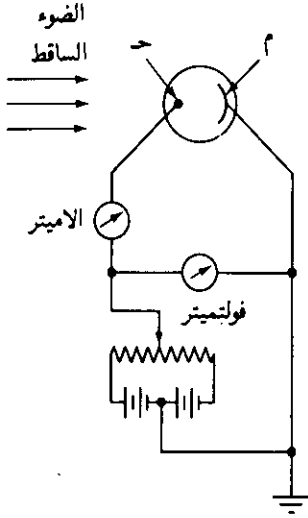
وتوضح هذه المعادلة حفظ الزخم باتجاه الفوتون الساقط. أما في الاتجاه العمودي على اتجاه السقوط فيكون:

$$[١٦-١:٥] \quad \dots\dots \frac{h\nu}{c} \sin \theta - \gamma m_e v \sin \phi = 0 \quad \dots\dots$$

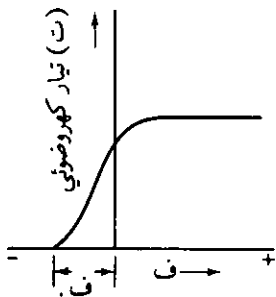
ومن حل المعادلات [١٤-١:٥]، [١٥-١:٥]، [١٦-١:٥] حلاً آنياً، نجد أن التواتر الجديد ν والطول الموجي الجديد λ للأشعة السينية تعتمدان على زاوية التشتت θ وذلك على النحو التالي:-

$$[١٧-١:٥] \quad \dots\dots \frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} = \gamma m_e v \sin \phi \quad \dots\dots$$

$$(١٧-١:٥) \quad \dots\dots \frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} = \gamma m_e v \sin \phi \quad \dots\dots$$



الشكل ٥: الظاهرة الكهروضوئية



الشكل ٦: اعتماد التيار الكهروضوئي على جهد اللوحة الجامعة.

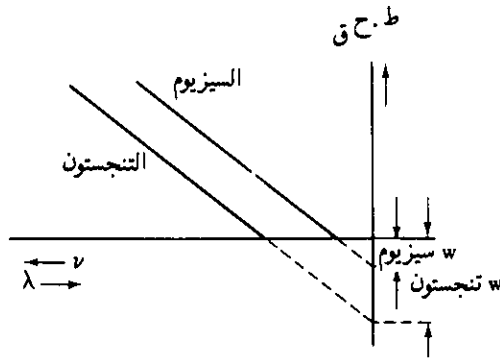
ولا تستطيع النظرية الموجية الكلاسيكية أن تفسر الحقيقة التجريبية هذه أي تغير الطول الموجي المشاهد في تشتت كومتون. وقد ظل هذا الأمر كذلك حتى قدمت النظرية الكوانتية تفسيراً له.

الظاهرة الكهروضوئية Photoelectric effect

تَصَوَّرْ أَنْ ضوءاً ذا أطوال موجية عدة يسقط على لوحة معدنية م متصلة بالأرض - الشكل ٥. فإذا كان جهد اللوحة الجامعة collector plate موجباً مقارنةً مع م، فإن الإلكترونات الصادرة من م تنجذب إلى ج، ويسري لذلك تيار كهربائي في الدائرة.. وبزيادة جهد اللوحة ف، يصل التيار الذي يسجله الأميتر حد الإشباع، ذلك لأن جميع الإلكترونات الصادرة من م تُجمَعُ باللوحة ج.

وإذا كانت اللوحة الجامعة سالبة الجهد، فإن الإلكترونات التي تصلها تُرَدُّ ما لم تكن طاقة حركتها عاليةً بصورة كافية لتغلب بذلك على الشحنة الرافدة repulsive charge. وبزيادة فرق الجهد نصل إلى قيمة لا يصل عندها بتاتاً أي إلكترون إلى اللوحة الجامعة ويهبط عندها التيار إلى صفر. ويُسمى فرق الجهد اللازم لانقاص التيار إلى صفر بالجهد الموقف ف. Stopping potential - الشكل ٦. ومن الواضح أن تياراً كهروضوئياً ذا قيمة هامة سيسري إذا كانت اللوحة الجامعة موجبة الشحنة فقط، أي إذا كانت هي المصعد. ويُسمى السطح الحساس للضوء بالمهبط الضوئي.

وبتغير شدة الضوء الساقط، يتغير التيار الكهروضوئي تبعاً لذلك؛ إلا أن سرعة الإلكترونات أو طاقة حركتها ($E = \frac{1}{2}mv^2$) لا تتغير. ويعني هذا أن الضوء الساطع يتسبب في جعل المزيد من الإلكترونات يهرب من الفيلز مقارنةً مع الضوء الخافت، إلا أن متوسط طاقة الإلكترونات يظل في الحالين واحداً. ومن جهة أخرى، تعتمد طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة على تواتر الضوء، فالعلاقة بينهما خطية - الشكل ٧. ولا يحدث أي انبعاث إلكتروني من ضوء تواتره أقل من التواتر الحرج threshold frequency. ولذلك قد يكون الضوء الأزرق فعالاً لفلز ما بينما يكون الضوء الأحمر غير فعال له.



الشكل ٧: اعتماد طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية على التواتر والطول الموجي: التواتر الخرج على المحور السيني؛ نتائج التجربة يمثلها الخط المتصل؛ أما الخط المنقطع فيمثل امتداد الخط المتصل وذلك لتحديد دالة الشغل (على المحور الصادي) لنوعين من السطوح التي تبعث الإلكترونات الضوئية.

أما التفسير الصحيح للظاهرة الكهروضوئية فقدمه أينشتين * . وقد ظنّ بلانك قبل ذلك أنّ الضوء يصدر في صورة كوانتا، إلا أنه ينتقل في الفراغ بشكل متصل. ووسّع أينشتين هذه النظرية مفترضاً أنّ الضوء ينتقل كذلك في صورة كوانتا. ومن ثمّ فإنّ جزءاً من طاقة كوانتم الضوء تلزم لاعتاق الإلكترون وجعله يفلت من السطح، وتسمّى هذا الجزء بدالة الشغل **Work function**. أما بقيّة الطاقة الضوئية فتظهر في شكل طاقة حركية للإلكترون. ولذا فإنّ أقصى طاقة حركية يترك بها إلكترون ضوئي سطح الفلز تُعطى بالمعادلة التالية:-

$$\text{طاقة الحركة القصوى (ط. ح. ق)} = h\nu - w \dots\dots [١٨-١:٥]$$

وهذه المعادلة الأخيرة هي معادلة أينشتين للظاهرة الكهروضوئية. ولَمّا كانت طاقة الحركة $\frac{1}{2}mv^2$ ، فإننا نلاحظ (للتقريب غير التّسبوي) أنّ مُربّع أقصى سرعة للإلكترونات يتناسب مع تواتر الضوء. فكلّما زادت طاقة كوانتم الضوء زادت الطاقة المنقولة إلى الإلكترون وزادت سرعته بالتالي.

*A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt," *Ann. Physik* 17 (1905), 132-48.
وهذا البحث لاينشتين أشد راديكالية من البحث الذي كتبه عن النظرية النسبية في السنة نفسها. وفي الحقيقة فإن هذا البحث هو الذي جعله يفوز بجائزة نوبل.

وَبِمَدَّ المنحنين في الشكل ٧ الى التواتر صفر، نجد أنَّهما يقطعان محور الطاقة في نقطتين. ويساوي بعد النقطة منهما عن نقطة الأصل 0 مقدار دالة الشغل $\mathcal{W}$. وكما هو واضح فينبغي أن تكون هنالك دالة شغل صغرى، وإلا فإنَّ الإلكترونات تفلت من السطح باستمرار. ويمكن وصف العلاقة بين طاقة الحركة القصوى والتواتر ν المبينة في الشكل ٧ بالمعادلة التالية:-

$$\text{ط. ح.} = h\nu - \alpha \quad \text{ب. ب.} \quad [19-1:5]$$

حيث α هو ميل الخط، و- α حقيقة هُوثابتُ بلانك. ولما كان ب هو الجزء المقطوع من المحور الصادي، فإنَّ مقداره يعتمد على نوع الفلز، أما α فلا تعتمد بتاتا على نوع الفلز.

وتتناسب طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة طردياً مع الفارق بين التواتر ν والتواتر الحرج ν_0 :

$$\text{ط. ح.} = h(\nu - \nu_0) \quad \text{.....} \quad [20-1:5]$$

ان قيمة ثابت بلانك واحدة لكل المواد والتواترات؛ غَيْرَ أنَّ قيمة ν_0 تتغيرُ بنوع الفلز المُستَـشع. فالفلزات المختلفة لها تواترات حرجة مختلفة ومن ثمَّ دالات شغل مختلفة. فمثلاً، يبلغ التواتر الحرج لفلز التنجستون 1.07×10^{15} هرتز وهو يناظر طولاً موجياً مقداره 280 نـم (في منطقة فوق البنفسجي)، أما التواتر الحرج للسيريزيوم فيبلغ 4.62×10^{14} هرتز و يناظر $\lambda = 650$ نـم (في منطقة الأحمر).

مثال: سقط ضوء فوق بنفسجي $\lambda = 300$ نـم على سطح مادة دالة شغلها 2.0 إلكترون فولت. جد سرعة الإلكترونات المنبعثة من السطح.

الحل: نجد التواتر على النحو التالي:-

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ م/ث}}{300 \times 10^{-9} \text{ م}} = 10^{15} \text{ هرتز}$$

ولأنَّ إلكترون فولت = 1.6×10^{-19} جول، فإنَّ:-

$$h \nu = \hbar \omega$$

$$= 6.63 \times 10^{-34} - 3.2 \times 10^{-19}$$

$$= 3.43 \times 10^{-19} \text{ جول}$$

ونحسب السرعة من المعادلة: ط. ح = $\frac{1}{2} m v^2$. ولما كانت كتلة الإلكترون هي 9.1×10^{-31} كغ، فإنَّ:

$$3.43 \times 10^{-19} = \frac{1}{2} \times 9.1 \times 10^{-31} \times v^2$$

$$v = 0.87 \times 10^6 \text{ م/ث}$$

معادلة شرودنجر الموجية Schrödinger Wave Equation

طور شرودنجر أفكار دوبروي، فأعاد مفهوم الكوانتم إلى النظرية الموجية. فطبقاً لما اقترحه دوبروي، فإن الإشعاع الدقيق particle radiation له طول موجي معين؛ لكن موقع الدقيقة في الفراغ المكاني لا يمكن تعيينه من دون غموض. فبدلاً من ذلك يجب تمثيل موقع الدقيقة بتوزيع احتمالي. وقد أدخل شرودنجر الكمية Ψ التي تسمى الدالة الموجية wave function لوصف ذلك الاحتمال. والكمية Ψ كمية عددية غير متجهة، ومن ثم فهي أقل تعقيداً من $\vec{E}$ ، $\vec{H}$ اللذين هما متجهان.

ويعطى احتمال وجود دقيقة في موقع ما في الفراغ في زمن ما بالقيمة $|\Psi|^2$ عند ذلك الموقع. ولذا فإنَّ المحل الأكثر احتمالاً لوجود دقيقة ما يتحدد حيثما تبلغ $|\Psi|^2$ قيمتها القصوى. ولما كان احتمال وجود دقيقة ما في مكان في الفراغ يساوي ١ بالضرورة، فإن الدالة الموجية ينبغي أن تستوفي الشرط التالي:-

$$\int |\Psi|^2 dV = 1 \dots \dots \dots [١:٥-٢١]$$

* إرفن شرودنجر Erwin Schrödinger (١٨٨٧-١٩٦١): الفيزيائي النظري الألماني، الاستاذ في جامعة برلين، والحائز على جائزة نوبل عام ١٩٣٣.

E. Schrödinger, "Quantisierung als Eigenwertproblem," *Ann. Physik* (4) 79 (1926), 361-76.

حَيْثُ يُحَسَّبُ التَّكَامُلُ عَلَى الْفَرَاغِ بِأَكْمَلِهِ .

ولا تصف Ψ احتمال وجود الدقيقة فَحَسْبُ، وإنما تدلُّ حقيقةً على سعة موجة دو بروي المرافقة لها. وفي الحقيقة، فإنَّ Ψ قَدْ تَحُلُّ مَحَلَّ ص في المعادلة الموجية العامة :-

$$[٢٢-١:٥] \quad \dots\dots \frac{v_6^2}{v_{s6}^2} v_c = \frac{v_6^2}{v_{z6}^2}$$

وهذه المعادلة الأخيرة تدلُّ على العلاقة الوثيقة بين الدقيقة والموجة .

مبدأ الارتياب The Uncertainty Principle

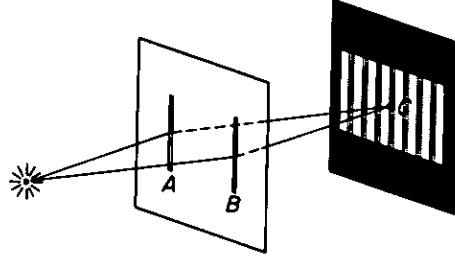
قد يبدو للمشاهد العابر أنَّ من الممكن ابتكار طرق قياس حساسة جداً تعين في اتخاذ قرار حول طبيعة الضوء فيما إذا كان يتألف من دقائق (كوانتا) أو أمواج. والأمر على خلاف ذلك. فهناك تفاعلٌ جوهري بين طريقة القياس والظاهرة المقاسة مما يُبْطِئ أية محاولة من هذا القبيل. فالأخطاء التي تحدث ليست هي الأخطاء العادية التي توجد في أية طريقة قياس والتي يُمكنُ الأخذُ بها في الحسبان. ذلك أنَّ الارتياب الذي نواجهه الآن هو من طبيعة مختلفة: فهو حقيقة جزءٌ من الظاهرة نفسها التي نشرّع في ملاحظتها. وقد عبّر عن هذه الأخطاء وصاغها هيزنبرج Heisenberg في مبدئه الذي يُعرّف بمبدأ الارتياب .+

تخيل تجربة الشقّ المزدوج الموضحة في الشكل ٨. فالستارة إلى اليمين هي لوحة فوتوغرافية. ومن السهل تفسير أهداب التداخل الناتجة استناداً إلى النظرية الموجية للضوء. ولئن نندهش أيضاً إذا ما علمنا أنَّه يمكن إجراء التجربة هذه باستخدام الإلكترونات حاصلين مع ذلك على النتائج نفسها. ٥ وبعبارة أخرى، فعندما يكون الشقان مفتوحين نجد أنَّ الإلكترونات لدى وصولها اللوحة الفوتوغرافية تُكوّن أهداباً ينفصل بعضها عن بعض

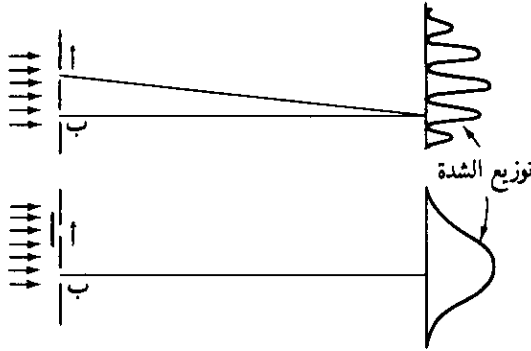
+ فيرنر كيرت هيزنبرج (١٩٠١ -) : الفيزيائي الألماني ومدير مؤسسة ماكس بلانك للفيزياء في ميونخ. صاغ الميكانيكا الكوانتية، مصفوفة S، نظرية المجال الكوانتي، ومبدأ الارتياب الذي نسب إليه، وحصل على جائزة نوبل عام ١٩٣٢.

*C. Jönsson, "Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten," Z. f. Physik 161 (1961), 454-74.

بحسب قواعد التداخل من شق مزدوج. وبإغلاق أحد الشقين، يتغير الوضع، إذ نجد أن الإلكترونات توجد في مواقع لا يمكن أن يُشاهد الإلكترون فيها من قبل عندما كان الشقان مفتوحين - الشكل ٩.



الشكل ٨: تفسير مبدأ الارتباب. ارجع الى الشرح المقابل لمزيد من التفاصيل.



الشكل ٩: تجربة الشق المزدوج: الشقان مفتوحان (الرسم العلوي)، و شق واحد مفتوح (الرسم السفلي). ان النتيجة في الرسم السفلي هي النتيجة نفسها عند كون الشق أ مفتوحاً فقط.

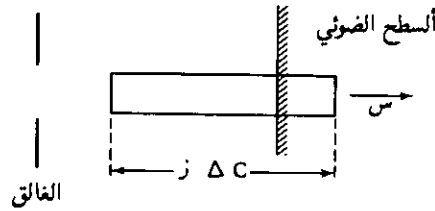
وقد يعلل المرء ذلك للوهلة الأولى أن الإلكترونات في أثناء مرورها بالشقين تؤثر في مسارات بعضها بعضاً متسببة في نمط تداخلي متميز. غيّر أننا إذا أخفّفنا قِيَض الإلكترونات أو فيض الضوء إلى الحد الذي يُسمَح فيه لإلكترون واحد أو كوانتم واحد بالمرور في الشق في الوقت الواحد، فإننا نشاهد النمط نفسه.

ولكننا نواجه في هذه الحالة المعضلة التالية: لنفترض النقطة c في الشكل ٨ هي النقطة على الستارة التي نتوقع بحسب النظرية الموجية أن تكون ذات استشعاع مقداره صفر. فعند

فتج كلا الشقين أ، ب، نجد أن c لا يصلها أي كوانتم. ولكن عند فتح أحدهما فقط، نجد أن الكوانتا تصل c . وبذلك، فإن الكوانتم الذي مر في ب سيصل c إذا كان مُغلقاً، ولكنه لا يصل c إذا كان مفتوحاً. وعلاوة على ذلك، فإذا وُضع كاشف قريب نجد أن نمط التداخل يُمسح، وتختفي الأهداب. وحتى يُكشَف عن الكوانتم، فلا بد له من أن يتفاعل مع الكاشف، الأمر الذي يجعله لا يسهم في نمط التداخل. ومن ناحية أخرى، فإذا ظهر الكوانتم عند c من دون الكشف عنه بواسطة كاشف في أ فإننا نعرف أن موجته المرافقة قد مرت في ب وجوباً. وهكذا فإن مجرد وجود الكاشف يغير من النتيجة: من نمط تداخل الشق المزدوج إلى نمط حيود الشق المنفرد.

وقد حاول العديد من الفيزيائيين ومنهم آينشتين ومن دون نجاح ابتداءً تجريبية يمكن بها الكشف عن الشق الذي يمر فيه الكوانتم من دون تحطيم نمط التداخل. وقد توصلوا إلى نوع من الحل ينص على أن الفوتونات تسلك من بعض الأوجه مثل الدقائق المادية، غير أنها لا تملك كل الخصائص التي توجد للدقائق عادة. وبشكل خاص، فالفوتون لا موقع محدد له في الفراغ إلا في اللحظة التي يتفاعل فيها مع المادة، كما يتخذ عند امتصاصه في الظاهرة الكهروضوئية.

تخيل سبلاً من كوانتا الضوء: طاقة كل كوانتم منها $h \nu$ وتتحرك في الاتجاه + س. افترض أن كوانتماً واحداً فقط يتحرك في الوقت الواحد. لنحاول عزل كوانتم مفرد باستخدام غالقٍ سريع يُفتح لفترة زمنية قصيرة جداً Δz . ويبدو أننا نستطيع عزل رتلٍ موجي طوله $c \Delta z$ ويتحرك بسرعة الضوء c - الشكل ١٠.



الشكل ١٠: الارتباب في الموقع.

افترض أننا نكشف عن الضوء بخلية ضوئية . لكن هنالك لحظة واحدة فقط يتكّ عندها الكاشف . فكيف نستطيع أن نوفق بين الطول المحدود للفترة الزمنية واللحظة (النقطة) الزمنية ؟ أنّ الجواب يكمن في افتراضٍ ارتباطٍ في موقع الفوتون :-

$$\Delta s = c \Delta z \dots\dots [٢٣-١:٥]$$

افترض بعد ذلك أن الضوء يُمرّر الآن في كاشف الطيف لتعيين تواتره . فإذا فُتح الغالق فجأة ، فإنّ الطرف المتقدّم للجهة الموجية المتقدمة سيكون مربع الشكل ، وسوف تصعد قيمته من صفر إلى قيمة عظمى . لكنّ الطرف المتقدّم المربع لا يتحقق إلا بجمع عددٍ غير متناه من عناصر فورييه Fourier ، الأمر الذي يتطلب تواتراتٍ إضافيةً إلى جانب التواتر الأساسي . وهكذا نفترض وجود ارتباطٍ في التواتر أيضاً .

نذكر أنّ: $\lambda = \frac{c}{\nu}$ لأية موجة ، أي أنّ: $\lambda = \frac{c}{\nu}$ ؛ وتصبح هذه المعادلة في مثالنا قيد الاعتبار على النحو التالي :-

$$\Delta s = \frac{c}{\nu} \Delta \nu \dots\dots [٢٤-١:٥]$$

وبذلك يمكن ضمّ المعادلتين [٢٣-١:٥] ، [٢٤-١:٥] على النحو التالي :-

$$c = \Delta \nu \Delta s = \frac{\Delta s}{\Delta \nu} \Delta \nu \dots\dots$$

وكذلك

$$\Delta s \Delta \nu \approx 1 \dots\dots [٢٥-١:٥]$$

وتربط هذه المعادلة بين مدى التواتر $\Delta \nu$ وزمن الرتل الموجي Δz . ونظراً لوجود ارتباط في التواتر ، فإنّ هنالك ارتباطاً في الطاقة ΔE ط يساوي :-

$$\Delta E = h \Delta \nu \approx \frac{h}{\Delta z} \dots\dots [٢٦-١:٥]$$

كذلك يوجد ارتباط في الزخم Δp في اتجاه المحور السيني :-

[٢٧-١:٥]

$$\dots \frac{h}{\Delta c} \approx \frac{v \Delta h}{c} = \frac{\Delta}{c} = \Delta \text{ ي}$$

ولأن $\Delta C = \Delta z$ ، فإننا نحصلُ على:-

[٢٨-١:٥]

$$\Delta \text{ ي} . \Delta s \approx h \dots$$

وتعني المعادلة الأخيرة أننا نستطيعُ فقط تعيينَ موقعِ الفوتون أو تعيينَ زخمِهِ وذلك لآيةِ درجةٍ دقةٍ مطلوبةٍ، غيرَ أننا لا نستطيعُ تعيينَهُما معاً في وقتٍ واحدٍ.

مبدأ التَّامَّةِ Principle of Complementarity

لِكلا النموذجين: الكوانتي والموجي حدودُهُ الخاصة. وبسببِ هذه التقييدات، فالنموذجان غير منفصلين تماماً، بل هما متتامان. ويمكنُ القولُ إنَّ الطبيعةَ الموجيةَ هي التي توجهُ سلوكَ الكوانتا التي تحوي الطاقة.

و يغلبُ الوجهُ الكوانتي للضوءِ عند الأطوالِ الموجيةِ القصيرة، حيث لا تلاحظُ كثيراً ظواهرُ الحيود والتداخل. بينما يغلبُ الوجهُ الموجيُّ للضوءِ في حالةِ الأطوالِ الموجيةِ الطويلة. غيرَ أنَّ اختيارَ النموذجِ الكوانتيِّ أو الموجيِّ لا يتحددُ فقط باعتبارِ الطولِ الموجيِّ؛ ذلك أنَّ الضوءَ ذا الطولِ الموجيِّ المعينِ قد يسلكُ في تجربةٍ ما مثلَ موجةٍ و يسلكُ في تجربةٍ أخرى مثلَ الكوانتا.

اقتراحات لقراءات إضافية

- J. Andrade e Silva and G. Lochak, *Quanta*, World University Library (New York: McGraw-Hill Book Company, 1969).
 D. Bohm, *Quantum Theory* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1951).
 A Einstein, "Zur Quantentheorie der Strahlung," *Physik. Z.* **18** (1917), 121.
 M. Planck, *Theory of Light* (London: The Macmillan Company, 1932).

المسائل

- ١-١:٥ جد طاقة كوانتم ضوئي طوله الموجي ٤٠٠ نم وجد زخمه ؟
- ٢-١:٥ طاقة الضوء لطول موجي قصير وكذلك زخمه اكبر منهما لطول موجي كبير.
- ٣-١:٥ عين الطاقة والزخم لكوانتم اشعة سينية طوله الموجي ١,٢ أنجستروم. عيّن طاقة كوانتم (بالإلكترون فولت) ل: أ) ضوء تحت الأحمر طوله الموجي ١٠×٢,٥-٣ مم ب) ضوء فوق بنفسجي طوله الموجي ٢٨٠ نم.
- ٤-١:٥ يعمل مرسل راديوي قدرته ١٠ كيلواط على تواتر مقداره ١,٦ ميغاهرتز.
- أ) جد عدد الكوانتات التي يصدرها في الثانية الواحدة ب) بافتراض اشعاع منتظم في جميع الاتجاهات، ما عدد الكوانتا في الثانية الواحدة التي تسقط على هوائي في شكل صحن قطره ٢ م موضوع على بُعد ٥ كم ؟
- ٥-١:٥ ما عدد الفوتونات الموجودة في ١ مم^٣ من ضوء أحادي اللون طوله الموجي ٤٨٨ نم، وفيضه الإشعاعي ٢٠ واط ومساحة مقطعيه ١ سم^٢ ؟
- ٦-١:٥ يُشع مصباح قدرته ١٠٠ واط لمدة ١٠٠ يوم. جد الكتلة (بالميكروغرام) التي يفقدها خلال هذه المدة ؟
- ٧-١:٥ جد الطول الموجي للإلكترون سرعته $\frac{1}{5}$ سرعة الضوء (كتلة الإلكترون ٩,١×١٠^{-٣١} كغ).
- ٨-١:٥ جد سرعة إلكترون طاقة حركته ٦٠ إلكترون فولت، وجد كذلك زخمه وطول موجته المرافقة ؟
- ٩-١:٥ تُظهر حزم النيوترونات أنماط الحيود كالأموح العادية. فإذا كانت كتلة النيوترون ١,٦٧×١٠^{-٢٧} كغ، فجد عرض الشق الذي يتسبب في جعل النيوترونات التي طاقتها ٢٠ كيلو إلكترون فولت تُعطي نمط حيود: المسافة الزاوية بين النهاية العظمى المركزية والنهاية الصغرى من الرتبة الأولى فيه تساوي ٢.

- ١٠-١:٥ تبلغ المسافة بين أيّ مستويين في بلّورة الملح الصخري ٢,٨ أنجستروم. جد سرعة النيوترونات التي تلزم لانتاج حيود لها من الرتبة الأولى على زاوية ٢٠° من العمود.
- ١١-١:٥ تشتت الأشعة السينية ($\lambda = 0,62$ أنجستروم) من جامد على زاوية ٦٠° من الاتجاه الأمامي. جد التغير في الطول الموجي الناشئ عن ظاهرة كومتون.
- ١٢-١:١٥ تشتت الأشعة السينية ($\lambda = 0,2$ أنجستروم) على زاوية ٩٠° من الاتجاه الأصلي بعد اصطدامه بالإلكترونات الساكنة. فما:-
(أ) إزاحة كومتون الحاصلة للتواتر (ب) الطول الموجي للأشعة السينية المشتتة.
- ١٣-١:٥ انطلقت الإلكترونات من سطح سيزيوم ($\lambda = 1,8$ إلكترون فولت) بطاقة حركة تبلغ (٢) إلكترون فولت عندما سقط عليه فوتونات ضوئية. جد أطول طول موجي للضوء اللازم لهذا الانبعاث.
- ١٤-١:٥ سقط ضوء بنفسجي ($\lambda = 380$ ن.م) على سطح فلز، فانطلقت منه الإلكترونات بسرعة قصوى تبلغ $6,2 \times 10^6$ م/ث، (أ) فما طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة (ب) جد دالة الشغل (بالإلكترون فولت) للفلز.
- ١٥-١:٥ سقط فوتون ($\lambda = 320$ ن.م) على سطح دالة شغله ٢,٢ إلكترون فولت. جد سرعة الإلكترونات التي تنطلق من السطح.
- ١٦-١:٥ استشع سطح فلز ما بضوء ($\lambda = 400$ ن.م)، وأوقفت الإلكترونات المنطلقة منه بجهد سالب قدره ٠,٦٤ فولت. (أ) ما أقصى طاقة حركة للإلكترونات المنبعثة وما أقصى سرعة لها كذلك؟ (ب) جد دالة شغل الفلز.
- ١٧-١:٥ قيسَت سرعة إلكترون البالغة ٢٠٠ م/ث إلى دقة تبلغ ٠,١%. إلى أية درجة دقة يمكن تعيين موقع الإلكترون؟
- ١٨-١:٥ باستخدام علاقات دو بروي، ما الارتياح في تواتر الإلكترون في المسألة السابقة؟

الفصل ٥ : ٢

بصريات الالكترونات

Electron Optics

على الرغم من أنَّ الميكروسكوب الإلكتروني يشبه من ناحية الميكروسكوب الضوئي، إلا أنَّ هنالك فارقاً أساسياً بينهما، فالميكروسكوب الإلكتروني يستخدم شكلاً من الطاقة لا يعتبر جزءاً من الطيف الطبيعي. هذا ولم يتم التنبؤ بالميكروسكوب الإلكتروني إلا بعد أن أُرست بعض الدراسات بعيدة الصلة بصورة غير متوقعة حقيقة أنَّ كلَّ الدقائق المتحركة لها خصائص تشبه خصائص الضوء.

أساسيات بصريات الالكترونات

مسارات الالكترون

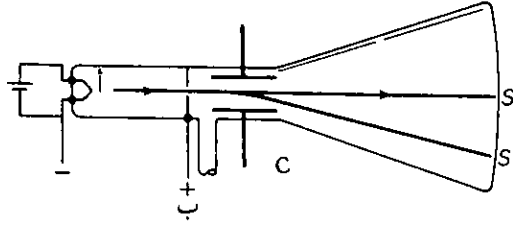
قبل حوالي مئة عام، اكتشف ج. و. هيتورف Hittorf ما عُرف فيما بعد بأشعة المهبط Cathode rays التي كانت عبارة عن مادة جسيمة تنتقل من المهبط إلى المصعد في أنبوب مفرغ. وفي عام ١٨٩٥ وجدَ برن Perrin * أنه يمكن حَرْفُ هذه الأشعة بالمجالات المغناطيسية، الأمر الذي دلَّ على أنَّها مشحونة كهربائياً، وقد دلَّ اتجاه انحرافها على أنَّ لها

* جين برن (١٨٧٠-١٩٤٢): الفيزيائي الفرنسي الذي حصل على جائزة نوبل عام ١٩٢٦.

J. Perrin, "Nouvelles propriétés des rayons cathodiques," *Compt. rend.* 121 (1895), 1130-34.

شحنة سالبة. وبعد ذلك بعامين بنى ج. ج. ثومسون + أنبوب تفريغ قاس به سرعة هذه الأشعة ونسبة شحنتها إلى كتلتها $(\frac{e}{k})$ ؛ وتسمى هذه الأشعة الآن بالالكترونات.

وبإيقاع فرق في الجهد بين المهبط والمصعد (أ، ب في الشكل ١)، فإن حزمة الالكترونات تضرب الستارة المتفلرة عند النقطة S. وإذا ما أوقع فرق في الجهد بين لوحتي



الشكل ١: حُرْف حزمة إلكترونية بمجال كهروستاتيكي.

الحُرْف C، فإن الحزمة الالكترونية تنحرف إلى الأسفل إلى S. وعلاوة على ذلك، يوضَع مَلَفَانِ حَلَزُونِيَانِ (غَيْرُ مَبِينَيْنِ فِي الشَّكْلِ) قَرَبَ الْأَنْبُوبِ فَوْقَ مَسْتَوَى الرَّسْمِ وَخَلْفَهُ بِحَيْثُ تَخْتَرِفُهُ خُطُوطُ الْمَجَالِ الْمَغْنَطِيسِيِّ. وَيُمْكِنُ تَعْدِيلُ شِدَّةِ الْمَجَالِ الْمَغْنَطِيسِيِّ لِمَعَادِلَةِ تَأْثِيرِ الْمَجَالِ الْكَهْرُوسْتَاتِيكِيِّ. وَمِنْ شِدَّتِي الْمَجَالَيْنِ، يُمْكِنُ حَسَابُ سُرْعَةِ الْإِلِكْتُرُونَاتِ وَكَذَلِكَ كَتْلَتِهَا. وَتُحَسَّبُ طَاقَةُ حَرَكَةِ الْإِلِكْتُرُونِ بِالْإِلِكْتُرُونِ فُولْتِ بِالْمَعَادِلَةِ التَّالِيَةِ:

$$\frac{1}{2} k v^2 = e \phi \quad \dots\dots [١-٢:٥]$$

ولذلك، فإن سرعة الإلكترون v التي تُكْتَسَبُ بِتَسَارُعِهِ فِي فَرْقِ الْجَهْدِ ϕ تَكُونُ :-

$$v = \sqrt{\frac{2 e \phi}{k}} \quad \dots\dots [٢-٢:٥]$$

وبوضع هذه القيمة في معادلة دو بروي الموجية

+ سير جوزف جون ثومسون (١٨٥٦-١٩٤٠): الفيزيائي البريطاني الذي احتل كرسي كافنديش للفيزياء التجريبية في كلية ترينتي بكامبردج وعمره ٢٨ سنة. فاز بجائزة نوبل عام ١٩٠٦. وللحصول على نبذة تاريخية جيدة عنه، ارجع الى كتاب: جورج باجت ثومسون (الابن): «ج. ج. ثومسون مكتشف الالكترون» (جاردن سيتي نيويورك: دبل دي ورفاقه - ١٩٦٦).

George Paget Thomson (his son): *J. J. Thomson, Discoverer of the Electron* (Garden City, N. Y.: Doubleday & Company, Inc., 1966).

$$\left(\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda_r} \right) \text{ نَحْصُلُ عَلَى :}$$

[٣-٢:٥]

$$\sqrt{\frac{h}{2 m_e \lambda}} = \lambda$$

ولفرق جهد مسارع مقداره ٦٠ كيلوفولت، نجد أن الطول الموجي للإلكترون هو:-
 $12,3 = \sqrt{60,000} \cdot 1,24 \cdot 10^{-9} \text{ أنجستروم.}$

وإذا ما تحرك إلكترون سرعته v في مجال مغناطيسي منتظم عمودي على حركة الإلكترون فإن المجال يوقع قوة مركزية عمودية على كل من اتجاه حركة الإلكترون واتجاه المجال. وتعتمد هذه القوة على شدة المجال المغناطيسي B ، شحنة الإلكترون e ، وسرعته v :

[٤-٢:٥]

$$\vec{F} = e \vec{B} \times \vec{v} \dots\dots$$

وسيتحرك الإلكترون في مسار دائري له نصف قطر مقداره r يتحدد بالمعادلة التالية:-

[٥-٢:٥]

$$\vec{F} = \frac{m_e v^2}{r} \dots\dots$$

ومن تساوي المعادلتين السابقتين، نحصل على:-

$$\frac{m_e v^2}{r} = e B v$$

$$\frac{m_e v^2}{r} = e B v$$

$$\frac{m_e v^2}{r} = e B v$$

وبتعويض قيمة r الأخيرة في المعادلة [١-٢:٥]، نحصل على:-

[٦-٢:٥]

$$e = \frac{m_e v^2}{h \lambda} \dots\dots$$

حيث m_e هي كتلة الإلكترون، و v هو فرق الجهد المسارع..

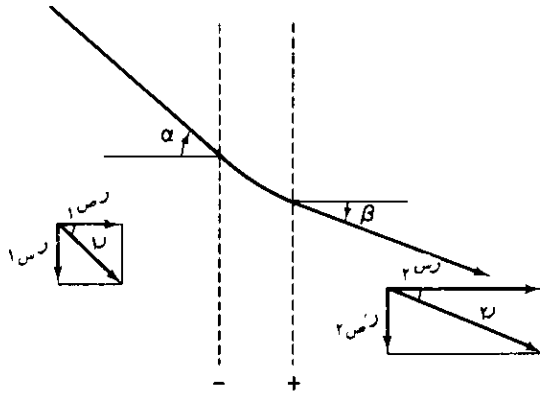
قانون بتي Bethe's Law

افترض أنَّ حزمةً من الإلكترونات التي سرعتها v_1 تسقط بزاوية α على منظومةٍ من مُشكَّين بينهما فرق في الجهد F . افترض كذلك أنَّ الإلكترونات تخرجُ بسرعةٍ مقدارها v_2 صانعةً زاويةً مقدارها β مع المحورِ البصري.

ومن الشكل المتجهي في الشكل ٢، يتبع أنَّ:-

[٧-٢:٥]

$$\text{جا } \alpha = \frac{v_{ص1}}{v_1}, \text{ جا } \beta = \frac{v_{ص2}}{v_2} \dots\dots$$



الشكل ٢: انكسار حزمة الإلكترونية

ولكنَّ مكونة السرعة v_2 الموازية للمحور البصري تتغيرُ في حين أنَّ مكونة السرعة v_2 العمودية على المحور تبقى ثابتة. ولذلك فإنَّ:-

$$v_{ص1} = v_{ص2}$$

$$v_1 \text{ جا } \alpha = v_2 \text{ جا } \beta,$$

[٨-٢:٥]

$$\text{أي:} \quad \boxed{\frac{v_2}{v_1} = \frac{\text{جا } \alpha}{\text{جا } \beta}} \dots\dots$$

والمعادلة الأخيرة هي قانون بُشي لانكسار الحزمة الإلكترونية. ومن الواضح أنَّ هنالك تشابهاً قريباً بينها وقانون سنيل للانكسار:

$$[9-2:5] \quad \dots \frac{v}{v} = \frac{r}{r} = \frac{\alpha}{\beta} \text{ جا}$$

ولكن خلافاً للضوء، يمكنُ تغيير السرعة مما يوفرُ لذلك درجةً حريةً واحدةً زيادةً عما كانَ لنا. وإذا كانَ جهدا المشبكين هما v_1 ، v_2 ، فإنَّ قانون بُشي يصبحُ:-

$$[10-2:5] \quad \dots \sqrt{\frac{v_2}{v_1}} = \frac{\alpha}{\beta} \text{ جا}$$

مثال:

سورعتُ إلكترونات بجهدٍ مقداره ٢٠٠٠ فولت، ثم أَدْخَلْتُ مجالاً كهربائياً بين ثُقبين فارقُ الجهد بينهما ٨٠٠ فولت. فإذا كانت زاوية السقوط ٣٥°، فجدْ زاوية الانكسار.

الحل:

لأنَّ الجهدَ المسارعَ هو ٢٠٠٠ فولت، فإنَّ $v_1 = 2000$. ولما كانَ فارقُ الجهد بين الثقبين ٨٠٠ فولت، فإنَّ $v_2 = 2800$ فولت. ومن قانون بُشي [10-2:5]، نجدُ أنَّ:-

$$\sqrt{\frac{2800}{2000}} = \frac{\alpha}{\beta} \text{ جا}$$

أي أنَّ: $\beta = 29^\circ$.

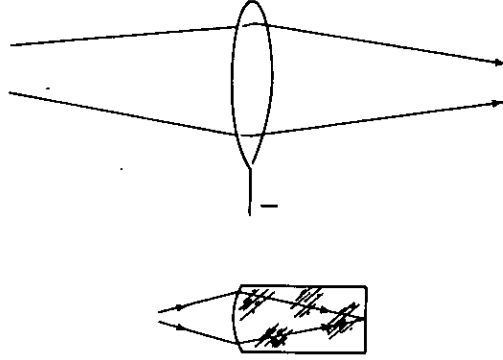
أعدسات الإلكترونات Electron Lenses

تم التطورُ الثاني في مجال بصريات الإلكترونات على يَدَي بوش + الذي تعرَّف في عام ١٩٢٦ أنَّ المجالات المغناطيسية والكهربائية المتماثلة دورانياً تمثلُ عدسات إلكترونية.

*H. Bethe, "Theorie der Beugung von Elektronen an Kristallen," *Ann. Physik* 4 (1928), 55-129.

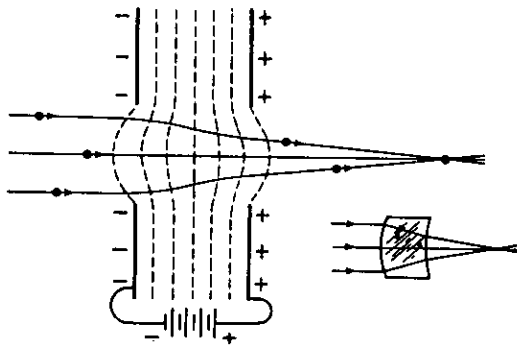
†Hans Busch (1884-), German physicist. "Berechnung der Bahn von Kathodenstrahlen im axialsymmetrischen elektromagnetischen Felde," *Ann. Physik* 81 (1926), 974-93.

والعدسات الكهروستاتيكية أسهل بناءً من العدسات الكهرومغناطيسية، لكنها أشد حساسية للتلويث، كما أنها تحتاج فولتية أكثر استقراراً. وأبسط عدسة كهروستاتيكية هي عبارة عن حلقة أو ثقب مشحون - الشكل ٣: فالإلكترونات التي تمر في هذا الثقب تُجمَعُ

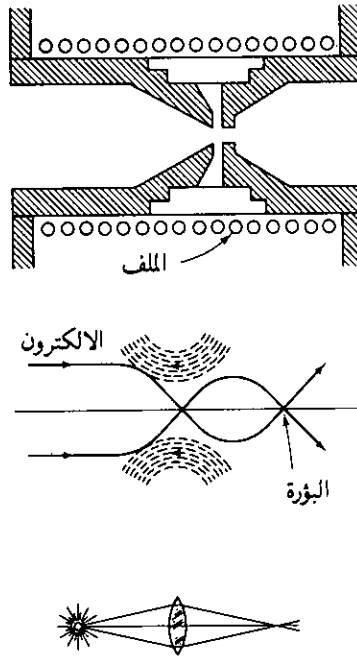


الشكل ٣: عدسة الكترونية ذات ثقب منفرد ومماثلها البصري

لأنها مشحونة كهربائياً تماماً كما يحدث للضوء المار في سطح كاسر محدب. ويمكن عمل عدسة أفضل بضم ثقتين أحدهما مشحون شحنة سالبة والآخر مشحون شحنة موجبة؛ فعندما تمر حزمة إلكترونية في هذه المنظومة فإنها تتجمع بفعل المجال الكهروستاتيكي، وتتفرق قليلاً عندما تخرج منها. غير أنها رغم ذلك تتركز في بؤرة كما لو كانت مارة بعدسة سميكة موجبة هلالية (الشكل ٤). ويُفضل ذلك النوعين العدسة ذات الثقوب الثلاثة، حيث تُحفظ لوحة في الوسط على جهد عالٍ سالب في حين توصل كل من اللوحين على الجانبين بالأرض.



الشكل ٤: عدسة الكترونية ذات ثقب مزدوج ومماثلها البصري (الخطوط المتقطعة تمثل سطوحاً متساوية الجهد).



الشكل ٥: العدسة الالكترونية المغناطيسية: الرسم العلوي هو المقطع العرضي، الرسم في الوسط يُمثّل المسارات، والرسم السفلي هو المماثل البصري. أما الخطوط المتقطعة فتُمثّل خطوط المجال المغناطيسي.

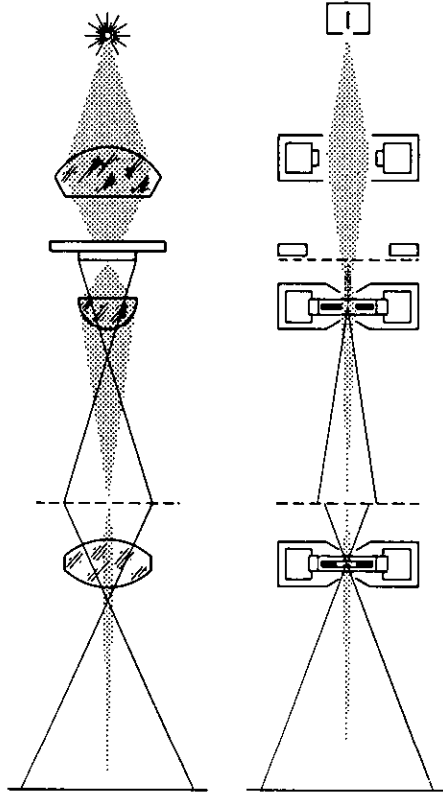
ويعتمد البعد البؤري للعدسة الكهروستاتيكية على المسافة بين اللوحين ولفق الجهد بينهما وقطر الثقبين. ولفق جهد يبلغ عدة كيلوفولتات يمكن الحصول على بُعد بؤري يصل في صغره إلى ١ أو ٢ مم.

أما العدسة المغناطيسية الالكترونية فتشبه مغناطيساً حلقياً الشكل دائمة المغناطيسية - الشكل ٥. وبتغيير التيار في العدسة المغناطيسية أو جهد غشاء العدسة الكهروستاتيكية، يمكن تغيير البعد البؤري للعدسة الإلكترونية. ولذلك، فإن المسافة بين الجسم والعدسة الالكترونية تبقى ثابتة طوال الوقت، على خلاف العدسات البصرية التي ينبغي تحريكها للحصول على تركيز صحيح.

الميكروسكوبية (المجهرية) الالكترونية

المماثل الالكتروني البصري للميكروسكوب الضوئي

استخدم أول ميكروسكوب إلكتروني بناه روسكا ونول* عام ١٩٣١ العدسات الكهرومغناطيسية. وفي عام ١٩٣٥ بنى هول Hall أول ميكروسكوب إلكتروستاتيكي، ثم كان التقدم سريعاً بعد ذلك. وفي أيامنا هذه، توجد ميكروسكوبات إلكترونية تقترب من حدّ التبيين النظري، وتُعطي تكبيراً زاوياً يصل إلى ٧٥٠,٠٠٠ مرة. ويوضح الشكل ٦ المبدأ العام للميكروسكوب الالكتروني جنباً إلى جنب مع شكل للميكروسكوب الضوئي العادي.



الشكل ٦: شكل تخطيطي للميكروسكوب الضوئي (الى اليسار) الذي يُجهز لرسم الصور الصغيرة الميكروية، وكذلك للميكروسكوب الالكتروني الكهروستاتيكي (اليمن). ويظهر الميكروسكوب الضوئي مقلوباً لتأكيد التماثل بين الميكروسكوبين.

*E. Ruska and M. Knoll, *Z. techn. Physik* 12 (1931), 389.

ويتألف الميكروسكوب الإلكتروني من أنبوب معدني طويل (العمود) له بندقيّة إلكترونيّة (من الأعلى إلى الأسفل)، مكثف، حامل العينّة المفحوصة، عدسة شبيّية، عدسة عرض (تكافئ العينّة في الميكروسكوب الضوئي)، وستارة متقلّبة أو لوحة فوتوغرافية. ويفرّع العمود إلى ضغط لا يزيد على 10^{-10} مم زئبق. كما يُسخّن مهبط البندقيّة الإلكترونيّة إلى درجة التوهج. وقد استخدمت كذلك «المهابط الباردة»، وهي تتألف من فلزّ كالألومنيوم له دالة شغل منخفضة. كذلك قد يشتمل الميكروسكوب على مكثّبات أخرى إضافية كعدسة متوسطة توضع بين العدسة الشبيّية وعدسة العرض.

وقد بُنيت ميكروسكوبات إلكترونيّة كبيرة نوعاً ما بلغت فولتيتها المسارعة ما يزيد على (٣) ملايين فولت. ويتمثل الفارق الرئيس في تصميم هذه الأدوات، علاوة على تكبير أبعادها الكلية، في وجود مسارع يوضع بين البندقيّة الإلكترونيّة والميكروسكوب الفعلي. ولا تكمن الفائدة الأساسيّة في التكبير الزاويّ العالي وإنما في قدرة الاختراق المتزايدة. وتجذّ الميكروسكوبات الإلكترونيّة ذات الفولتية العالية (الجهود العالي) تطبيقاً لها في علم المعادن حيثُ يخترق الشعاع الإلكترونيّ الفلزّ إلى عمق يزيد على ٠,٠١ مم، وفي علم الأحياء بغرض دراسة المادة الحيّة. وفي العادة لا يمكنُ فحصُ المادة الأحيائية وهي حيّة، لأن ذلك يُعرّضها للفراغ. وهناك حلان واعدان: فقد وُضعت البكتيريا الحيّة في كبسولات صغيرة جداً مملوءة بالهواء، كذلك فقد أمكنَ تمريرُ حزمة إلكترونيّة عبْرَ متسلسلة من الاغلاق الهوائية إلى الهواء تحت ضغط جويّ عاديّ.

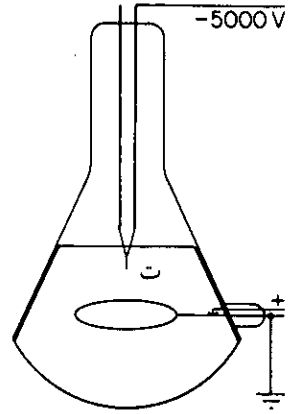
ومن الجدير أن نذكر أن التجارب والعروض الإلكترونيّة البصريّة يسهلُ إجراؤها إلى حدٍ كبيرٍ باستخدام وحدات بناء (مُجمّعات modules) يمكنُ تجميعها وفكّها بسرعة كأيّة أجزاء على منضدة بصرية عادية*. أما المِشبار الإلكتروني electron microsonde فيشبه الميكروسكوب الإلكتروني من حيثُ أنّه يقذفُ العينّة المفحوصة بحزمة إلكترونيّة مركزة تركيزاً حاداً، وبعْدَ ذلك تُحلّلُ أطياؤُ الأشعة السينيّة المُهَيَّجَة بهذه الكيفيّة لتتبع العناصر الكيميائيّة الموجودة.

*B. Schumacher, "Dynamische Druckstufenstrecken für den Einschuss intensiver, monokinetischer Korpuskularstrahlbündel in Gase hohen Drucks," *Optik* 10 (1953), 116-31.

†E. Ruska, "Über den Aufbau einer elektronenoptischen Bank für Versuche und Demonstrationen," *Z. wiss. Mikroskopie* 60 (1952), 317-28.

ميكروسكوب الانبعاث بالمجال Field emission microscope

ويعتبر هذا الميكروسكوب^١ نوعاً خاصاً من الميكروسكوب الإلكتروني الذي يسمح بتكبير عالٍ لبعض الأجسام، وهو يتألف من وعاء مفرغ يحوي قطباً أبرياً مدبباً وستارة متفلرة - الشكل ٧. وتصنع الإبرة الفلزية عادةً من التنجستن وهي تقوم مقام المهبط، أما المصعد فهو عبارة عن حلقة فلزية تثبت مقابلها. ويولّد بين المهبط والمصعد فرق جهد مقداره ٥ كيلو فولتات تقريباً بواسطة مولّد فان دي جرااف Van de Graaff. ويُنْتِج فرق الجهد هذا مجالاً كهربائياً قوياً حول رأس الإبرة الذي يصير لذلك مصدر الانبعاث «البارد» للإلكترونات، ثم تُسارع الإلكترونات صوب الستارة.



الشكل ٧: ميكروسكوب الانبعاث بالمجال: ت رأس التنجستن. يحتوي المصعد على فتيلة لتبخير المادة التي يراد ترسيبها على رأس الإبرة.

ويمكن تحديد درجة التكبير التي يراود الحصول عليها من الرسم الهندسي، وهي تُعطى بالمعادلة التالية:-

$$ت = \frac{نق٢}{نق١} \dots\dots$$

[١١-٢:٥]

حيث نق١ نصف قطر رأس الإبرة، نق٢ نصف قطر الستارة التي تشترك معها في المركز.

مثال:

يمكن جعل رأس التنجستن دقيقاً جداً من خلال حَكِّه بمُنَصَّهَر نترات الصوديوم منتجاً لذلك رأساً نصف قطره ١,١×١٠^{-١٠} مم. وإذا كان نصف قطر الستارة المتفلرة ١٠ سم، فإن قيمة التكبير الزاوي تبلغ $\frac{١٠ \text{ سم}}{١,١ \times ١٠^{-١٠} \text{ مم}} = ١٠^١٠$ مرة..

فرأس المهبط، عند حَكِّه جيداً، هو عبارة عن بلورة منفردة من التنجستن، التي يظهر تركيبها البلوري على الستارة مثل رُقاقات معتمة وساطعة. وتلصق بعض المواد مثل ذرات الباريوم بسهولة على سطح التنجستن؛ وبِتسخينها، تُظهِر بوضوح اضطراباً حرارياً. ومن الممكن رؤية حتى جزيئات بمفردها. فعلى سبيل المثال يظهر الفثالوسيانين الذي يترسب على رأس التنجستن من طريق التبخير من المصعد مائلاً تقريباً لشكل جزيء هذه المادة ذي الفروع الأربعة كما تتنبأ به النظرية تماماً.

^١E. W. Müller, "Die Sichtbarmachung einzelner Atome und Moleküle im Feld-elektronenmikroskop," *Zschr. Naturforsch.* 5A (1950), 473-79; "Atoms Visualized," *Sci. American* 196 (June 1957), 113-22.

ميكروسكوب أيون المجال Field ion microscope

نعرف من معادلة دو بروي الموجية ($\lambda = \frac{h}{p}$) أن الدقائق الثقيلة لها طول موجي أقصر. وقد أدت هذه الحقيقة إلى تطوير ميكروسكوب تستخدم فيه دقائق ثقيلة كالبروتونات بدل الإلكترونات لأغراض تكوين الصورة. ونظراً لأن كتلة البروتون تبلغ ١٨٤٠ مرة قدر كتلة الإلكترون، فإن البروتون الذي له نفس طاقة حركة الإلكترون يملك طولاً موجياً يبلغ $\frac{1}{43}$ من الطول الموجي للإلكترون.

ومن حيث المبدأ، يشبه هذا الميكروسكوب ميكروسكوب الانبعاث بالمجال. أما الفارق الرئيس بينهما فيظهر في أن الإبرة تكون موجبة الشحنة بدل كونها سالبة. وتأتي الأيونات الموجبة من غاز الهيليوم الذي يُحفظ على ضغط منخفض داخل الوعاء. وبوجود مجال كهربائي قوي حول رأس الإبرة، فإن الإلكترونات في ذرة الهيليوم القريبة من الرأس تقفز نحوه، بينما تندفع أيونات الهيليوم الموجبة بتأثير الجهد الموجب العالي للإبرة صوب الستارة المواجهة. ويحدث التأين بصورة أساسية عند الأجزاء البارزة من رأس الإبرة؛ ومن ثم تُكوّن الأيونات صورةً للبنية البلورية على الستارة تظهر فيها بوضوح كل النقائص كالفراغات والشقوق والعيوب البنائية الأخرى.

حيود الإلكترونات Electron Diffraction

يشبه حيود الإلكترونات بصورة أساسية حيود الأشعة السينية الذي بُحث في الفصل ٧:٢، وتنطبق عليها لذلك معادله براج:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \dots\dots$$

وفي معظم الحالات تكون θ صغيرة أي من رتبة بضعة درجات على الأكثر. ولذا فإن $\theta \approx \theta$ جا. ولذا يصبح قانون براج على النحو التالي: - $n\lambda \approx 2d \sin \theta$.

*H. Börsch, "Ionenübermikroskopie," *Experientia* 4 (1948), 1-5. E. W. Müller and T. T. Tsong, *Field Ion Microscopy* (New York: American Elsevier Publishing Co., Inc., 1969).

مثال:

ما سرعة الإلكترونات اللازمة للحصول على زاوية حيود $\theta = 3^\circ$ من بلورة المسافة بين أيّ مستويين فيها $1.0 \times 10^{-8} \text{ م}$ ؟

الحل:

لأن $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ ، وبتعويض هذه القيمة في قانون براج، نجد أن:-

$$v = \frac{h}{m \cdot \lambda} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \cdot (1.0 \times 10^{-8} \cdot \sin 1.5^\circ)} = 1.04 \times 10^4 \text{ م/ث.}$$

وإذا ما استخدمت الإلكترونات البطيئة أي الإلكترونات التي تقل طاقة حركتها عن بضعة مئات من الإلكترون فولتات، فإن هذه العملية تُعرف أحياناً اختصاراً بـ LEED (Low Energy Electron Diffraction) أي حيود الإلكترونات ذات الطاقة المنخفضة.

اقتراحات لقراءات إضافية

- D. H. Kay, *Techniques for Electron Microscopy* (Philadelphia: Davis, 1965).
- M. E. Haine and V. E. Cosslett, *The Electron Microscope* (London: E. & F. N. Spon Ltd., 1961).
- S. Wischnitzer, *Introduction to Electron Microscopy*, 2nd ed. (New York: Pergamon Press, Inc., 1970).
- P. Grivet, *Electron Optics* (Oxford: Pergamon Press, Inc., 1965).
- C. E. Hall, *Introduction to Electron Microscopy* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1966).

المسائل

- ١-٢:٥ إذا كَانَ الفارقُ في الجهدِ بين المصعدِ والمهبطِ في أنبوبِ إلكترونيٍّ ١٤٦٠ فولتاً، فَبَدَّ سرعةَ الإلكتروناتِ المكتسبةَ عند بلوغها المصعد.
- ٢-٢:٥ سَوَّعَتْ إلكتروناتٌ عَبَرَ فارقَ جهدٍ مقداره ١٠٠٠ فولت، ثم أُدخِلَتْ مجالاً كهربائياً بين مُشَبِّكَيْنِ: المشبِكُ الأوَّلُ ثُبَّتَ على جُهدٍ - ١٠٠٠ فولت بينما ثُبَّتَ المشبِكُ الثاني على جُهدٍ - ١٥٠٠ فولت. فإذا كانت زاويةُ السقوطِ ٤٠°، فَبَدَّ زاويةَ انكسارِ حزمةِ الإلكتروناتِ.
- ٣-٢:٥ مرت الإلكتروناتُ المنبعثةُ من مهبطٍ ساخنٍ عَبَرَ ثَقْبٍ صَغِيرٍ في لوحةٍ جهدها ٥٠٠ فولت بالنسبةِ إلى المهبطِ. أ) جد سرعةَ الإلكتروناتِ عِنْدَ مرورِها في الثقبِ ب) ثُبَّتْ لوحةٌ ثانيةٌ على مسافةٍ ما خلفَ اللوحةِ الأولى وموازياً لها وعلى جُهدٍ - ٤ كيلو فولت بالنسبةِ إلى المهبطِ، صفِّ حركةَ الإلكتروناتِ في المنطقةِ بين اللوحينِ.
- ٤-٢:٥ سَرَّعَتْ إلكتروناتٌ عَبَرَ فارقَ جهدٍ يبلغُ ٤,٤ كيلو فولت. جد سرعةَ الإلكتروناتِ، وَجد كذلك طاقةَ حركتها بالإلكترون فولت.
- ٥-٢:٥ يتحركُ إلكترونٌ بسرعةَ $2,5 \times 10^7$ م/ث في مجالٍ كهربائيٍّ يؤثرُ بقوةٍ ثابتةٍ تساوي $4,2 \times 10^{-16}$ نيوتن عموديةً على اتجاهِ حركتهِ. كم ينحرفُ الإلكترونُ عن الاتجاهِ الإماميِّ في أثناءِ الزمنِ الذي قَطَعَ فيه ١٠ سم؟
- ٦-٢:٥ تعاني عدسةُ إلكترونيةٌ كهرومغناطيسيةٌ من زوغانٍ استجماتيٍّ عالٍ غيرٍ متوازن. فإذا كان لديك علاوةٌ على العدسةِ الإلكترونيةِ عددٌ من الملفاتِ الحلزونيةِ فكيف ترتبها لِتَعَوِّضَ الزوغانَ؟
- ٧-٢:٥ حزمةٌ من الإلكتروناتِ التي لَهَا سرعةٌ منتظمةٌ تبلغُ $4,4 \times 10^7$ م/ث تدخلُ مجالاً مغناطيسياً عمودياً على اتجاهِ حركتها. فإذا كانت شدةُ الحثِّ المغناطيسي $B = 0,0016$ وِبَرِّم/٢، فَبَدَّ نصفَ قُطرِ المسارِ المنحني الذي تسيرُ فيه الإلكتروناتُ داخلَ المجالِ؟

٨-٢:٥ جد نصف قطر تقوس المسار الذي يسير فيه بروتون سرعته $١٠ \times ٦,٥$ م/ث

عند قذفه عمودياً على مجال مغناطيسي شدته $٠,٠٢٦$ وبر/م $٢,٩$

٩-٢:٥ جد الطول الموجي للبروتونات التي تسرع عبر فارق جهد مقداره ٤٠ كيلو

فولت.

١٠-٢:٥ إذا حُيِّت إلكترونات سرعتها $١٠ \times ٢,٢$ م/ث بزاوية مقدارها $٢,٦$ فجد

المسافة بين أي مستويين في البلورة المحيطة.

الفصل ٥ : ٣

الأطياف الذرية

Atomic Spectra

نميز هنا نوعين أساسيين من الأطياف: أطياف الانبعاث وأطياف الامتصاص. وينقسم كل نوع منهما الى ثلاثة أجزاء هي: الأطياف الخطية line، الأطياف المتصلة Continuous، والأطياف النطاقية band (الجدول ١).

تصنيف الاطياف

تنشأ الأطياف الخطية من انبعاث أو إشعاع الذرات أو الجزيئات أو امتصاصها. فعلى سبيل المثال، يمكن الحصول على أطياف الانبعاث الخطية line emission من الغازات ذات الضغط المنخفض ودرجة الحرارة العالية؛ فكل عنصر يشع نقطة المميز من الخطوط التي تحدد هوية العنصر الكيميائي بصورة متفردة. وهذا المبدأ هو أساس مطيافية الانبعاث emission spectroscopy. ولبعض العناصر كالهيدروجين والنيون خطوط قليلة متباعدة، في حين يوجد لعناصر أخرى كالحديد عدة آلاف من خطوط الطيف.

وتنتج أطياف الانبعاث المتصلة من الجوامد الساخنة كفتيلة التنجستن أو من الغازات الساخنة تحت ضغط عال. ففي هذه الحالة، تكون الذرات متقاربة أكثر مما هي عليه تحت ضغط منخفض، ولذلك يتأثر إشعاعها باهتزازات الذرات المجاورة. أما أطياف الانبعاث النطاقية فهي أطياف جزيئية تشاهد في الفلورة fluorescence والفسفرة phosphorescence؛

* جوستاف كيرتشف (١٨٢٤-١٨٨٧): استاذ الفيزياء في جامعة هيدلبرج بألمانيا؛ روبرت ولهم بنين (١٨١١-١٨٩٩): أستاذ الكيمياء في الجامعة نفسها.

G. Kirchhoff and R. Bunsen, "Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen,"

Ann. Physik u. Chemie 110 (1860), 161-89.

الجدول ١ : أنواع الأطياف

أطياف الانبعاث	أطياف الامتصاص
الاطياف الخطية	الاطياف الخطية
الغازات تحت ضغط منخفض	الغازات أحادية الذرات تحت ضغط منخفض ودرجة حرارة منخفضة
الاطياف المتصلة	الاطياف المتصلة
الجوامد في درجة الحرارة العالية والغازات تحت ضغط عال	المادة الشفافة
الاطياف النطاقية	الاطياف النطاقية
فلورة الجزيئات وفسفرتها	

ويتألف كل نطاق منها من عددٍ من الخطوط المتقاربة جداً التي تتوزع من غير انتظامٍ من حيث الطول الموجي والشدة.

وتتكون أطياف الامتصاص المتصلة من المواد الشفافة التي تمتص جزءاً من الضوء المار فيها. وإذا حدث الامتصاص في الجزء المرئي من الطيف، بدت المادة ملونة. وتنشأ أطياف الامتصاص الخطية عندما يمر الضوء الأبيض في غاز أحادي الذرات تحت ضغط منخفض ودرجة حرارة أخفض من درجة حرارة المصدر، ومن الأمثلة عليها خطوط فرونفهر التي تروى في طيف الشمس.

القوانين التي تحكم اطياف الانبعاث المتصلة

قانون كرتشوف Kirchhoff's Law

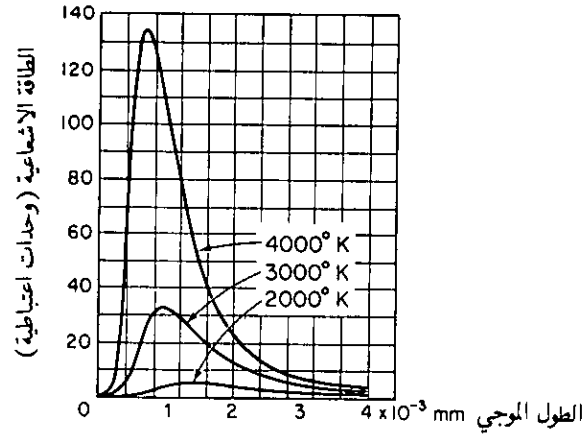
هنالك علاقة طردية بين الانبعاث والامتصاص؛ وتصاغ هذه العلاقة في قانون

كيرتشوف^{*} الذي ينص على أن الجسم الذي يشع بقوة عند طول موجي مُعَيَّن هو ممتص قوي للطاقة الإشعاعية ذات الطول الموجي نفسه. ويُسمى الجسم الذي يشع ويمتص بصورة فاعلة كُلّ أمواج الطيف بالجسم الأسود المشع الذي بُحِث سابقاً عند تناول عمَل بلانك.

قانون فين للإزاحة Wien's displacement Law

تشكُل الطاقة التي يُشعُّها الجسمُ الأسود طيفاً متصلاً. لكنَّ توزيع الطاقة الطيفي لا يعتمدُ على مادة الجسم الأسود، بل يعتمدُ على درجة حرارته فقط؛ إذ تعطي كُلُّ الجوامد الساخنة المتساوية في درجة الحرارة تقريباً طيفاً واحداً. أمّا الأجسامُ الشفافة أو شديدة العكس فهي ممتصات رديئة ومشعات ضعيفة للطاقة الإشعاعية.

وعند درجات الحرارة المنخفضة، تُشعُّ الأشعة تحت الحمراء بصورة أساسية. وبازدياد درجة الحرارة تدريجياً، يتحول لون المادة إلى الأحمر الغامق فالأحمر الساطع ثُمَّ إلى الأبيض الساخن (الشكل ١).



الشكل ١: التوزيع الطيفي للطاقة الإشعاعية المنبعثة من الجسم الأسود عند درجات حرارة ثلاث مختلفة.

وتوصفُ الإزاحة نحو الأطوال الموجية الأقصر (أي التغير في درجة حرارة اللون) والتي تحدثُ بازدياد درجة الحرارة بقانون فين للإزاحة. وينصُّ هذا القانونُ على أنه بازدياد درجة

*G. Kirchhoff, *Poggendorf's Annalen* 109 (1860), 275.

الحرارة تزداد الطاقة المشعة، وتتزايد نسبة الزيادة عند الأطوال الموجية الأقصر. وبصيغة عديدة، نجد أن:-

$$\lambda \text{ قصوى} = \frac{2898}{C} \dots\dots [1-3:5]$$

حيث يعبر عن الطول الموجي بوحدات هي ١٠-٣ مم وعن ح بدرجات الحرارة المطلقة؛ ومن ثم فإن مضاعفة درجة الحرارة تزيد الطول الموجي [عند أقصى طاقة له] إلى نصف قيمته الأصلية.

قانون الإشعاع لبلاك Planck's radiation law

يمكن وصف شكل منحنى التوزيع بقانون الإشعاع لبلاك. ويمثل قانون لبلاك الإشعاعية الطيفية للجسم الأسود radiance بدلالة الطول الموجي ودرجة الحرارة:

$$C = \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \dots\dots [2-3:5]$$

و يشمل هذا القانون قانون فين للازاحة وقانون ستيفان-بولتزمان Stefan-Boltzmann الذي سيبحث بعد هذا القانون مباشرة؛ أما الثابتان k ، T اللذان يسميان ثابتي الإشعاع الأول والثاني فقيمتهم على الترتيب: 1.38×10^{-23} واط. متر^٢. سيترايان-١، 5.67×10^{-8} سم. درجة مطلقة.

قانون ستيفان - بولتزمان *

تمثل المساحة تحت المنحنى أي تحت أي من المنحنيات في الشكل ١ القدرة الكلية

* جوزيف ستيفان (١٨٣٥-١٨٩٣): الفيزيائي النمساوي الذي توصل الى العلاقة هذه بالتجربة. لدفيج بولتزمان (١٨٤٤-١٩٠٦): استاذ الفيزياء في جامعة فينا الذي اشتق القانون نظريا وباستقلال عن ستيفان.

J. Stefan, Wien. Akad. Sitzungsber. 79 (1879), 391; L. Boltzmann, "Ueber eine von Hr. Bartoli entdeckte Beziehung der Wärmestrahlung zum zweiten Hauptsatz," Ann. Physik u. Chemie 22 (1884), 31-9.

المُشعَّة في درجة حرارة معينة. وقد وُجِدَ أنَّ هذه القدرة تزدادُ مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة:-

[٣-٣:٥]

.....

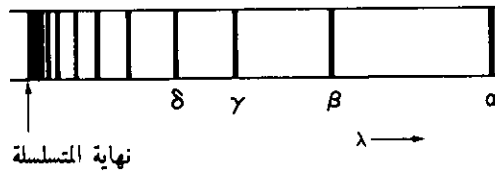
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{ح}^٤$$

ويعرفُ هذا القانونُ بقانونِ ستيفان-بولتزمان، حيثُ P هي القدرةُ الإشعاعيةُ (بالواط) التي يشعُّها جسمٌ أسودٌ مساحةً سطحه A عند درجة الحرارة المطلقة T . أما الحدُّ P/A فيعرفُ أيضاً بالخروجية σ ، أما الثابتُ σ فيبلغ 5.67×10^{-8} واط. م-٢. درجة حرارة مطلقة-٤.

أطياف الانبعاث الخطي

المكتشفات التجريبية والاستنتاجات

دعنا ننظرُ إلى طيفِ انبعاثِ مِيزِ كَطيْفِ الهيدروجين الذي يَسْهُلُ تفسيره. اننا نجدُ في هذا الطيفِ منظومةً من الخطوط ذاتِ مسافاتٍ بينيةٍ وشداتٍ معينةٍ في ترتيبٍ يوحى مباشرةً بنظامِ باطني - الشكل ٢. وتسمى مجموعةُ الخطوطِ هذه متسلسلةً. ويعتبرُ الخطُّ الأكثرُ بروزاً في أية متسلسلةٍ الخطُّ الأطولَ من حيثِ الطولُ الموجيُّ (إلى اليمينِ في الرسمِ المبينِ في الشكل) ويرمزُ إليه بالرمزِ α . ويرمزُ إلى الخطِّ الثاني إلى اليسارِ بالرمزِ β ، وهكذا دواليك. وتزدحمُ الخطوطُ عند طرفِ الأطوالِ الموجيةِ القصيرةِ (بعيداً إلى اليسار) حتى نصلَ إلى نهايةِ المتسلسلة.



الشكل ٢: متسلسلة الخطوط في طيف الهيدروجين.

وقد وَجَدَ بالمر Balmer في عام ١٨٨٥ بالتجريبية والخطأ معادلة تصف المسافات بين الخطوط في المنطقة المرئية من طيف الهيدروجين. وبعد ذلك بفترة قصيرة اكتشفت عدة متسلسلات من خطوط الهيدروجين؛ فاكشف ليمنان Lyman متسلسلة في منطقة فوق البنفسجي، كذلك اكتشف باشن paschen متسلسلة أخرى في منطقة تحت الأحمر. أما المعادلة العامة التي تصف جميع هذه المتسلسلات في طيف الهيدروجين فقد استنتجها ريديبرج Rydberg + عام ١٨٩٠:

[१-३:०]

$$\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_f} \right)_{HR} = \frac{1}{\lambda}$$

وفي هذه المعادلة، λ هي الطول الموجي بالمتري، HR هو ثابت ريدبيرج للهيدروجين $1.09678 \times 10^7 \text{ م}^{-1}$ ، م هو عدد صحيح مثل 1، 2، 3 وهو ثابت في المتسلسلة الواحدة و N هو العدد الكوانتي وهو عدد صحيح 2، 3، 4، ... ∞ للمتسلسلة الواحدة. وتحدد أصغر قيمة لـ N في أية متسلسلة على النحو التالي:-

$$1 + m = n$$

وبافتراق n من مالا نهاية ($n \leftarrow \infty$)، تزدحم الخطوط وتكون نهاية المتسلسلة. وتخصص القيمة $m = 1$ المتسلسلة الأولى للهيدروجين (متسلسلة ليمان) والقيمة $m = 2$ متسلسلة بالمر، و $m = 3$ متسلسلة باشن وهلم جزأ. ويُعطى الخط الأول α في أية متسلسلة بـ: $n = m + 1$ ، والخط الثاني β بـ: $n = m + 2$ ، والخط الثالث γ بـ: $n = m + 3$ ، وهكذا دواليك. ويُلخص الجدول ٢ متسلسلات الهيدروجين كما تُعرف اليوم بقيم m و n التي تميزها.

وينظرُ الخطُّ الأطولُ في الطولِ الموجيِّ في أيةِ متسلسلةٍ أصغرَ قيمةٍ ممكنةٍ للعددِ الجاري

أي $n = m + 1$. وكمثالٍ على ذلك، انظرُ إلى الأعدادِ الكوانتيةِ التي تناظرُ الخطوطِ المنفردةَ

• يوهان جاكوب بالمَر (١٨٢٥-١٨٩٨): الفيزيائي السويسري.

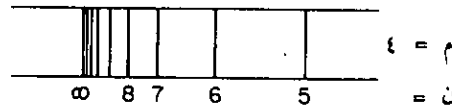
J. J. Balmer, "Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs," *Ann. Physik u. Chemie* **25** (1885), 80-7.

+ یوهانس ریڈبیرج (۱۸۵۴-۱۹۱۹).

الجدول ٢ : تلخيص لمتسلسلات الهيدروجين

الاسم	المكتشف	الاعداد الصحيحة	المدى الطيفي
متسلسلة ليمان	توماس ليمان	$m = 1$	
	١٩٠٦	$n = 2, 3, 4, \dots, \infty$	فوق البنفسجي
متسلسلة بالمر	ج.ج. بالمر	$m = 2$	
	١٨٩٥	$n = 3, 4, 5, \dots, \infty$	المرئي
متسلسلة باشن	ف. باشن	$m = 3$	
	١٩٠٨	$n = 4, 5, 6, \dots, \infty$	تحت الأحمر
متسلسلة براكيت	ب. س. براكيت	$m = 4$	
Brackett	١٩٢٢	$n = 5, 6, 7, \dots, \infty$	تحت الأحمر
متسلسلة فند	أ. ه. فند	$m = 5$	
Pfund	١٩٢٤	$n = 6, 7, 8, \dots, \infty$	تحت الأحمر العالي
متسلسلة همفري	همفري	$m = 6$	
Humphrey		$n = 7, 8, 9, \dots, \infty$	تحت الأحمر العالي

في متسلسلة براكيت للهيدروجين Brackett (الشكل ٣). فالخط α في متسلسلة ليمان للهيدروجين هو خط قوي بشكل خاص (λ ١٢١٨ نـم). وتُشعُّ الشمس هذا الخط، وهو يُمتَصُّ كليةً بالهواء؛ ومع هذا فهو ذو أهمية في الرحلات القمرية ورحلات الكواكب.



الشكل ٣: الاعداد الانكوانتية ن في متسلسلة براكيت للهيدروجين (م=٤)

استنتاجات نظرية

لكي نفهم لماذا تترتب خطوط الطيف في شكل منتظم، دعنا نتناول البنية الذرية للمادة. ففوق نظرية رذرفورد-بور Rutherford-Bohr، تتألف الذرة من نواة ثقيلة موجبة الشحنة تحيط بها إلكترونات سالبة الشحنة. ويمكن تصور الإلكترونات كأنها تدور حول النواة في كيفية لا تختلف عن دوران الكواكب حول الشمس. غيّر أن هذه المماثلة لا ينبغي أن تؤخذ بجديّة تامة، ذلك لأن مدارات الإلكترونات تتأثر بشدة بقوانين الميكانيكا الكوانتية.

اعتبر إلكترونات يتحرك في مدار دائري نصف قطره r . إن القوة المركزية F_c اللازمة لحفظ كتلة m في الدائرة بسرعة v كما تذكر من الميكانيكا الكلاسيكية هي:-

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \dots\dots [5-3:5]$$

وتساوي هذه القوة قوة الجذب الكهروستاتيكي التي تعطى بقانون كولمب's law :-

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \dots\dots [6-3:5]$$

ولذلك، فإن:-

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \dots\dots [7-3:5]$$

حيث e هي شحنة الإلكترون و e هي المُنفِذِيَّة الكهربائية للخلاء (الفراغ) التام. أما طاقة حركة الإلكترون فهي:-

$$K.E. = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} \dots\dots [8-3:5]$$

إن طاقة الوضع هي حاصل ضرب القوة في المسافة. ويتبع من حساب تكامل المعادلة [6-3:5] أن:-

$$[٩-٣:٥] \quad \text{ط. و} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \dots\dots$$

ولذلك، فإنَّ طاقةَ الإلكترونِ الكليةَ ط التي هي مجموعُ طاقةِ حركتهِ وطاقةِ وضعه هي على النحو التالي:-

$$[١٠-٣:٥] \quad \text{ط} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \dots\dots$$

ولكنَّ الطاقة لا تأخذُ أيةَ قيمةٍ كانت، وإنما تأخذُ قيمةً محددةً تخصُّها النظرية الكوانتية. ونجدُ من المعادلةِ [٨-٣:٥] أنَّ السرعةَ الخطيةَ للإلكترونِ هي:-

$$[١١-٣:٥] \quad v = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \dots\dots}$$

أما السرعةُ الزاويةُ ω فهي $\omega = \frac{v}{r}$ ، وبذلك نجدُ أنَّ ω هي:-

$$[١٢-٣:٥] \quad \omega = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \dots\dots}$$

والزخمُ الزاويُّ ي هو حاصلُ ضربِ عزمِ القصورِ I (الذي يساوي في هذه الحالة ك نق^٢) في السرعةَ الزاويةَ ω ، أي أنَّ:-

$$[١٣-٣:٥] \quad \dots\dots \quad Y = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \dots\dots} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \dots\dots}$$

ومن ثَمَّ فإذا عرفتُ نق، أمكنك معرفةَ البارامتراتِ الأخرى والطاقاتُ والسرْعُ والزخمُ للإلكترونِ. وإذا كانت إحداها مُكمَّمةً، كالطاقة مثلاً، وجب أن تكونَ جميعُها مثل ذلك. ولقدْ خطرَ لـنيلز بوره عندئذٍ أنَّ الزخمَ الزاويَّ يأخذُ فقط قيمةً هي مضاعفاتٌ صحيحةٌ للمقدارِ $\frac{h}{2\pi}$ ، بِمعنى أنَّ:-

• نيلز بور Niels Bohr (١٨٨٥-١٩٦٢): الفيزيائي الدانماركي. درس على يدي أرنست رذرفورد وحصل على جائزة نوبل عام ١٩٢٢.

[١٤-٣:٥]

$$ي = ن \frac{h}{ط} \dots\dots$$

حيث ن هو العدد الكوانتي و h هو ثابت بلانك؛ وهذا افتراض لا يمكن تبريره كلاسيكياً. وبضمّ المعادلتين [١٣-٣:٥] معاً، و [١٤-٣:٥] وبإجراء الحَلِّ للحصول على ن، نجد أن:-

$$نق = \frac{ن^2 h^2}{ط^2 e} ، ن = ١ ، ٢ ، ٣ ، \dots\dots [١٥-٣:٥]$$

ذرة الهيدروجين

وَبَوْضِع القيم المناسبة التالية لذرة الهيدروجين في المعادلة السابقة:

$$ن = ١$$

$$h = ٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤} \text{ جول. ثانية}$$

$$e = ٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢} \text{ كولم / نيوتن م}^٢$$

$$e = ١,٦ \times ١٠^{-١٩} \text{ كولم}$$

$$ك = ٩,١ \times ١٠^{-٣١} \text{ كغ}$$

نجد أن ن هي:-

$$نق = \frac{(٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤})^2 \times (٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢})}{(٩,١ \times ١٠^{-١٩}) \times (٩,١ \times ١٠^{-٣١}) \times ٣,١٤}$$

$$= \frac{١٢ \times ٨,٨٥ \times ٦,٦٣ \times ١٠^{-٤٤}}{٣١ \times ٩,١ \times ٩,١ \times ٣,١٤ \times ١٠^{-٥٠}}$$

$$= ٠,٥٣ \times ١٠^{-١٠} \text{ م}$$

ويعني ذلك أن الإلكترون في ذرة الهيدروجين يدور في مدار نصف قطره تقريباً ٠,٥ أنجستروم. ولكي نجد الطاقة الكلية نضمّ المعادلة [١٥-٣:٥] في المعادلة [١٠-٣:٥]:

$$[١٦-٣:٥] \quad \dots\dots ٠٠٠, ٣, ٢, ١ = n, \quad \frac{e^2 k}{h^2 n^2} = \text{ط}$$

وتصف هذه المعادلة قيم الطاقة للحالات الممكنة المختلفة. ولذرة الهيدروجين نجد أن:-

$$\begin{aligned} \text{ط} &= \frac{31-10 \times 9,1 \times 10^{-31} (19-10 \times 1,6-)}{2(34-10 \times 6,63) \times 2(12-10 \times 8,85) \times 8} \\ &= \frac{31-10 \times 9,1 \times 10^{-31} - 10 \times 6,5}{68-10 \times 44 \times 10^{-34} - 10 \times 78 \times 8} \end{aligned}$$

$$= 18-10 \times 2,19 \text{ جول}$$

$$\text{لكن } ١ \text{ جول} = 1810 \times 6,25 \text{ إلكترون فولت،}$$

$$٠٠٠ \text{ ط} = ١٣,٦ \text{ إلكترون فولت.}$$

وهذا المقدار، بعبارة أخرى، هو الطاقة اللازمة لرفع ذرة الهيدروجين من الحالة الأرضية إلى مستوى التأين.

وهناك بعض التحسينات لهذا النموذج الكوكبي الكوانتي لا نستطيع بحثها هنا بالتفصيل. فعلى سبيل المثال، فإن الإلكترونات لا تدور ببساطة حول النواة وإنما تدور الإلكترونات والنواة حول مركز الثقل الجاذبي المشترك لهما. كذلك فإن المدارات هي إهليلجية في شكلها وليست دائرية، كما أن المحور الأساسي للإهليلج يدور حول مركز الثقل المشترك. وأخيراً، ينبغي تطبيق الميكانيكا النسبوية relativistic على حركة الإلكترونات بدل الميكانيكا الكلاسيكية وكذلك الميكانيكا الكوانتية.

المستويات الطاقية Energy Levels

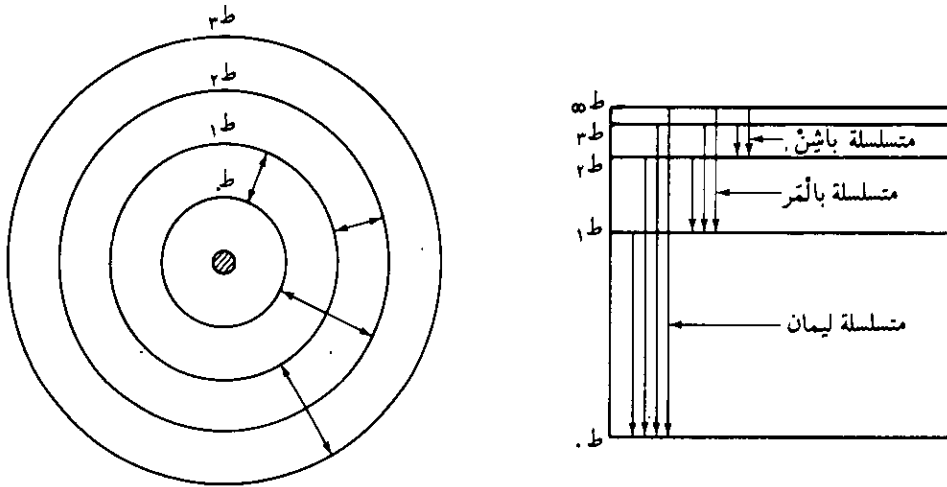
تميل الذرات عادة إلى أن تكون في الحالة العادية أو الأرضية ط.، وهي لا تحتل المستويات الطاقية العليا. لكن إذا ما زوّدت الذرة بالطاقة على نحو ما، فإنها تنتقل إلى

حالات أعلى أو مُهَيَّجَة excited ط_١ . ولا يتسبب الانتقال إلى مستوى طاقي أعلى في انبعاث الضوء. وفي المقابل، فإن انبعاث الضوء يتم بالانتقال إلى حالة أخفض، إذ تطرح الذرة الطاقة الزائدة وتشتعها في صورة ضوء أو طاقة كهرومغناطيسية أخرى. ويحدث عكس هذه العملية في الامتصاص.

وبصورة كمية، فإن أي انتقال بين حالتين يعني امتصاص أو انبعاث كوانتم واحد من الطاقة المُشعَّة على النحو التالي:-

$$h \nu = E_2 - E_1 \dots\dots [١٧-٣:٥]$$

وتعرف المعادلة الأخيرة بقانون بلانك، حيث h هي ثابت بلانك $٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}$ جول - ثانية و λ هي التواتر. وتبعاً لكون الانتقال من ط_١ إلى ط_٢ (الامتصاص) أو من ط_٢ إلى ط_١ (الانبعاث)، فإن التواتر المعني يُتعرَّف إليه بالرمز السفلي على النحو ν_1 ، ν_2 . ويمكن تمثيل هذه الانتقالات بيانياً بأشهر بين المدارات الإلكترونية المختلفة (الشكل ٤؛ إلى اليسار). ويعود الإلكترون إلى الحالة الأرضية بعدة طرق؛ فقد يعود من



الشكل ٤: المدارات الإلكترونية في نموذج بور - ستونر للذرة (إلى اليسار). وتشير الأسهم إلى بعض فوارق المستويات الطاقة الممكنة. ويظهر إلى اليمين شكل المُستوى الطاقي الذي يشبه الرسم (إلى اليسار) من ناحية أساسية إلا أنه أسهل منه رسماً.

مدار إلى مدار أخفض مجاور، أو قد يقفز مباشرة إلى المدار الثاني الذي يليه ... الخ. وهكذا يمكن تفسير الانتقالات العديدة الممكنة وكذلك حقيقة انبعاث ضوء ذي أطوال موجية مختلفة من عنصر واحد.

وقد جرت العادة أن تُرسم طاقة الذرة على المحور الصادي بدءاً من الصفر للمستوى الطاقى الأعلى ومن ثم يتم الانتقال إلى الأسفل إلى قيم تزداد سلباً. فعلى سبيل المثال، فعندما تعود ذرة الهيدروجين إلى الحالة الأرضية من حالة تهيج أعلى، فإنها تفقد ١٣,٦ إلكترون فولت. ويوجد الطول الموجي للضوء المنبعث من العلاقة :-

[١٨-٣:٥]

$$\dots\dots \frac{hc}{\text{طونون}} = \frac{ch}{\nu h} = \frac{c}{\nu} = \lambda$$

وبتضمين القيم المناسبة في المعادلة السابقة، نجد أن :-

$$\frac{10 \times 6,63 \times 10^{-34} \text{ جول-ثانية} \times 3 \times 10^8 \text{ م/ثانية}}{13,6 \text{ إلكترون فولت}} = \lambda$$

ولأن ١ إلكترون فولت = $10 \times 1,6 \times 10^{-19}$ جول، فإن :-

$$\lambda = \frac{10 \times 1,99 \times 10^{-25} \text{ جول-متر}}{10 \times 21,8 \times 10^{-19} \text{ جول}} = 91,2 \text{ نم}$$

وهذه القيمة هي بالضبط نهاية التسلسل المتسلسلة ليمان للهيدروجين التي بُحِثت سابقاً من وجهة تجريبية.

وعند وضع الطاقة الكلية ط في المعادلة [١٦-٣:٥] مساوية لفارق الطاقة $\nu h = \text{ط}_1 - \text{ط}_2$ ، نجد أن :-

[١٩-٣:٥]

$$\dots\dots \frac{e^2 k}{8 \pi^2 \nu h^2} = \nu h$$

وإذا استخدمنا الآن العدد الكوانتي ن لوصف الحالة الطاقية الأعلى، وعدداً ثابتاً م لوصف الحالة المنخفضة، فإننا نحصل على :-

[٢٠-٣:٥]

$$\dots\dots \left(\frac{1}{\nu_n} - \frac{1}{\nu_m} \right) \frac{K_e}{\nu_h \nu_a} = \nu$$

وهذه المعادلة هي معادلة ريديرج بصورة أساسية. وباختصار فقد توصلنا إلى النتيجة نفسها بطريقتين: الأولى بالتجربة والاستنتاج منها والثانية بالاستدلال النظري التام.

الأطياف الخطية للعناصر الأخرى

يبدو طيفاً نظير هيدروجين isotopes: الديتريوم والتريتيوم مماثلين تقريباً لطيف الهيدروجين باستثناء فوارق طفيفة.

ويمكن وصف طيف الهيليوم أحادي التأين (الهيليوم II) بمعادلة مماثلة:-

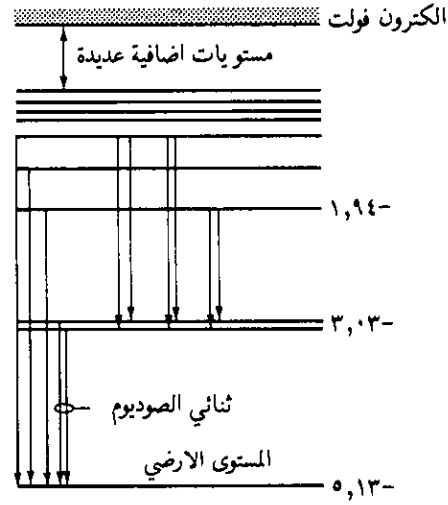
[٢١-٣:٥]

$$\dots\dots \left(\frac{1}{\nu_n} - \frac{1}{\nu_m} \right) R_{\text{هيليوم}} = \frac{1}{\lambda}$$

وتختلف هذه المعادلة عن معادلة الهيدروجين بالعامل ϵ أمام ثابت ريديرج * . ولطيف الهيليوم أربع متسلسلات: متسلسلتا ليمان الأولى والثانية ($m=1$ و $m=2$) اللتان تقعان في منطقة فوق البنفسجي، متسلسلة فوولر Fowler ($m=3$)، ومتسلسلة بيكرنغ Pickering ($m=4$).

أما أطياف الذرات الأخرى فهي أكثر تعقيداً؛ ولذلك فقد قُسم بعضها فقط بإتقان كطيفي الهيدروجين والهيليوم. والفلزات القلوية كالليثيوم، الصوديوم، البوتاسيوم، الروبيديوم، والسيزيوم أطياف يسهل تفسيرها. أما الفلزات الأخرى فهي أكثر تعقيداً، ولا يلزم بحثها لفهم الأطياف الذرية عموماً. ويمكن تمثيل المستويات الطاقة لها جميعاً بأشكال مماثلة لتلك المبينة للهيدروجين. لاحظ على سبيل المثال الخط الثنائي في شكل المستوى الطاقوي للصوديوم (الشكل ٥).

* وبصورة اصح، فإن ثابت ريديرج تختلف قليلاً للعناصر المختلفة. فهي للهيليوم مثلاً $R_{\text{هيليوم}} = 109722, 710 \times 10^9$ وللبريليوم $109731, 097 \times 10^9$ ، ... الخ.



الشكل ٥: الصوديوم: بعض المستويات الطاقة متقاربة وتشكل ثنائيات متقاربة، ومن ثم فإن الانتقال منها يُعطي خطوطاً طيفية ثنائية.

وتوجد هنالك بارامترات أخرى لخطوط الطيف مثل شدتها النسبية، استقطابها، بنيتها الدقيقة، وبنيتها الدقيقة العالية hyperfine (التي تُعزى إلى وجود النظائر أو الغزل النووي nuclear spin). ويتطلب تفسير هذه البارامترات مستوى أعلى من النظرية الكوانتية لا يمكنُ بحثه هنا. و يبين الجدول ٣ الخطوط الطيفية الأبرز لعددٍ من العناصر.

أطياف الأشعة السينية

تشبه أطياف الأشعة السينية الأطياف المرئية من ناحية أساسية. أمّا الفارق الأساسي بينهما فهو أن أطياف الأشعة السينية خلافاً للأطياف البصرية العادية تنشأ عن انتقالات الإلكترونات في المدارات (الغلافات) القريبة جداً من النواة. ويُرمزُ لهذه الغلافات من المركز إلى الخارج بالرموز $K, L, M, N, \dots$ الخ. و يبلغ العدد الأقصى للإلكترونات التي تتواجد في هذه الغلافات بالترتيب ٢، ٨، ١٨، ٣٢: ... الخ. فعلى سبيل المثال، فإن إلكترونات النحاس (٢٩) تتوزع على النحو التالي: ٢ في غلاف K ، ٨ في غلاف L ، ١٨ في غلاف M ، ١ في غلاف N .

والإلكترون في الغلاف N هو الإلكترون المسؤول عن الطيف البصري. كذلك فإن الطاقة اللازمة لتهييج هذا الإلكترون صغيرة نسبياً عند مقارنتها بالطاقة اللازمة لتهييج إلكترون في الغلاف K.

ولمتسلسلة K أقصر الأطوال الموجية، يليها في ذلك متسلسلة L التي هي أيضاً ذات شدة أقل ثم متسلسلة M. وفي كل متسلسلة، يُعطى الخط ذو الشدة الأعلى والطول الموجي الأطول الرمز α على نحو K_α ، L_α ، M_α ... الخ. ويرمز إلى الخط K الذي يُحصل عليه من هدف نحاسي بالرمز $Cu K_\alpha$. ولهذا الخط طول موجي يبلغ ١,٥٤ أنجستروم.

ووفق قانون موزلي Moseley's law، توجد هنالك علاقة محددة بين تواتر خط معين (ν) من طيف الأشعة السينية والعدد الذري Z، وذلك على النحو التالي:-

$$\nu = \frac{1}{4\pi^2} (Z - b)^2 \dots\dots [٢٢-٣:٥]$$

حيث أ هو ثابت مميز للمتسلسلة و ب هو ثابت يميز الخط. ويمكن اشتقاق قانون موزلي كذلك من نموذج بور الذري.

الجدول ٣: الأطوال الموجية (نم) لبعض خطوط الانبعاث مرتبة بحسب الأعداد الذرية للعناصر (تدل الحروف الصغيرة على اللون إذا كان الخط بارزا: ب بنفسجي، ز أزرق، خ أخضر، ص أصفر، ر أحمر).

هيدروجين	هيليوم	نيون	صوديوم
${}^1_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^{20}_{10}\text{Ne}$	${}^{23}_{11}\text{Na}$
٤١٠,١٧٤	٤٣٨,٧٩٣	٤٥٣,٧٩٨	٤٩٨,٣ ز
٤٣٤,٠٤٦	٤٤٣,٧٥٥	٤٧١,٠٠٦	٥٦٨,٨ خ
٤٨٦,١٣٣ ز	٤٤٧,١٤٧٧ ز	٤٨٨,٤٩١	٥٨٨,٩٩٥٣ ص
٦٥٦,٢٨٢ ر	٤٧١,٣١٤	٥٨٥,٢٤٩	٥٨٩,٥٩٢٣ ص
	٤٩٢,١٩٣ خ	٦٠٢,٩٩٩	٦١٥,٧ ر
	٥٠١,٥٦٧ خ	٦٢١,٧٢٨	
	٥٠٤,٧٧٤	٦٤٠,٢٢٥	
	٥٨٧,٥٨٦٧ ص	٦٩٢,٩٤٧	
	٦٦٧,٨١٤٩ ر		
أرجون	بوتاسيوم	كربتون	زئبق
${}^{40}_{18}\text{Ar}$	${}^{39}_{19}\text{K}$	${}^{84}_{36}\text{Kr}$	${}^{201}_{80}\text{Hg}$
٦٩٦,٥٤٣	٤٠٤,٤١٤	٥٥٧,٠٢٩	٤٠٤,٦٥٦١ ب
٧٠٦,٧٢٢	٤٠٤,٧٢٠	٥٨٧,٠٩٢	٤٠٧,٧٨١١
	٧٦٦,٤٩١		٤٣٥,٨٣٥ ز
	٧٦٩,٨٩٨		٤٩١,٦٠٤ خ
			٥٤٦,٠٧٤٠ خ
			٥٧٦,٩٥٩ ص
			٥٧٩,٠٦٥٤ ص

اقتراحات لقراءات اضافية

- G. Herzberg, *Atomic Spectra and Atomic Structure* (New York: Dover Publications, Inc., 1944).
- G. Herzberg, *Molecular Spectra and Molecular Structure* (Princeton, New Jersey: D. van Nostrand Company, Inc., 1950-60).
- H. G. Kuhn, *Atomic Spectra*. 2nd ed. (New York: Academic Press, Inc., 1969).
- G. R. Harrison, R. C. Lord, and J. R. Loofbourow, *Practical Spectroscopy* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1948).
- R. A. Sawyer, *Experimental Spectroscopy* (New York: Dover Publications, Inc. 1963).
- A. D. Thackeray, *Astronomical Spectroscopy* (New York: The Macmillan Company, 1961).
- W. F. Meggers, C. H. Corliss, and B. F. Scribner, "Tables of Spectral-Line Intensities," *National Bureau of Standards Monograph 32* (Washington: U. S. Government Printing Office, 1961).

المسائل

- ١-٣:٥ مَرَّرَ ضَوْءٌ صَادِرٌ مِنْ شَرَارَاتٍ عَالِيَةِ الْجَهْدِ تَتَكَوَّنُ بَيْنَ قُطْبَتَيْنِ مِنَ الْحَدِيدِ فِي غَازِ النِّيُونِ الْمَحْفُوظِ فِي وَعَاءٍ يَتَحْتَ ضَغْطٍ عَالٍ نَوْعاً مَا. صِفِ الطِّيفَ الظَّاهِرَ.
- ٢-٣:٥ (أ) عَلَّلْ وَوَضِّحْ مُسْتَعِيناً بِرَسْمٍ كَيْفَ يَتَغَيَّرُ طِيفُ الْإِنْبِعَاطِ مِنْ جِسْمٍ أَسْوَدَ مُشَعٍّ بِزِيَادَةِ تَسْخِينِهِ. عَلِّمِ الْمَحُورَيْنِ وَبَيِّنِ الْوَحْدَاتِ الْمُنَاسِبَةَ لِهَمَا (ب) مَاذَا يَحْدُثُ لِلْمَسَاحَةِ الْكُلِّيَّةِ تَحْتَ الْمُنْحَنِ بِرَفْعِ دَرَجَةِ الْحَرَارَةِ؟ (ج) مَا الَّذِي يَحْدُثُ لِلنَّقْطَةِ ذَاتِ الطَّاقَةِ الْقُصْوَى (د) مَا الَّذِي يُمْكِنُكَ قَوْلُهُ عَنْ كِفَايَةِ الْمَصْدَرِ الضَّوئِيِّ الْمُتَوَهِّجِ؟
- ٣-٣:٥ سَخَنْتُ فَتِيلَةً مِنَ الْكَرْبُونِ الَّتِي يُمْكِنُ اعْتِبَارُهَا جِسْماً أَسْوَدَ مُشَعّاً بِالترْتِيبِ إِلَى ٥٠٠م، ١٠٠٠م، ١٥٠٠م، و ٢٥٠٠م. جِدِ الْأَطْوَالَ الْمَوْجِيَّةَ الْمُنَاطَرَةَ الَّتِي يُشَعُّ عَنْهَا مَعْظَمُ الطَّاقَةِ.

- ٤-٣:٥ إذا سخنت مادة ما إلى ١٠٠٠م ثم شعت طاقة تحت حمراء (λ) = $١٠ \times ٢,٣٥ - ٣$ مم). فما درجة الحرارة اللازمة لتشع المادة ضوءاً أصفر طوله الموجي ٥٨٩نم؟
- ٥-٣:٥ باستخدام معادلة ريديرج، جد طول خط بالمر λ ولونه في طيف الهيدروجين.
- ٦-٣:٥ احسب الطول الموجي لخط α في متسلسلة ليمان للهيدروجين وكذلك تواتره.
- ٧-٣:٥ احسب الأطوال الموجية لنهايتي متسلسلي ليمان وبالمر من طيف الهيدروجين.
- ٨-٣:٥ ما عدد المتسلسلة، العدد الكوانتي والطول الموجي لكل من:-
(أ) خط ليمان β (ب) خط بالمر γ (ح) خط باشن α (د) نهاية متسلسلة باشن؟
- ٩-٣:٥ جد الطول الموجي للخط العاشر في متسلسلة بالمر من طيف الهيدروجين.
- ١٠-٣:٥ في ذرة الهيدروجين، طاقة المستوى الأخفض هي ١٣,٦ إلكترون فولت (ن = ١): (أ) ما طاقة المستوى ن = ٢. (ب) ما طاقة الفوتون الذي ينبعث عند الانتقال من المستوى ن = ٢ إلى المستوى ن = ١.
- ١١-٣:٥ جد سرعة الإلكترون في مدار بور الأول لذرة الهيدروجين.
- ١٢-٣:٥ عين مقدار الجذب الكولمي بين النواة والإلكترون في الحالة الأرضية لذرة الهيدروجين بحسب نموذج بور. استخدم معادلة القوة المركزية وقوة كولم. اعتبر سرعة الإلكترون المحسوبة في المسألة السابقة.
- ١٣-٣:٥ جد تواتر الخط الثاني من متسلسلة فوكر من طيف الهيليوم.
- ١٤-٣:٥ ما الخطأ مقاساً بوحدات الطول الموجي الذي يدخل في حساب الخط الأول لمتسلسلة بكرنغ من طيف الهيليوم عند استخدام ثابت ريديرج للهيدروجين بدّل القيمة الصحيحة لثابت ريديرج للهيليوم.

الفصل ٥ : ٤

الامتصاص

Absorption

عندما يمر الضوء في المادة يحدث شيان: الأول أن سرعته تقل عن سرعته في الخلاء التام وهي ظاهرة تشكل أساس الانكسار، والثاني أن بعض الطاقة تحول بواسطة عملية ديناميكية حرارية غير معكوسة إلى أشكال أخرى للطاقة، وتعرف هذه العملية بالامتصاص.

ويستخدم لفظ الانطفاء extinction أحيانا مرادفاً للفظ الامتصاص؛ وهذا الاستخدام غير سليم: فالانطفاء هو اللفظ الأوسع الذي يشمل انقاص الشدة بالامتصاص والتشتت:-

[٥: ٤-١]

.....

الانطفاء = الامتصاص + التشتت

وتسمى صفة المادة العامة التي تمتص الطاقة الكهرومغناطيسية أو أشكال الطاقة الأخرى بالامتصاصية absorptivity، أما الصفة نفسها عند مقارنتها بامتصاصية جسم معين فتسمى الممتصة absorbance. وتعرف الامتصاصية الكتلية molar بأنها حاصل ضرب الامتصاصية في الوزن الجزيئي للمادة. وتطبق التعاريف نفسها على النفاذ والنفاذية والمُنفِذية، كما سيُشرح ذلك بعد قليل.

خلفية نظرية

قانون بلانك

يُحكّم امتصاص المادة للطاقة الكهرومغناطيسية قوانين ماثلة لتلك التي تحكم انبعاث

الضوء. ولعلَّ أهمَّها اكتشافُ جوزف فـرنهـوفر* لِخطوطِ الامتصاصِ في طيفِ الشمسِ الذي سَمَّيَتْ بِاسمِهِ منذَ ذلكَ الحينِ (الجدول ١). وَقَدْ قَسَّرَ هـِذِهِ الخُطوطُ تَفْسِيرًا صَحِيحًا كُلُّهُ مِنْ بَنَسِنْ وَكِيـرْتشوف+ فَبَيَّنَا أَنَّهَا نَاشِئَةٌ عَنْ اِمْتِصَاصِ ضَوْءِ الشَّمْسِ بِالْغَازَاتِ البَارِدَةِ الـمَوْجُودَةِ فِي غِلَافِهَا الْغَازِيّ؛ فَالْخُطوطُ نَفْسُهَا سَتَبَعُثُهَا الْغَازَاتُ لَوْ كَانَتْ سَاخِنَةً. وَكَانَ هَذَا الْاِكْتِشَافُ بَدَايَةَ التَّحْلِيلِ الطِّيفِيِّ وَالكَثِيرِ مِنَ الْفِيزِيَاءِ الْحَدِيثَةِ حَقًّا.

الجدول ١ : بعض خطوط فرونهورف الممثلة

الرمز	الطول الموجي (نم)	المنشأ
A	٧٦٢,١-٧٥٩,٤	O
B	٦٨٨,٤-٦٨٦,٧	O
C	٦٥٦,٢٨١٦	H
D1	٥٨٩,٥٩٢٣	Na
D2	٥٨٨,٩٩٥٣	Na
E2	٢٢٦,٩٥٤١	Fe
b1	٥١٨,٣٦١٨	Mg
F	٤٨٦,١٣٢٧	H
G	٤٣٠,٧٩٠٦	Fe
G	٤٣٠,٧٧٤١	Ca
g	٤٢٢,٦٧٢٨	Ca

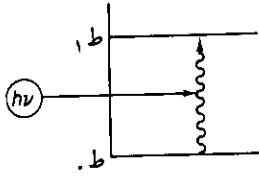
وبدلالة قانونِ بِلَانْكَ الذي شُـرِّحَ سَابِقًا:

[٢-٤:٥]

$$h \nu = E_2 - E_1 \dots\dots$$

*J. Fraunhofer, *Gilbert's Ann.* 56 (1817)

†R. Bunsen and G. Kirchhoff, "Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spektren der chemischen Elemente," *Abh. kgl. Akad. Wiss. Berlin*, 1861, 1863.



الشكل ١: الامتصاص: يرفع الكوانتم $h\nu$ الذرة من المستوى الأرضي ط. إلى المستوى المهيح ط. ١.

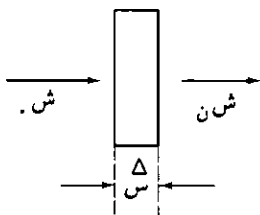
وبدلالة أشكال المستويات الطاقة، فإن امتصاص كوانتم من الطاقة $h\nu$ يتسبب في رفع المستوى الطاقوي للذرة من حالتها الأرضية ط. إلى حالة مهيجة ط. ١ (الشكل ١).

ولكن الامتصاص لا يحدث إلا إذا كانت طاقة الكوانتم ذات مقدار مناسب؛ فإذا لم يكن له الطاقة الكافية فإنه يمر في العينة أو يتشتت. أما إذا كانت طاقته أكبر لكتلتها غير كافية لبلوغ حالة مهيجة أخرى فإنها تتشتت وتُشع من جديد.

ولما كانت المستويات الطاقية للذرات المختلفة تتغير تغيراً واسعاً، فإن أطراف الامتصاص للذرات المختلفة تختلف على نحو مماثل: فعلى سبيل المثال يبلغ جهد التأين للهيدروجين ١٣,٦ إلكترون فولت. وللكوانتا التي تساوي طاقتها هذا المقدار طول موجي يبلغ تقريباً ٩١ نانومتر، وهذا المقدار من الطاقة هو المقدار الأقل الذي يمكن أن يكون للفوتون الذي تمتصه ذرة الهيدروجين.

وتعتبر المستويات الطاقية للجزيئات أكثر تعقيداً من مثيلاتها في الذرات بسبب الأنواع الأخرى للحركة؛ فبعضها يُعزى إلى التشكلات الإلكترونية، وبعضها يُعزى إلى اهتزازات النوي حول مواضع اتزانها، كذلك فإن بعضاً آخر منها يمثل الحركة الدورانية للجزيئات. وتبلغ النسبة بين طاقات الفئات الثلاث ١٠:١٠٠:١.

قانون بوجير Bouguer's law



الشكل ٢: الامتصاص من شريحة رقيقة

دع حزمة من الضوء أحادي الموجة تسقط على وسط ممتص. ونتغاضى هنا عن حقيقة أن جزءاً من الضوء الساقط ينعكس عن السطح الأول حيث يدخل العينة المفحوصة، وأن جزءاً يرتد منعكساً داخل العينة عند السطح الثاني حيث يغادرها الضوء. ولذلك، فإن علينا أن نتناول شدتين: الشدة I_0 للضوء الساقط والشدة I للضوء النافذ من الوسط (الشكل ٢).

افترض أن العينة رقيقة جداً. فبعد مرور الضوء عبر السمك Δ س تنقص شدة الضوء الساقط بمقدار ΔI ، ويتناسب هذا النقصان مع الشدة الابتدائية والسمك Δ س:

$$- \Delta \text{ ش} = \text{ش}_\text{ن} - \text{ش}_\text{ب} = \text{ش}_\text{ب} \cdot \alpha \cdot \Delta \text{ س} \dots\dots [3-4:5]$$

وَيُسَمَّى ثَابِتُ التَّنَاسُبِ α بِمَعَامِلِ الْاِمْتِصَاصِ absorption coefficient ، وَهُوَ يَعْتَمِدُ عَلَى الْوَسْطِ الْمَمْتَصِّ وَالطَّوِيلِ الْمَوْجِيِّ لِلضَّوْءِ .

وَالآنَ ، دَعِ الضَّوْءَ يَمُرُّ فِي شَرِيحَتَيْنِ رَقِيقَتَيْنِ أَوْ أَكْثَرَ كُلُّ مِثْلٍ مِنْهَا ذَاتُ سُمُكٍ $\Delta \text{ س}$. وَمِنِ الْوَاضِحِ أَنَّ مَعَامِلَ الْاِمْتِصَاصِ الَّذِي يُمَيِّزُ مَادَّةً مَا يَنْبَغِي أَنْ يَسْتَقِلَّ عَنْ $\text{ش} . .$ وَلِذَلِكَ فَبُجُودِ شَرِيحَةٍ ثَانِيَةٍ سُمُكُهَا $\Delta \text{ س}$ تَوْضَعُ خَلْفَ الشَّرِيحَةِ الْأُولَى ، فَإِنَّ الشَّدَّةَ الْخَارِجَةَ مِنَ اللَّوْحَةِ الثَّانِيَةِ تَنْقُصُ مَرَّةً أُخْرَى ؛ وَلَكِنْ لَمَّا كَانَ الضَّوْءُ السَّاقِطُ عَلَى اللَّوْحَةِ الثَّانِيَةِ أَقْلًا ، فَإِنَّ الضَّوْءَ يَفْقَدُ طَاقَةً فِي الشَّرِيحَةِ الثَّانِيَةِ أَقْلًا مِنَ الشَّرِيحَةِ الْأُولَى . فِي حِينٍ أَنْ مَقْدَارَ الْخَسَارَةِ الْمَطْلُوقَةِ فِي الشَّرَائِحِ التَّالِيَةِ أَقْلًا مِنَ الشَّرِيحَةِ الْأُولَى ، إِلَّا أَنَّ نَفْسَ الْجُزْءِ الْكَسْرِيِّ مِنَ الضَّوْءِ يُفْقَدُ فِي كُلِّ شَرِيحَةٍ . وَيَنْطَبِقُ الشَّيْءُ نَفْسُهُ فِي حَالَةِ لَحْمٍ عَدِيدٍ مِنَ الشَّرَائِحِ N مَعًا فِي شَرِيحَةٍ وَاحِدَةٍ سُمُكُهَا $\Delta N \text{ س}$.

وَنَجِدُ مِنَ الْمَعَادِلَةِ [3-4:5] أَنَّ : $\Delta \text{ ش} = - \text{ش} \cdot \alpha \cdot \Delta \text{ س}$ ، أَوْ :-

$$[4-4:5] \quad \alpha = \frac{- \Delta \text{ ش}}{\text{ش} \cdot \Delta \text{ س}} \dots\dots$$

وَنُظْهِرُ الْمَعَادِلَةَ الْأَخِيرَةَ أَنَّ α هِيَ ذَلِكَ الْكَسْرُ مِنَ الضَّوْءِ الَّذِي يَنْقُصُ لِكُلِّ وَحْدَةٍ سُمُكٍ مِنَ الْمَادَّةِ الْمَمْتَصَّةِ أَيْ α هِيَ الْاِمْتِصَاصِيَّةُ .

وَبِاعْتِبَارِ طَبَقَاتِ ذَاتِ سُمُكٍ مُتَنَاهٍ د س ، فَإِنَّ جُزْءًا ثَابِتًا مِنَ الشَّدَّةِ الْأَصْلِيَّةِ $\frac{\text{د ش}}{\text{ش}}$ يُمْتَصَّ كُلُّ مَرَّةٍ يَجْتَازُ الضَّوْءُ فِيهَا طَبَقَةً مِنْهَا ، وَلِذَلِكَ فَإِنَّ :-

$$[5-4:5] \quad \frac{\text{د ش}}{\text{ش}} = \alpha \cdot \text{د س} \dots\dots$$

وَلِكَيْ نَجِدَ مَقْدَارَ النِّقْصَانِ فِي شَدَّةِ الضَّوْءِ الْمَارِّ فِي وَسْطِ سُمُكِهِ الْكُلِّيِّ س ، نُكَامِلُ الْمَعَادِلَةَ (5-4:5) بَيْنَ الْحَدَّيْنِ : $\text{س} =$. عِنْدَمَا تَكُونُ الشَّدَّةُ ش . وَ $\text{س} =$ عِنْدَمَا تَكُونُ الشَّدَّةُ $\text{ش}_\text{ن}$ ، وَمِنْ ثَمَّ نَجِدُ أَنَّ :

$$[٦-٤:٥] \quad \left[\frac{\text{ش.دش}}{\text{ش.}} = \alpha - \right] \text{ د س}$$

$$\text{لو} \left(\frac{\text{ش.ن}}{\text{ش.}} \right) = -\alpha \text{ س ،}$$

أي :

$$[٧-٤:٥]$$

.....

$$\boxed{\text{ش.ن} = \text{ش.} \text{ و } -\alpha \text{ س}}$$

وهذه المعادلة الأخيرة هي قانون الامتصاص الأسّي الذي اكتشفه بوجير عام ١٧٢٩ والذي صاغه فيما بعد لامبرت*. وكما ذكر سابقاً، ش. هي شدة الضوء الساقط، ش.ن هي شدة الضوء النافذ، والرمز «و» هو أساس اللوغرثمات الطبيعية، α معامل الامتصاص، و س سمك الوسط الممتص.

وينص قانون بوجير أن نسبة الضوء الساقط التي يمتصها الوسط لا تعتمد على شدته وأن كل وحدة طول من الوسط تمتص نفس الكسر من الضوء المار فيها. فعلى سبيل المثال، فإذا كانت شدة الضوء الساقط على الوسط وحدة واحدة وممتصية كل وحدة سمك تبلغ $\frac{1}{10}$ شدة الضوء الساقط عليها، فإن شدة الضوء المار عبر كل وحدة طول منه هي ٠,٩، ٠,٨١، ٠,٧٣، ٠,٦٦، ... على الترتيب. وإذا اشتمل الضوء على عدة أطوال موجية، وجب تطبيق قانون بوجير باستقلال لكل طول موجي منها؛ ولكن لما كان معامل الامتصاص للمادة يختلف باختلاف الأطوال الموجية، فإن تركيب الضوء سيتغير باختراقه المادة.

* بيير بوجير Pierre Bouguer (١٦٩٨-١٧٥٨): أستاذ الهيدروغرافيا (علم وصف المياه) في جامعة

Le Havre، فرنسا، وكتابه الرئيسي هو:

Essai d'optique sur la gradation de la lumière (Paris: Claude Joubert, 1729).

يوهان لامبرت (١٧٢٨-١٧٧٧): الفيزيائي، الرياضي، والفلكي في أوجزبرج بألمانيا. وقد كتب

كتابه:

Photometria, sive de mensura et gradibus luminis, et umbrae,

Augsburg 1760. ويتبعني ان نذكر ان لامبرت هو الذي نسب بشكل خاص إلى بوجير اكتشاف

هذا القانون الذي سمي باسم بوجير بعد لامبرت. وكان إسهام لامبرت صياغة القانون بصورة تحليلية مستخدماً رموزاً لا تختلف كثيراً عما يستخدم في أيامنا هذه.

قانون بير Beer's law

ينبغي أن يكون واضحاً أن معامل الامتصاص α في قانون بوجير يعتمد على تركيز المادة. ويتناول قانون بير عامل تركيز المادة على النحو التالي:-

$$\text{ش} = \text{ش}_0 \cdot 10^{-\beta \cdot \text{ت} \cdot \text{س}} \dots\dots$$

[٨-٤:٥]

حيث β هو معامل الامتصاص لكل وحدة تركيز و ت هو التركيز الذي يعتبر عنه عادة بعدد الغرامات أو المولات في اللتر الواحد.

ولذلك، فقانون بير أكثر عمومية من قانون بوجير، وهو ينص على أنه في حالة ذوبان مادة ممتصة في مذيب شفاف فإن المحلول الذي له سمك وتركيز معينان يمتص نفس نسبة الضوء التي يمتصها محلول مشابه سمكه ضعف السمك الأول، وتركيزه نصف التركيز السابق. وهناك حالات لا ينطبق فيها قانون بير، أي أنه توجد هناك مواد تتغير امتصاصيتها لوحدة التركيز بتغير التركيز نفسه.

الامتصاصية Absorbance

لاستخدام قياسات الامتصاص في التحليل الكمي، يلزم أن نعين تجريبياً العلاقة بين التركيز ونسبة النفاذية transmittance. ويمكن عمل هذا ببساطة بقياس منفذية مادة ذات تركيبات مختلفة ثم رسم المنحنى الناتج من ذلك. ومن السهل تحديد هذه العلاقة إذا كانت خطية ذلك لأنه يلزم لنا نقاط قليلة فقط لرسم المنحنى؛ ولهذا السبب أدخل لفظ الممتصية.

ان المنفذية ϕ هي نسبة القدرة الإشعاعية المنفذة من عينة ϕ إلى القدرة الإشعاعية الساقطة على العينة ϕ_0 . عندما تقاس القدرتان لطول موجي واحد:-

$$\phi = \frac{\phi_0}{\phi} \dots\dots$$

[٩-٤:٥]

وتعرف الممتصية α ص بلوغارتم مقلوب المنفذية للأساس ١٠:

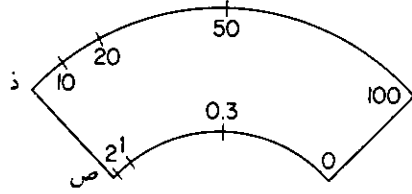
$$\alpha = \log_{10} \left(\frac{1}{\phi} \right) = 0.4343 \alpha \quad \text{ب ج} \dots\dots$$

[١٠-٤:٥]

وبعبارة أخرى فإنَّ منفذية مادةٍ ما مذابة في محلولٍ تتناسبُ طردياً مع تركيزها إذا ظلَّ طولُ المسارب ثابتاً. وكانَ يشارُ غالباً إلى المنفذية في الكتابات القديمة الخاصة بذلك على أنَّها الكثافة الضوئية، وهو لفظ لم يَعدْ مقبولاً نظراً لاحتمالِ خلطهِ بلفظ الكثافة التي هي كتلةٌ وُحدة الحجم. ويقدمُ الجدولُ ٢ تحويلاتٍ ممثلة.

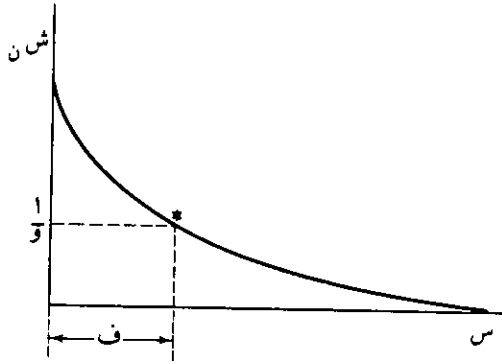
الجدول ٢ : المنفذية والامتصية والكثافة الضوئية

المنفذية ذ	١٠٠ - ذ	الامتصية ص
١٠٠	٠	٠,٠٠٠٠
٩٥	٥	٠,٠٢٢٣
٩٠	١٠	٠,٠٤٥٨
٨٥	١٥	٠,٠٧٠٦
٨٠	٢٠	٠,٠٩٦٩
٧٥	٢٥	٠,١٢٤٩
٧٠	٣٠	٠,١٥٤٩
٦٥	٣٥	٠,١٨٧١
٦٠	٤٠	٠,٢٢١٨
٥٥	٤٥	٠,٢٥٩٦
٥٠	٥٠	٠,٣٠١٠
٤٥	٥٥	٠,٣٤٦٨
٤٠	٦٠	٠,٣٩٧٩
٣٥	٦٥	٠,٤٥٥٩
٣٠	٧٠	٠,٥٢٢٩
٢٥	٧٥	٠,٦٠٢١
٢٠	٨٠	٠,٦٩٩٠
١٥	٨٥	٠,٨٢٣٩
١٠	٩٠	١,٠٠٠
٥	٩٥	١,٣٠١٠
١	٩٩	٢,٠٠٠٠
٠,١	٩٩,٩	٣,٠٠٠٠
	١٠٠	∞ (معتَم)



الشكل ٣: تبين لوحة قياس الفوتومتر (مقياس الضوء) العلاقة اللوغارتمية بين المنفذية ذ والمتصية ص .

ويمكن التعرف بسهولة إلى العلاقة اللوغارتمية بين المنفذية والمتصية من فحص مؤشر أي مقياس كثافة أو مقياس ضوئي مدرج بهاتين الكميتين . و يقدم الشكل ٣ مثالاً على ذلك . ونبين في الشكل ٤ رسماً للشدة الناتجة ش بدلالة المسافة س المقطوعة في الوسط الممتص . وإذا كان حاصل ضرب معامل الامتصاص α في السمك س وحدة واحدة فإن : $\alpha \cdot س = ١/٠$



الشكل ٤: نقصان الشدة في وسط ممتص سمكه س

وعند تلك النقطة المشار إليها بالعلامة * على الرسم ؛ تهبط الشدة إلى $\frac{1}{٠}$ أي إلى ٣٧٪ من قيمتها الأصلية، ويكون الضوء قد قطع مسافة ف تُسمى طول الإضعاف length attenuation أو متوسط المسار الحر mean free path، حيث $ف = \frac{1}{\alpha}$.

وللأوساط ذات الامتصاص العالي تكون ف في مقدارها أقل من طول موجي؛ أما للأوساط الضعيفة الامتصاص فإن ف تكون أكبر من λ .

طرق تجريبية

يتألف الفوتومتر الطيفي الكهروضوئي من مصدر ضوئي واحد ، واجد أو أكثر من الفاصلات أحادية اللون، مجموعة من خلايا الامتصاص ، كاشف ضوئي واحد أو أكثر مثل الأنابيب مضاعفة الضوء أو الخلايا الكهروضوئية ، والأجهزة الألكترونية اللازمة. ويمر الضوء من طول موجي معين أولاً في خلايا الامتصاص التي تحوي المذيب فقط، ويُعدّل الجلفاتومتر بحيث يُقرأ ١٠٠٪ على مقياس النفاذية أو صفراً على مقياس الكثافة الضوئية، ثم يوضع المحلول المراد قياسه في الخلية نفسها أو في خلية أخرى مماثلة لها، ثم تُعَيَّن المنفذية. إن قراءة المذيب هي ش.، وقراءة المحلول المجهول هي ش_ن، ولذلك فإن ممتصية المحلول المجهول هي لو_{ش_ن}. وإذا كانت ش. تساوي ١٠٠٪ فإن :-

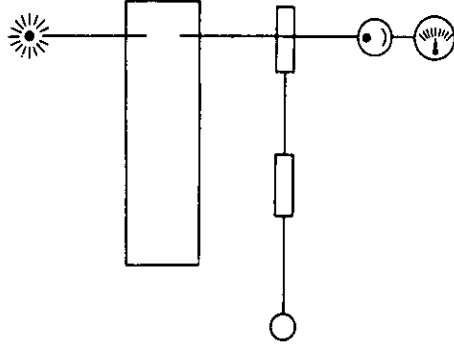
[١١-٤:٥]

ص = ٢ - لو (١٠٠ ذ)

حيث يعبر عن ش_ن بالنسبة المئوية. وكما قلنا سابقاً فإن للعديد من الأدوات مقاييس لوغاريتمية تُقرأ مباشرة الكثافة الضوئية.

أنواع الفوتومترات الطيفية Types of Spectro photometers

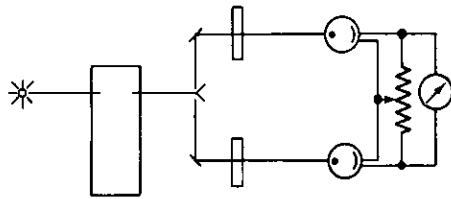
يمكن بناء الفوتومترات الطيفية لتعمل مثل كاشف الشعاع الواحد indicator one-beam ومستبدل الشعاع الواحد one-beam substitution والأدوات ذات الشعاعين، وللأخير كاشف واحد أو كاشفان. وفي طريقة الكاشف الواحد ذي الشعاع الواحد يمر الضوء في فاصل أحادي اللون أو في مجموعة من المرشحات، ثم ينتقل في مسار مفرد إلى الكاشف الضوئي photodetector (الشكل ٥). ثم توضع العينه والمعيار بالتعاقب في المسار، وتُقاس المنفذية في كل خلية للطول الموجي المرغوب فيه.



الشكل ٥: قياس الممتصية بطريقة الكاشف الواحد ذي الشعاع الواحد

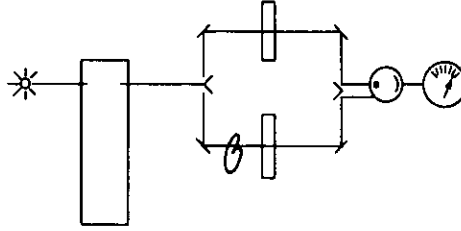
وتشبه طريقة مستبدل الشعاع الواحد أو الطريقة الصفرية zero method الطريقة السابقة من حيث أن الضوء يسير في مسار واحد فقط؛ إذ توضع العينة والمعاير بالتعاقب في المسار. وفي أثناء قياس الشدة المرجعية توضع مرشحة أسفينية الشكل ذات كثافة متعادلة أو خافض مماثل للشدة في المسار لجعل الشدتين تتساويان. وفي هذا الترتيب لا يلزم أن تكون استجابة الكاشف الضوئي خطية.

وأما في طريقة الكاشفين - الشعاعين، فيُشطر الضوء الصادر من فاصل أحادي اللون بشاطير شعاعي، ثم يمرر في العينة وفي المعيار المرجع، ثم يُسقط على كاشفين ضوئيين (الشكل ٦). ويُعدّل مقياس الجهد بحيث يقرأ الجلفانومتر صفراً. ولا تعقد الأدوات ذات الشعاعين على التآرجحات الحادثة في الفولتية.



الشكل ٦: طريقة الكاشفين الشعاعين

وفي أداة الكاشف الواحد ذي الشعاعين (الشكل ٧)، ينقسم الضوء كما ذكر سابقاً، ثم يمرُّ في آن واحد في العينة والمعاير المرجع، ثم يتضام جزءاه بشاطرين شعاعيين آخر، ويسقط بعد ذلك على كاشف واحد. ويستخدم موشور مهتز أو سطح عاكس دائري لتوجيه الضوء بالتعاقب إلى المسارين. ويمتاز هذا الكاشف بفائدته في تكبير التيار المتناوب وبتجنب أي عدم استقرار محتمل في مصدر الضوء أو عدم المطابقة بين الكاشفين. وكما ذكر في السابق، يتم إضعاف الشعاع المرجعي بسطح دائري أو إسفين متعادل الكثافة مثلاً.



الشكل ٧: طريقة الكاشف الواحد ذي الشعاعين .

تعيين الامتصاص بالفوتومترية الطيفية الدقيقة

لقد تطورت هذه التقنية كثيراً حتى أصبحت حقلاً بذاته. وتكمن أهميتها في البحث البيولوجي. وتوضع العينة في الفوتومترية الطيفية العادية في حزمة ضوئية متوازية تقريباً. وإذا كانت العينة ذات قطر أقل من أمم فلا بد من أخذ الاحتياطات الخاصة التي هي باختصار عبارة عن تكوين صورة حقيقية مكبرة للعينة والتأكد من أن المنظومة ذات قدرة على تبيين التواتر المكاني للتفاصيل التي يُرغَب في الحصول على بيانات عن امتصاصها. وإذا لم تكن المنظومة قادرة على تبيين هذه التفاصيل، فإن معلومات الامتصاص يُحصل عليها؛ إلا أنها تكون دون معنى، نظراً لأنه لا توجد هنالك ضوابط لمعرفة ما تم تبيينه وما لم يتم تبيينه.

ويُحصل على التكبير المطلوب بضم الفوتومتر الطيفي إلى ميكروسكوب؛ ويُتجز هذا بعدة طرق لعل أفضلها وأبسطها بكل تأكيد هي وصل الكاشف الضوئي مباشرة بالميكروسكوب كأنه كاميرا ميكروسكوب. وتحدد المساحة التي يراود قياسها بثقب أمام

الكاشف، ويتم توضع الكاشف والميكروسكوب alignment بسهولة بوضع مرآة مستوية ذات ثقب صغير في وسطها أمام الكاشف. ويُحرف الضوء المرتد بالمرآة عن محور الميكروسكوب بشايط شعاعي، ثم يُسقط على تلسكوب مساند مركز على مالا نهاية. ويشاهد الناظر في التلسكوب الصورة المكبرة للعينة كما هو الحال في الميكروسكوب العادي. كذلك يشاهد في وسط الصورة بقعة سوداء تحدد المساحة التي يمر الضوء فيها إلى الكاشف.*.

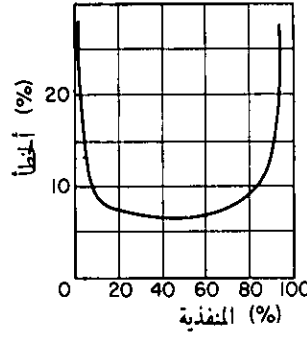
وقد طورت منظومات أكثر تقدماً وتعقيداً للمطيافية الدقيقة ذات الضبط العالي، وهي تخضع للتحسين باستمرار، حتى أن وصف أية أداة علمية منها يُصبح بسرعة قديماً وبحاجة إلى تعديل. وهذه الأدوات التي تُسمى الفوتومتريات الطيفية الدقيقة تستخدم بصورة أساسية في دراسات الخلية في منطقة الطيف فوق البنفسجي، وهي من أقوى الأدوات البحثية البيولوجية. ويوجد لأهم مكونتين للخلية الحية: الحامض RNA والحامض DNA أطياف امتصاص مميزة في منطقة فوق البنفسجي؛ ومن ثم يمكن تتبع بنائهما واندثارهما في الخلايا العادية والخلايا السرطانية بالفوتومترية الطيفية الدقيقة**.

وللفوتومترية الطيفية الدقيقة تقييداتها الخطيرة التي قد تمر أحياناً من دون ملاحظة، وهي تُعزى في معظمها إلى خصائص المادة الحية وتحضيرها للدراسة. أما البعض الآخر فهي بصرية في طبيعتها، فمثلاً ينبغي توقع البيانات الصحيحة فقط ضمن مدى للمنفاذية يتردد بين ٨٠% (شفافة تقريباً) و ٥% (عالية الامتصاص). أما خارج هذا المدى فإن الخطأ الكامن يزداد بسرعة كما في الشكل ٨. وتُعزى ظاهرة شفازرشيلد-فليجر Schwarzschild-Villager + إلى الانعكاسات الداخلية في المنظومة العدسية وأنبوبة الميكروسكوب، إذ أنها تعمل على جعل المتصية تبدو منخفضة جداً.

*F. Gabler, W. Gubisch, W. Lipp, and O. Rüker, "Das Reflexphotometer. Ein neues Konstruktionsprinzip für Mikroskop-Spektralphotometer," *Mikroskopie* (Vienna) 15 (1960), 218-26.

**T. O. Caspersson, *Cell Growth and Cell Function* (New York: W. W. Norton & Company, Inc., 1950). G. L. Wied, editor, *Introduction to Quantitative Cytochemistry* (New York: Academic Press, Inc. 1966).

†K. Schwarzschild and W. Villiger, "On the Distribution of Brightness of Ultra-Violet Light on the Sun's Disk," *Astrophys. J.* 23 (1906), 284-305, 345-46.



الشكل ٨ : الأخطاء الموجودة في الفوتومترية الطيفية الدقيقة بدلالة المنفذية.

الامتصاص الانتقائي Selective Absorption

هنالك نوعان من الامتصاص: الامتصاص العام والامتصاص الانتقائي. وفي الامتصاص العام تكون الممتصة واحدة تقريباً لمدى واسع من الطول الموجي؛ مما لا يتسبب إلا في إنقاص عام لشدة الضوء الساقط الكلية. وفي الامتصاص الانتقائي يحدث الامتصاص عند أطوال موجية معينة أكثر من غيرها، وينشأ عن ذلك في الطيف المرئي الإحساس باللون، فمثلاً تمتص قطعة من الزجاج الأخضر اللون الأحمر بصورة أساسية؛ ولأن اللون الأحمر هو اللون المتمم للأخضر فإن الضوء النافذ ينقصه الأحمر، وتبدو العينة لذلك ذات لون أخضر.

وقد اكتشف نيوتن أن ضوء الشمس يحوي طيفاً كاملاً من الألوان النقية المفردة. وجعل نيوتن الضوء يسقط على موشور زجاجي ثلاثي، ووجد أن ضوء الشمس خليط من ألوان عدة. كذلك وجد أن الألوان التي يحصل عليها لا يمكن تقسيمها، غير أنه يمكن ضمها (مزجها) معاً لتعطي الضوء الأبيض.

+ كتب نيوتن في وقت مبكر عام ١٦٧٢ إلى الجمعية الملكية في لندن معلناً أنه يرغب في الكتابة عن: «اكتشاف فلسفي.. يعتبر من وجهة نظري أغرب كشف تم إلى الآن حول عمليات الطبيعة ان لم يكن أكثر الكشوف أهمية» اسحق نيوتن: «نظرية جديدة للضوء واللون»، الأعمال الفلسفية ٥٨٠ (شباط ١٦٧٢)، ٣٠٧٥.

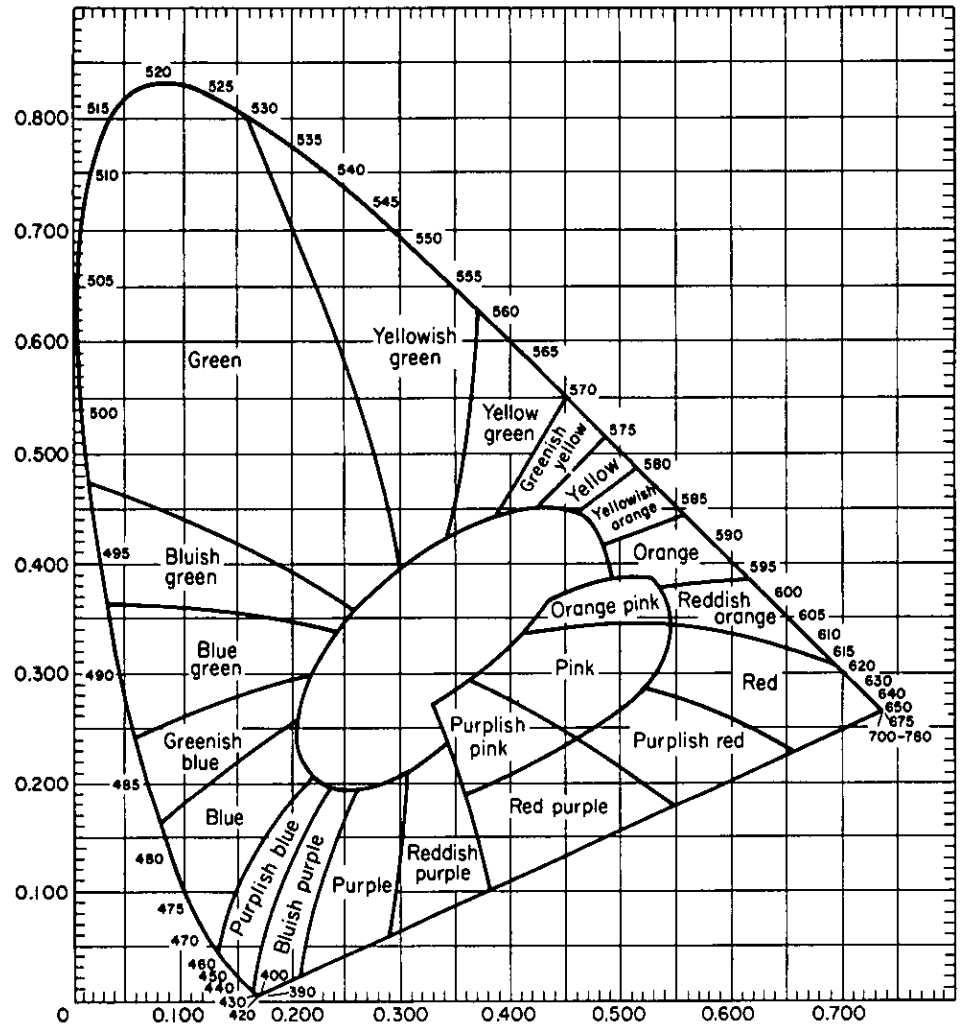
أخصائص الفيزيائية للون

لأي لون ثلاث خصائص طبيعية هي: اللونية hue، والسطوع lightness، والنقاوة Saturation. وتُكسب اللونية اللون اسمَه كالأزرق والأخضر والأحمر. ويمكن وصف اللونية بالطول الموجي الغالب في الضوء الذي يقابل بصرياً اللون. أما السطوع فيصف الجسم من حيث هو مضيء أو معتَم تبعاً للجزء الكسري من الضوء النافذ منه أو المنعكس عنه. والنقاوة أو الإشباع هي شدة اللون. ويعتبر اللون مُشبعاً إذا لم يحتو على أي أثر للون الأبيض؛ لكن إذا أضيف مزيد من اللون الأبيض إلى صبغة حمراء، فإن اللون الغالب (الأحمر) يظل على حاله؛ إلا أن متسلسلة من الألوان الخفيفة (المسحات) تنتج منتهية باللون القرنفلي الشاحب. وتُسمى الألفاظ مثل «شاحب، غامق، ولامع» بالمكثفات modifiers.

شكل اللونية (للجمعية العالمية للإضاءة) CIE Chromaticity diagram

لا تحدّد الألوان بالمنحنيات الفوتومترية الطيفية؛ فهي تبدو مختلفة باختلاف الضوء الملون. ولذلك فمن الضروري أن يُخصّص نوع الضوء الذي يُرى به الجسم الملون. ويمكن رسم الألوان أو على الأقل الاحداثيتين اللونيتين: لونية اللون ونقاوته في مستوى منتجين بذلك شكل اللونية المعروف بـ CIE. ويشير الاختصار CIE إلى الجمعية العالمية للإضاءة (الشكل ٩).

وفي شكل اللونية CIE يقع اللون الأبيض واللون الرمادي في الوسط. وبالانتقال على محيط المساحة ذات شكل حذاء الفرس، فإننا نصادف كلّ لونيّات الألوان النقية أو ظلالها. وإلى اليسار تقع الألوان ذات الطول الموجي الأقصر من البنفسجي في الأسفل مروراً بالأزرق والأخضر المزرق وحتى الأخضر في الأعلى. وإلى اليمين تقع الأطوال الموجية الأطول: من الأخضر في الأعلى مروراً بالأصفر والبرتقالي إلى الأحمر في الأسفل. ويُسمى الخط المستقيم في الأسفل الذي يصل البنفسجي بالأحمر بالحدّ الأرجواني. ويوجد للنقاوة حدّ أعلى كأنه النقاوة الطبيعية للون الطيفي، وينقص هذا الحدّ في اتجاه الوسط. ويبلغ إحداثيّات الضوء الأبيض النقي القيمتين: $x = 0,333$ ، $y = 0,333$.



الشكل ٩ : شكل اللونية المعياري (CIE).

وإذا أردنا أن نجد اللونية الغالبة للون ما (أ) يرى بضوء يُحدَّد بالنقطة ب، يُرسم خط من ب إلى أ حتى يقطع منحنى حذاء الفرس للألوان النقية؛ ويكون الطول الموجي الغالب هو الطول الموجي المناظر لنقطة التقاطع. وتكون النقاوة هي نسبة طول الخط من ب إلى أ إلى طول الخط الكلي حتى نقطة التقاطع. وإذا كان التقاطع على الحد الأرجواني، فلا يوجد هنالك إذن أي طول موجي غالب، لأن الأرجواني ليس لوناً طيفياً. وعوضاً من ذلك يُبحث عن الطول الموجي المتمم، وهو يوجد بمذ الخط من الخلف من جهة ب حتى يقطع المنحنى في الجهة المقابلة.

وإذا كَانَ هنالك مصدرٌ لونيٌّ ثانٍ يُمثَّلُ بالنقطة د علاوةً على المصدرِ اللونيِّ ح فإنَّ جميعَ الألوانِ التي يمكنُ مقابلتها بِمَزَجِ المصدرَينِ ح، د تقعُ على الحَظِّ الواصِلِ بين ح، د. وإذا كَانَ هنالك مصدرٌ ثالثٌ مُمَثَّلٌ بالنقطة و فإنَّ جميعَ الألوانِ التي يمكنُ مقابلتها بِمَزَجِ ح، د، و، تقعُ على المثلثِ ح د و أو داخله.

ولعلَّنا نرى الآنَ لماذا تمكَّننا الألوانُ الأساسيةُ الثلاثةُ : الأزرقُ النقيُّ، الأخضرُ النقيُّ، والأحمرُ النقيُّ من مطابقة ألوانٍ عديدةٍ أكثرَ من أيةِ مجموعةٍ أخرى من الألوانِ الأساسيةِ.

اقتراحات لقراءات إضافية

- G. D. Christian and F. J. Feldman, *Atomic Absorption Spectroscopy* (New York, London, Sydney, Toronto: Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc., 1970).
- R. P. Bauman, *Absorption Spectroscopy* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1962).
- G. K. T. Conn and D. G. Avery, *Infrared Methods, Principles, and Applications* (New York: Academic Press, Inc., 1960).
- Optical Society of America Committee on Colorimetry, *The Science of Color* (Washington: Optical Society of America, 1963).
- R. W. Burnham, R. M. Hanes, C. J. Bartleson, *Color, a guide to basic facts and concepts* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1963).
- G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967).

المسائل

- ١-٤:٥ (أ) إذا نَفَذَ ٢٢٪ من الضوء الساقط في عينة ما؛ جد الممتصية (الكثافة الضوئية).
- (ب) جد الممتصية إذا كانت المنفذية ٥٢٪، ٩٨٪، ٢٪ على الترتيب.
- ٢-٤:٥ عينة ذات سُمْكٍ معينٍ تُنْفِذُ ٢٥٪ من الضوء الساقط، وتَمْتَصُّ عينةٌ أخرى ٦٠٪:

(أ) ما الفارق العددي بين الكثافتين الضوئيتين للعينتين؟

(ب) لو كان سُمْكُ كُلِّ من العينتين ثلاثة أمثال سُمكِها السابق، فما الفارقُ

العددي بين الكثافتين الضوئيتين الآن؟!

٣-٤:٥ ظَلْيَةٌ فلزية تَمْتَصُّ ٨٨% من الضوء الساقط. فإذا كانت الكثافة الضوئية لفيلم

رقيقٍ تُساوي نصفَ الكثافة الضوئية للظلية، فجد مُنفذِيَّةَ الفيلم.

٤-٤:٥ إذا امتصت طبقة رقيقة من مادة ما ٢٠% من الطاقة الساقطة عليها، جد مقدار

الطاقة التي تَمْتَصُّ من طبقة سُمكِها على التوالي ٢، ٣، ٤، ١٠، ١٠٠، ١٠٠٠ مرات

قَدْرَ سُمْكِ الطبقة الأصلية.

٥-٤:٥ مِرْشَحَةٌ ذاتُ كثافة متعادلة سُمكِها ١، ٠، ١ مم تُنْفِذُ ٧٠% من الضوء. فَلَوْ كَانَ

سُمْكُ المِرْشَحَةِ ٢ مم، فماذا تكون مُنْفِذِيَّتُهَا؟

٦-٤:٥ مِرْشَحَةٌ مَمْتَصَّةٌ سُمكِها ١ مم وتمتص ٧٢% من الضوء الساقط، جد مُنفذِيَّةَ

المِرْشَحَةِ لو كَانَ سُمْكُهَا ٢، ٤ مم.

٧-٤:٥ معاملُ الامتصاصية لنوع من الزجاج $\alpha = 0.05$ مم^{-١}. ما نسبة الضوء التي

تَنفُذُ من لوحة سُمكِها ٤ مم؟

٨-٤:٥ أسطوانة طُولُهَا ٥٠ سم مملوءة بالبرومين تمتص ٦٢% من ضوء ذي طول موجي

معين. جد امتصاصية الغاز.

٩-٤:٥ بالرجوع إلى شَكْلِ اللونية، جد اللونية الغالبة والطول الموجي والنقاوة لِلْوَحَةِ

ملونة إحداثياتها (٠,٣٠، ٠,٥٠) تُرى بالضوء الأبيض؛ فإذا رأيت اللوحة

نفسها بضوء برتقاليّ إحداثياه (٠,٤٥، ٠,٤٥) فجد اللونية الغالبة والطول

الموجي الناظر للذروة والنقاوة؟

١٠-٤:٥ محلول أرجوانيّ إحداثيا لونه (٠,٣٠، ٠,٣٠) شوهد أولاً بالضوء الأبيض:

(أ) كيف تُعرَّفُ اللونية الغالبة (ب) إذا غَيَّرَ الإحداثي السيني للضوء الذي

يشاهد به المحلول زيادات متعاقبة كُلُّ منها + ٠,٠٥، فَبَيِّنْ كيف تتغيرُ

النتيجة في أ.

الفصل ٥ : ٥

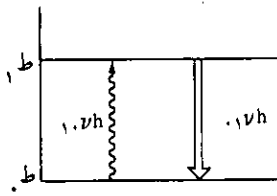
أَلْيَزَرَات

Lasers

لقد رأينا سابقاً أنَّ أيَّ انتقالٍ بين حالتين طاقتين للذرة، مثلاً بين الحالة الأرضية ط. والحالة المهيجة ط_١، يعني امتصاص الطاقة الكهرومغناطيسية أو انبعاثها، كذلك قد رأينا أنَّ تواتر هذه الطاقة يُعطى بقانون بلانك :

$$\frac{(ط - ط_١)}{h} = \nu$$

الفلورة Fluorescence



الشكل ١ : انبعاث الفلورة :
الخط المتعرج يدل على
الامتصاص والاسهم غير
المصنعة تدل على الفلورة

افترض أنَّ ذرة ما قد رُفِعت إلى حالة مهيجة ط_١ بسبب امتصاصها لكوانتم من الطاقة $١, \nu h$. إنَّ الحالة المهيجة للذرة غير مستقرة، فبعد بُرْهة قصيرة تعود الذرة من تلقاء نفسها إلى الحالة الأرضية (الشكل ١) باعثة كوانتم طاقة من نفس المقدار $١, \nu h$ ، وتُسمى عملية الانبعاث هذه التي تستغرق عدة أجزاء من ألف من الثانية (ملي ثانية) الفلورة. وبصورة عامة يذهب جزء من الطاقة الممتصة في عملية التهيج في تسخين العينة، ومن ثم فهي لا تتوافر للانبعاث الثانوي. ولذا تكون طاقة الضوء المتفلور أقل: $١, \nu h$. ويكون كذلك طولُ الموجي أطولَ ($\lambda > \lambda_١$) ويُسمى هذا بقانون ستوكس.

• خلافاً للفلورة، تعتمد الفسفرة على نوع مغاير من الانتقال كما تعتمد أيضاً على درجة الحرارة، وهي تتأخر على درجات الحرارة المنخفضة، وقد تتوقف عند درجات الحرارة المنخفضة جداً حيث تُجمد الطاقة الضوئية وتُخزن لفترة زمنية غير محدودة.

+ السير جورج ستوكس George Stokes (١٨١٩-١٩٠٣): الفيزيائي الأيرلندي والاستاذ في كلية بمبروك في كامبردج، اكتشف الفلورة وسرعة الطور والسرعة الزمنية ونظرية ستوكس.

وتوجد هنالك بعض الحالات الشاذة عن قانون ستوكس، فمثلاً عند تسخين العينة بمصدر خارجي خلال تهيج ذراتها يصدف أن ينتقل بفض الطاقة إلى الذرات وهي في حالة تهيج، وتصبح حينئذ قيمة 0.17 h أكبر من 0.17 h ، كما تُضح $0.18 > 0.18$. وتسمى هذه الحالة بالفلورة المضادة لقانون ستوكس. أما الحالة الخاصة التي يكون فيها الطول الموجي للضوء الممتص والضوء المُشع (المنبعث) واحداً فتعرف بحالة إشعاع الرنين+.

وتبعاً لنوع التفاعل بين الضوء وذرات أو جزيئات الوسط وبحسب الحالة الطاقية لها فقد يكون للضوء المشتت تواترات أعلى أو أقل من الضوء الساقط، ويشار إلى هذا بتشتت رامان Raman+. وإذا حدث التفاعل بين الضوء وتأرجحات كثافية مكروسكوبية (كبيرة) بدل تفاعل مع الذرة أو الجزيئات، فإن التشتت الحادث يُعرف بتشتت بريلوين Brillouin. وتشاهد ظاهرة بريلوين على سبيل المثال عند انعكاس الضوء عن مناطق التضاعط في الأمواج الصوتية؛ ولما كانت نسبة تواترات الموجة الصوتية إلى الضوء الساقط متناسبة طردياً مع جيب نصف الزاوية بين الضوء الساقط والضوء المشتت، فإن تشتت الضوء في الاتجاه الخلفي يُظهر أعلى إزاحة في التواتر كما يظهر أقل تغير في التواتر بتغير زاوية التشتت.

الإنبعاث المُستحث Stimulated Emission

يحدث حادثٌ مثيرٌ عندما يسقط الفوتون على ذرة في حالة تهيج؛ ففي هذه الحالة تُستحث الذرة من دون انتظار للعودة التلقائية إلى الحالة الأرضية فتنتقل انتقالاتاً آتياً إلى

+ اكتشف هذا الإشعاع روبرت وُود Robert Wood (١٨٦٨-١٩٥٥): أستاذ الفيزياء التجريبية في جامعة جونز هوبكنز، المجلة الفلسفية ١٠ (١٩٠٥)، ٥١٣. وقد كتب وُود كتابين: أحدهما كتاب يجمع شعراً غنّير ذي معنى: «كيف تميز بين الطيور والزهور»، وعندما أرسل نسخة منه إلى الرئيس روزفلت طلب الرئيس مزيداً من كتاباته، فأرسل له وُود نسخة من كتابه الآخر (البصريّات الطبيعية). ويعتبر هذا الكتاب إلى يومنا هذا مرجعاً قيماً لجوانب عديدة في البحث التجريبي في البصريّات.

+ السير شاندراسيخارا رامان (١٨٨٠-١٩٧٠): استاذ في جامعة كلكتا الهند، حصل على جائزة نوبل عام ١٩٣٠.

الحالة الأرضية وتصدر فوتوناً في عملية تُعرف بالانبعاث المستحث. وهذه العملية هي أساس عمل الليزر* أو الميزر في منطقة الميكرويف. ويُعتبر اكتشاف الليزر مثلاً على الاكتشاف الذي يتوصل إليه عدة أشخاص في أجزاء مختلفة من العالم في وقت واحد تقريباً. وقد خطرت فكرة الميزر الميكرويفي أولاً لـ شارل تاونس Townes+ عندما كان أستاذاً في جامعة كولمبيا عام ١٩٥١ بينما كان يجلس على مقعد في متنزه في العاصمة واشنطن. وعلى نحو مستقل، قدّم العالمان نيكولاي بازوف Basov وألكسندر بروخروف Prokhorov+ عام ١٩٥٢ بحثاً إلى مؤتمر في الاتحاد السوفياتي حول المطيافية الراديوية تناولا فيه إمكانية بناء مولد جزيئي. وفي عام ١٩٦٤ مُنح تاونس وبازوف وبروخروف جائزة نوبل للفيزياء+. وكان الميزر الأصلي عبارة عن صندوق معدني صغير يحتوي على جزيئات الأمونيا المهيجة، فعندما تُشع أمواج الميكرويف إلى الفجوة بتواتر يبلغ تقريباً ٢٤ جيجا هرتز، وُجد أن حزمة من الميكرويف عالية التردد وشديدة التحالف تنبعث من الفجوة.

وعقب تطور الميزر، خطرت فكرة توسيع المبدأ نفسه إلى المنطقة البصرية. وفي عام ١٩٥٨ وُضع شاولو (من مختبرات شركة بل للتليفونات) وتاونس+ نظرية الميزر البصرية، واقترحا أنه يمكن الحصول على الرنين بجعل الأمواج تنتقل جيئةً وذهاباً في فجوة طويلة نسبياً (مقارنةً بالطول الموجي للضوء) يوجد في نهايتها عاكسان متوازيان. وبعد نشر نظريتهما عن الميزر البصري* قام ميمان Maiman بالحصول لأول مرة على ليزر يعمل في منطقة الطيف المرئي، وقد استخدم كوسط بلورة من الياقوت. * ومنذ ذلك الوقت وُجدت مواد عديدة جداً قادرة على الإشعاع الليزري؛ إلا أن الياقوت ظلت أحد المصادر القوية للطاقة الليزرية.

* أليزر اختصاراً لـ: تكبير الضوء بالانبعاث المستحث للإشعاع؛ وهذا اللفظ ليس جديداً جدّة الجهاز الذي يصفه.

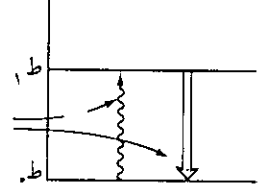
+ شارل تاونس (١٩١٥-)، الحائز على وسام ميز Mees (الجمعية البصرية الأمريكية) ١٩٦٨؛ نيكولاي بازوف (١٩٢٢-)؛ أستاذ في معهد ليديف للفيزياء، أكاديمية العلوم السوفياتية. ألكسندر بروخروف (١٩١٦-)؛ أستاذ في معهد ليديف وأستاذ الفيزياء في جامعة موسكو.

*A. L. Schawlow and C. H. Townes, "Infrared and Optical Masers," *Phys. Rev.* 112 (1958), 1940-49.

§T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby," *Nature* 187 (1960), 493-94.

الليزر الياقوتي The ruby laser

إنَّ قَلْبَ لَيْزَرِ مِيْمَانْ عبارةٌ عن بلورةٍ واحدةٍ من الياقوتِ القرنفليِّ وأكسيدِ الألومنيوم Al_2O_3 يضافُ إليهما ٥% (بالوزن) أيوناتُ الكرومِ الثلاثيَّة في شَكْلِ أكسيدِ الكروم Cr_2O_3 . إنَّ ذراتِ الألومنيوم والاكسجينِ خاملةٌ، أمَّا ذراتُ الكرومِ فهي نشطةٌ وهي التي تُهَيِّجُ من الحالةِ الأرضية. وقد رأينا سابقاً أنَّ الذراتِ التي هي في حالةٍ متهيَّجةٍ تعودُ إلى الحالةِ الأرضيةِ إمَّا تلقائياً أو بالاستحثاث. ولكنَّ مَهْمَا كانَ فيضُ الفوتوناتِ الساقطةِ، فإنَّ نسبةً من الذراتِ لا تزيدُ على ٥٠% توجَدُ في حالةٍ تَهَيِّجٍ؛ ذلك لأنَّ احتمالَ الفوتوناتِ الساقطةِ في التسببِ في تهييجِ الذرةِ يساوي نفسَ احتمالِها في جعلِ الذرةِ تعودُ من حالتِها المتهيَّجةِ إلى الحالةِ الأرضيةِ بالاستحثاث (الشكل ٢).

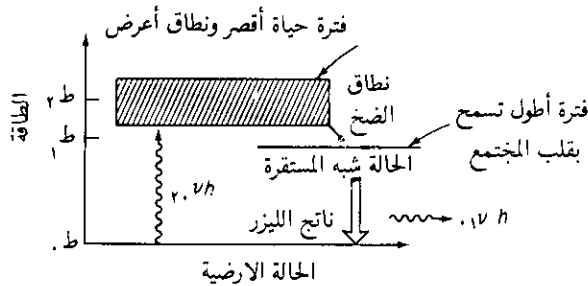


الشكل ٢ : الاختياران المتبادلان أمام الفوتون الساقط من الذرة من تأثيره عليها.

ولكي نحصلَ على فائضٍ من الذراتِ التي يمكنُ استحثاثُها لإصدارِ الضوء، فَلَا بُدَّ أَنْ تكونَ غالبيةُ الذراتِ في حالةٍ تهيَّجٍ؛ وَيُسَمَّى هذا الشرطُ قَلْبَ المجتمعِ السكاني inversion Population. وعادةً لا يمكنُ تحقيقُ هذا الشرطِ في منظومةٍ ذاتِ مستويين طاقِيَّين، وَعَوَضاً مِنْ ذلك فإنَّ المنظومةَ يَنْبَغِي أَنْ يكونَ لها ما يلي:

(أ) ثلاثةُ مستوياتٍ طاقِيَّةٍ: الحالةُ الأرضيةُ وحالتان مُتَهَيَّجتانِ تشتركانِ في عمليتي الانبعاثِ والامتصاصِ وَب) فترةٌ حياةٍ لإحدى الحالتين المهيَّجتين هي أطولُ بكثيرٍ من فترةِ حياةِ الحالةِ المهيَّجةِ الأخرى.

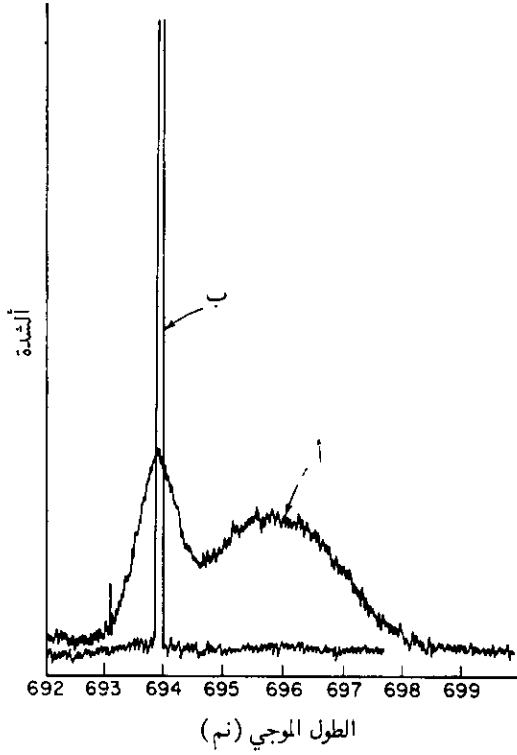
افترضْ ذرةً لها ثلاثةُ مستوياتٍ طاقِيَّةٍ: ط.، ط١، ط٢ (الشكل ٣). إنَّ الذراتِ في الحالةِ المهيَّجةِ ط٢ تعودُ إلى الحالةِ الأرضيةِ بالانتقالِ أولاً إلى الحالةِ ط١ شبه المستقرةِ ثُمَّ



الشكل ٣: شكل بثلاثة مستويات طاقية: الخط الممتوج يدل على الامتصاص أو الضخ، والسهم المصمت يدل على الانتقال غير الإشعاعي؛ أما السهم غير المصمت فيدل على الانتقال الإشعاعي.

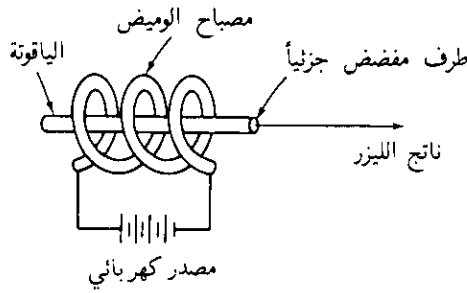
بالانتقال من ط ١ إلى ط ٠ . . افترض أن الانتقال الأخير هو وحده الذي يتسبب في انبعاث الفوتون، وافترض أيضاً أن فترة حياة ط ١ أكبر من فترة حياة ط ٢ بألف مرة تقريباً. فإذا سقط الآن سيل من الفوتونات التي طاقتها كُـلُّها $h \nu$ على هذه المنظومة، فإن كثيراً من الذرات سترُفَع من ط ٠ إلى ط ٢. وَبَعْدَ فترة زمنية ستعود هذه الذرات إلى الحالة شبه المستقرة ط ١، وستظل في هذه الحالة لفترة زمنية (ربما لعدة أجزاء من ألف من الثانية) قَبْلَ أن تعود إلى الحالة الأرضية. ونظراً لطول فترة حياة ط ١، يحدث هنالك «قلب في المجتمع» في المستوى ط ١ بالنسبة إلى المستوى ط ٠ . . وعلاوة على ذلك فإن نطاق ط ٢ عريض نوعاً ما، الأمر الذي يعني أن الطاقة الساقطة المتصلة أو التي تستخدم «للضخ» (pumping) تُستَـمَرُّ بفاعلية أعلى. و يبلغ عرض نطاق «الضخ» لياقوتة ١٠٠ نـم، ويتمركز حول الطول الموجي ٥٥٠ نـم.

وَعِنْدَ الانتقال إلى الحالة الأرضية تحدث الفلورة غير المتحالفه، وينبعث اللون الأحمر ($\lambda = 694$ نـم). وهذه الفلورة، كما هو الحال في معظم الانبعاثات الثانوية التلقائية، عرض حَـطٍّ كبير نسبياً؛ ولكن إذا فاقَت طاقة الضخ حداً مُعَيَّناً، نجد أن هذا الحَـطَّ يصبح أرفع كثيراً، ويكون الليزر قد بدأ في نشاطه (الشكل ٤). ولجعل ذلك ممكناً تُعطى الياقوتة شكلَ فُجوةٍ بصريةٍ وجهاها عند الطرفين مصقولان ليكونا مُنْبَسِطَيْنِ ومتوازيين. وفي الليزر الياقوتي يُظَلَّى أحد الوجهين ليكون له انعكاسية تامة ١٠٠٪، كما يُظَلَّى الآخر لتكون انعكاسيته تقريباً ٥٠٪ أو أقل من ذلك بقليل. ويترك الكثير من الفوتونات الثانوية التي تُنتُج عن عملية التكبير الياقوتة من سطحها الأسطواني؛ أما الفوتونات الأخرى فتنتقل إلى الوجهين عند الطرفين حيث تنعكس عنهما جيئةً وذهاباً بالمرأتين، وتُسمَّى هذه العملية **الفعل الانهباري avalanche action**. ويمكن مقارنة ما يحدث على نحوٍ ضعيفٍ بكرة تينس الطاولة التي ترتد جيئةً وذهاباً بين مَضْرِبَتَيْنِ؛ وأخيراً يخرج الضوء من الطلية نصف الشفافة عند إحدى نهايتي الياقوتة.

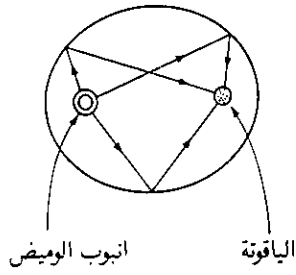


الشكل ٤ : الطاقة المشعة من ياقوتة تصبح أكثر فأكثر أحادية الطول الموجي كلما زادت طاقة الضخ.
(أ) يبين الناتج الطيفي تحت عتبة الليزر أو التواتر الحرج ، (ب) الناتج الطيفي فوق عتبة الليزر.

ويمكن تحقيق الضخ «بتشكيلات مختلفة». وقد استخدم ميمان أنبوب وميض حلزوني الشكل لتوفير الربط الكهربائي (الشكل ٥)، إلا أنه تم استخدام خطط أخرى أثبتت نجاعتها. ومن هذه الخطط استخدام فجوة أسطوانية ذات مقطع عرضي إهليلجي حيث



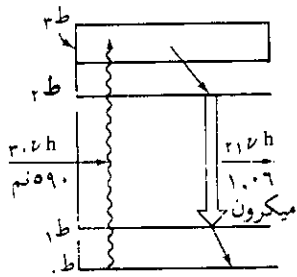
الشكل ٥ : الليزر الياقوتي ذو أنبوب الوميض الحلزوني.



الشكل ٦ : الفجوة الضاحية ذات المقطع العرضي الاهليلجي

يوضع مصباح وميض flash lamp في إحدى بُؤرتي الإهليلج، بينما توضع الباقوتة (التي هي في شكل قضيب) في البؤرة الأخرى (الشكل ٦). وتأتي قدرة مصباح الوميض من مكثف كبير أو من ملفات كبيرة تُخزن الطاقة فيها مغناطيسياً.

وقد استخدمت بنجاح عدة خطط أخرى للضخ؛ إذ استخدم ضوء الشمس والأسلاك المتفجرة وحتى المتفجرات الكيماوية ذات الإشعاعية العالية وذلك لضخ الطاقة إلى الليزر. وإذا تمّ الضخ بضوء متحالف، فإننا نحصل على جهاز يُسمى المكبر البارامتري parametric amplifier، وفي هذه الحالة لا يلزم مسبقاً أن يكون المجتمع مقلوباً.



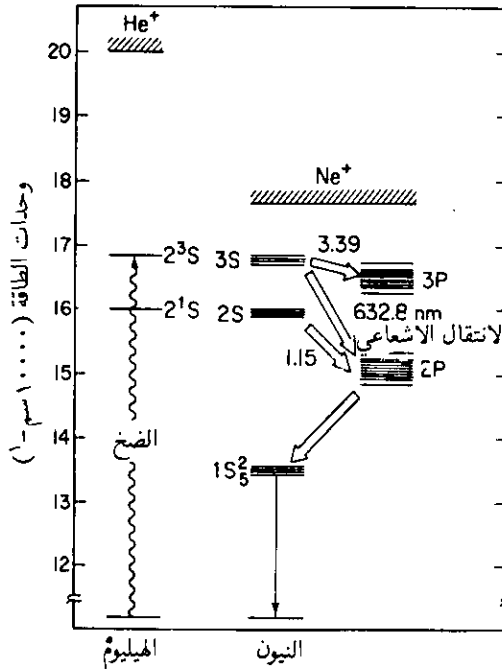
الشكل ٧ : شكل المستويات الطاقة : ليزر تنجستات النيوديميوم - الكالسيوم ذو المستويات الأربعة

وهناك في الليزر ذي المستويات الثلاثة ضياعٌ جوهريٌ للطاقة؛ أما الليزر ذو المستويات الأربعة المبين في الشكل ٧ فله بعض الفوائد من هذه الناحية. وفي هذا النوع يكون هنالك مستوى طاقي إضافي خالٍ عادةً فوق المستوى الأرضي؛ ولذا فإن عمل الليزر يبدأ بمجرد امتلاء الحالة شبه المستقرة جزئياً. ومرة أخرى ينبغي توافر نطاقٍ واسعٍ أو خطوط منفصلة عديدة للضخ، وكذلك يجب أن يتسبب الانبعاث بالاستحثاث من انتقال واحد.

ليزر الهيليوم - النيون The helium-neon laser

بعد اكتشاف ميمان للليزر الباقوتي بفترة قصيرة، بين جافان وبنيت وهيرريوت Javan, Bennett, and Herriott أن الفعل الليزري يمكن الحصول عليه أيضاً في غاز ذي ضغط منخفض وبشكل انبعاث متصل. وقد استخدم جافان ورفاقه مزيجاً من الهيليوم والنيون الذي يُهَيَّج بالتفريغ الكهربائي بدل الضوء، وقد وُلد هذا الأسلوب شعاعاً من الأمواج المتصلة في منطقة الأحمر وتحت الأحمر القريب. وعندما تصطدم ذرة من ذرات الهيليوم شبه المستقرة والتي لها فترة حياة طويلة بذرّة نيون في الحالة الأرضية، فإن هناك احتمالاً كبيراً لانتقال الطاقة من الهيليوم إلى النيون رافعةً بذلك ذرة النيون إلى أحد مستويات الطاقة (2S) ومُخَفِّضَةً ذرة الهيليوم إلى المستوى الأرضي (الشكل ٨). ويوفر هذا

*A. Javan, W. R. Bennett, Jr., and D. R. Herriott, "Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture," *Phys. Rev. Letters* 6 (1961), 106-10. W. R. Bennett, Jr. "Gaseous Optical Masers," *Applied Optics Suppl. 1 Optical Masers* (1962), 24-61.



الشكل ٨: مستويات الطاقة في ليزر الهيليوم - النيون. الاسهم غير المصمتة تدل على الانتقالات الاشعاعية.

الانتقال الطاقى بالاصطدام الأداة للتجمع السكاني الانتقائي للمستوى الأعلى. وهكذا ينشأ قلب المجتمع باعتبار الانتقالات من المستوى (3S) إلى المستوى (3p) بانبعث إشعاعي طوله الموجي 3.39×10^{-3} م، ومن المستوى (3S) إلى المستوى (2p) بطول موجي يبلغ 632.8 ن، ومن (2S) إلى (2p) بطول موجي يبلغ 1.15×10^{-3} م.

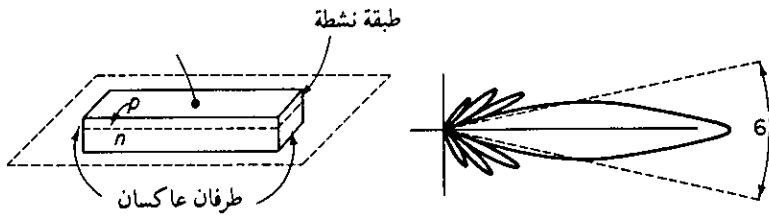
وخلافاً للليزر اليافوتي الأصلي، يُشع ليزر الهيليوم - النيون موجة متصلة من الضوء عالي التحالف لفترات طويلة جداً من الزمن. ويكون الضوء أحادي الموجة على نحو غير عادي، إذ يبلغ عرض الخط المميز أقل من 10^{-6} أنجستروم. ويكون للفجوة غالباً مرايا خارجية ونوافذ تثبت على زاوية بروستر لإلغاء الضياع بالانعكاس. وفي تشكيلات أخرى توضع المرايا في الداخل، وتشكل جزءاً أساسياً من أنبوب التفريغ.

المتصل للغازات الثبيلة: النّيون، الأرجون، الكربتون، والاكسينون، وللكلور المتأين، وكذلك للفوسفور والكبريت والبروم في حالة تأين.

ليزرات أنصاف الموصلات Semiconductor lasers

ومن فئات الليزر الأساسية ليزر نصف الموصل أو ليزر الحقن. ويتميز هذا النوع بالبساطة والحجم الصغير. وتتطلب ليزرات أنصاف الموصلات فولتية منخفضة تغطي تياراً مباشراً. ويمكن تكيف الليزرات بسهولة بتعديل التيار، أضف الى ذلك أن كفاءتها التحويلية عالية حيث تصل إلى ٨٠٪.

وفي عام ١٩٦٢ نجح فريقان من الباحثين في تحقيق الانبعاث بالاستحثاث في مقرن junction p-n المبين في الشكل ١٠، وكانت المادة المستخدمة والتي ما زالت تستخدم في



الشكل ١٠: رسم تخطيطي لليزر المقرن p-n (الى اليسار)، ويشع الضوء قرب المقرن من الطرفين العاكسين؛ اما الشكل الى اليمين فيظهر نمط الاشعاع.

يومنا هذا هي أرسينيد الجاليوم GaAs التي تُحقن بالخارصين. ويمكن حقن الخارصين بالانتشار أو بالنمو المحوري epitaxial growth. وفي كلا الحالتين تتكون منطقة مشعة للضوء سُمكها عدة أجزاء من ألف جزء من الملمتر (١٠-٣ مم). ويُعطي أرسينيد الجاليوم ضوءاً أحمر. ويمكن الحصول على أطوال موجية أخرى، ففوسفيد الجاليوم يُعطي الأحمر والأخضر، كذلك يُعطي كربيد السيليكون اللونين الأزرق والأصفر.

*R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, "Coherent Light Emission from GaAs Junctions," *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962), 366-68.
M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, Jr. and G. J. Lasher, "Stimulated Emission of Radiation from GaAs p-n Junctions," *Appl. Phys. Lett.* 1 (1962), 62-4.

أنواع أخرى من الليزرزات

منذ أن استخدم ميمان الياقوت، وُجِدَتْ موادٌ عديدةٌ أخرى مناسبةٌ للإشعاع الليزري تشعُّ الطاقة من فوق البنفسجيّ إلى الضوء الذي طولُه الموجيُّ أجزاءٌ من المليمتر (٧٧٤,٠ ملم لليزر شينيد الهيدروجين مثلاً) وإلى المدى الصوتي. ومن المعروف أنَّ كُُلَّ الغازات تُعْطِي الإشعاع الليزريّ. كذلك هو الأمرُ بالنسبة إلى الفلزاتِ العديدة والجزئيات ثنائية أو ثلاثية الذرات. ويبين الجدول ١ أشهر المواد الليزرية وأهم خصائصها.

الجدول ١: خلاصة بعددٍ من الليزرزات المثلة في العادة

الايون النشط Active ion	النسيج Matrix	الطول الموجي λ
الكادميوم	الهيلىوم	٣٢٥، ٤٤١,٦ نـم
الارجون		٣٥١,١، ٤٨٨,٠ نـم
الكريبتون		٤٧٦,٢ نـم
النيون	الهيلىوم	٦٣٢,٨ نـم، ١٠×١,١٥-٣ مم، ١٠×٣,٣٩-٣ مم
الكروم	اكسيد الالومنيوم	٦٩٤,٣ نـم
السماريوم	فلوريد الكالسيوم	٧٠٨,٣ نـم
التيوديميوم	الزجاج	١٠×١,٠٦-٣ مم
اليورانيوم	فلوريد الكالسيوم	١٠×٢,٥-٣ مم
ثاني اكسيد الكربون		١٠×١٠,٦-٣ مم

وقد استخدم الزجاج معَ عنصري الإتربيوم والإربيوم اللذين هما عبارة عن شوائب نشطة، وكذلك تمَّ الحصول على انبعاث متصلٍ ونابضٍ من ليزرات عقيق الألومنيوم - الإتربيوم المحقون بالنيوديميوم (Na:YAG). ومن أشهر الليزرزات الغازية ليزرُ الهيلىوم -

النيون وليفزر أيون الأرجون الذي يُعطي الانبعاث في منطقة الأزرق الأخضر وليفزر الهيليوم - الكاديوم وليفزر ثاني أكسيد الكربون الذي يشع في منطقة تحت الأحمر على الطول الموجي 10.6×10^3 مم. ويبدو على الأغلب أن أية صبغة تومض (أو تتفلور) تُغطي أيضاً الإشعاع الليزرّي إذا ما زودت بطاقةٍ ضاحية كافية.

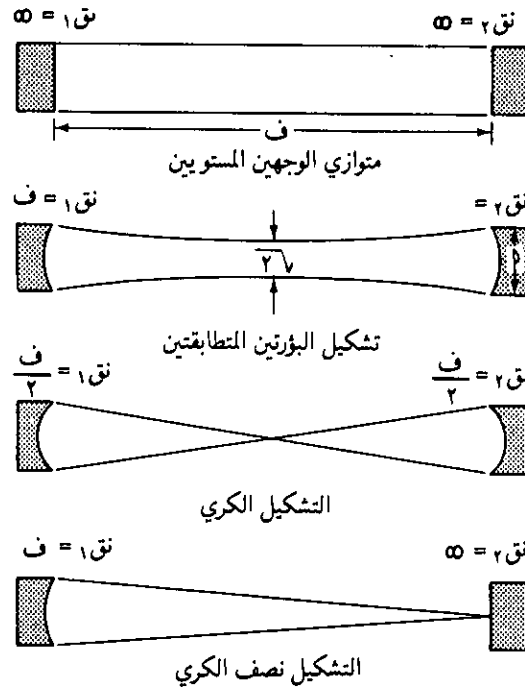
وهناك نوع واحد على الأقل من الليزرّات الكيماوية التي تأخذ طاقتها الضاحية من انحلال الميثان الأيوديني الفلوري الثلاثي CF_3I بالضوء. فعندما يتحلّل الجزيء، يتكسر الرابط بين الكربون واليود، وتحرّر ذرة يود مهيّجة، وتعودها إلى الحالة الأرضية تُعطي ذرة اليود فوتونا طولهُ الموجي 3.15×10^3 مم. وفي نوع آخر يُعرّف بالليزر الكيماوي ذي النوع المنفجر يحدث تفاعلٌ عنيفٌ بين الهيدروجين واليود يوفر الطاقة الضاحية، ويولد انبعاثاً إشعاعياً في منطقة تحت الأحمر طولهُ الموجي 3.77×10^3 مم.

أما الليزرّات السائلة، فلها تركيبٌ كَلّابي Chelate يحوي أسيتونات - بنزين اليوروبيوم أو مركبات التريبوم كملونات نشطة في مُذيبٍ كمزيج من الكحول الأيثلي والميثيلي. ويجب تشغيل هذه الليزرّات عند -160° م؛ ذلك لأنّ السائل على درجة الحرارة هذه يصبح لزجاً نوعاً ما، ويشبه بعض الشيء العسل الكثيف، مما يغيّني انتقالاً تدريجياً إلى ليزرّات الحالة الجامدة. ويبلغ الطول الموجي للليزر من نوع اليوروبيوم 613 نانومتر.

سمات (بارامترات) عامة General paramenters

يمكن صنع الفجوة الليزرية والصفحتين العاكستين الموضوعتين في الطرفين بأشكالٍ مختلفة (الشكل ١١) على النحو التالي:

١. التشكيل متوازي الوجهين المستويين: ويوجد هذا تقريبا في كلّ ليزرّات الحالة الجامدة. ويسهل تهيئة الليزرّات الغازية للعمل بإحدى التشكيلات التالية.
٢. تشكيل البؤرتين المتطابقتين: ولهذا التشكيل مرأتان كُرّيتان مقعرتان متماثلتان: ألسافة



الشكل ١١ : تشكيلات الفجوات الليزرية

بينهما تساوي نصف قطر تكوير إحداهما؛ ومع أنه لا يعطي تحالفاً طورياً على كل الجبهة الموجية إلا أن له قدرة عالية، وهو سهل التعديل.

٣. التشكيل الكروي وهو يتألف من مرأتين تنفصلان مسافة تساوي ضعف نصف قطر التكوير؛ أما تهيئة هذا النوع للعمل فيصعب.

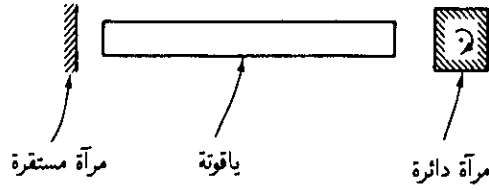
٤. التشكيل نصف الكروي وهو يتألف من مرآة كرية ومرآة مستوية توضع تقريباً في مركز تكوير الكرة. ولهذا التشكيل فوائد معينة كالتعديل البسيط والتشغيل السهل بالصفة المفردة من خلال ضبط المسافات البينية؛ غير أن القدرة الناتجة منه تساوي تقريباً نصف القيمة القصوى الممكنة فقط.

٥. الليزر الحلقي الذي يأخذ شكل الفطيرة الحلقية، ولكنه لا يزال في طفولته.

والقدرة هي كمية الطاقة التي تُعطى في الوحدة الزمنية، فإذا أُعطيت كمية معينة من الطاقة في فترة زمنية أقصر، فإنَّ القدرة الناتجة تكون أكبر. ووَحْدَةُ القدرة هي ارجول/ثانية = ١ واط.

وتعملُ مُعْظَمُ الليزرَاتِ بفعالية منخفضة نوعاً ما أي بحدود عدة أجزاء من مئة جزء فقط. وفي الليزر النابض لا تبدو الطاقة التي تشتملُ عليها النبضة الواحدة (حوالي ١٠ جول) كبيرة جداً؛ ولكن إذا أُعطيت هذه الطاقة خلال ٠,٥ ملي ثانية، فإنَّ القدرة تكون ٢٠,٠٠٠ واط، وإذا ما أُعطيت «١٠» جولاً من الطاقة خلال ١٠٠ نونوثانية (١٠×١٠^{-٩} ثانية) فإنَّ القدرة الناتجة تبلغ ١٠٠ مليون واط أو ١٠٠ ميجاواط. وهناك نبضات أقصر يُقعُ زمنها في مدى بيكو ثانية (١٠-١٢ ثانية).

وفي ليزر المحولة Q-switched laser Q لا تُشكّل فجوة الرنين البصري إلا بعد أن تُضخ البلورة. وعندما تتشكل تُفرغ كلُّ الطاقة في نبضة واحدة. ويُتجزأ تحويل Q بمرآة دائرية أو موشور دائري يكون طرفاً للفجوة عندما يُرتب مع البلورة (الشكل ١٢).



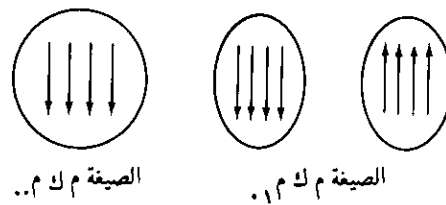
الشكل ١٢ : ليزر محولة Q

ويجري تحقيق التزامن synchronization بين الضخ والدوران لكي يتم تفريغ الطاقة كلها في فترة زمنية قصيرة جداً عند ترتيب الفجوة ترتيباً صحيحاً موفرة بذلك قدرات عالية. وبالإضافة إلى إمكان إجراء تحويل Q ميكانيكياً، يمكن إجراءه أيضاً بالانعكاس الداخلي المُحبط frustrated، وبخلايا كير وببلورات KDP وعناصر مستقطبة أخرى، كذلك يمكن إجراؤه بالامتصاص غير الخطي في بعض الصبغات.

وعلاوة على ما ذكر، يمكن تركيز الحزمة شبه المتوازية من الليزر في بقعة تصل في قطرها إلى طول موجي واحد، منتجة بذلك كثافات غيضة من القدرة: فمثلاً يمكن تركيز القدرة المنتجة من ليزر النيوديميوم تحت الأحمر (٥٠ كيلوواط) إلى كثافة قدرة إشعاعية تبلغ 10^{10} واط/سم² أي حوالي ١٠٠ مليون مرة قدر كثافة القدرة على سطح الشمس. كذلك فإن معظم هذه الطاقة هي أحادية الطول الموجي، في حين أن طيف الشمس ينتشر في مدى واسع ويمثل الطاقة المتكاملة لجسم أسود في درجة الحرارة ٦٠٠٠ مطلقاً.

ومع أن الليزر متصلة الموجة لها طاقات من نفس الرتبة، إلا أن قدراتها بالطبع أقل من ذلك بكثير. فعوضاً من قدرات ذات مدى في الميجاواط فإن مدى قدراتها يقع في الملي واط. فليزرات الهيليوم - التيون لها قدرة تبلغ حوالي ٥،٠ ملي واط، أما الليزرات متصلة الموجة الكبيرة جداً فتصل قدراتها أحياناً إلى بضعة مئات أو آلاف من الواطات.

ويستخدم في تكنولوجيا الليزر غالباً ألفاظ كالصيغة المكانية spatial mode (أو المستعرضة)، والصيغة المحورية axial mode (التواتر). وتشير الصيغة المكانية إلى المتجهات الكهربائية، وتعرف بالصيغة المستعرضة الكهرومغناطيسية م.ك.م أي TEM. فإذا كان الضوء متحالفاً ومتحد الطور كليةً، تكون له جهة ذات طور واحد فقط. وتقع المتجهات الكهربائية جميعها في لحظة زمنية في مستوى واحد عمودي على اتجاه الانتشار، وتسمى هذه الصيغة بالصيغة م.ك.م.. أو TEM_{٥٥} (الشكل ١٣- الرسم إلى اليسار). وهذه الصيغة هي



الشكل ١٣: الصيغ الكهرومغناطيسية المستعرضة

الصيغة التي تكون فيها الخسارة أقل ما يمكن. وعندما تكون اللوحتان العاكستان في الطرفين غير مصفيتين تماماً، وخسارات الفجوة عالية يتوافر هنالك كسب كافٍ لتدعيم

الصيغة لـ TEM_{00} .. أو TEM_{00} . وبجعل الترتيب أو التصنيف أكثر كمالاً يمكن تدعيم صيغ أعلى ذات خسارة أكبر (الرسم إلى اليمين). ونصف الصيغ المحورية التواترات التي يهتز بها الليزر.

التحالف المكاني Spatial Coherence

يتحدد استقرار التواتر لليزر ما ومن ثم الطول التحالفي للضوء الناتج منه باستقراره الميكانيكي والصوتي والحراري. ومن ناحية نظرية يُعطى الطول التحالفي بـ:-

$$[١-٥:٥] \quad \Delta c = S \Delta z = \frac{c}{\nu \Delta} \dots\dots$$

حيث c سرعة الضوء، Δz هو زمن التحالف و $\nu \Delta$ هو عرض النطاق (بدلالة التواتر) للخط عند نصف قيمته القصوى. وفي الليزر الياقوتي تبلغ Δz حوالي 10^{-8} ثانية، ويبلغ الطول التحالفي له حوالي ١ م. وفي ليزر الهيليوم - النيون يكون زمن التحالف أطول أي حوالي 10^{-4} ثانية، و $\nu \Delta$ حوالي 10^4 هرتز؛ ولذلك يبلغ الطول التحالفي حوالي ٣٠ كم.

ألونية الأحادية Monochromaticity

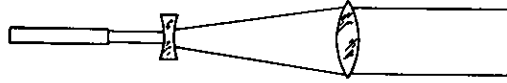
إن ذرة النيون ثقيلة نوعاً ما؛ ومن ثم فلدرجة حرارة معينة، يكون تعريض دوبلر صغيراً. ولذا نشاهد في ليزر الهيليوم - النيون ألونية أحادية عالية أو نقاوة طيفية.

ويمكن تصغير تباعد divergence حزمة ليزر إلى حدّ الحيد. وفي حيود فرونفور، يُعطى الانتشار الزاوي بالمعادلة التالية:-

$$[٢-٥:٥] \quad \theta = \frac{\lambda}{\Delta x} \dots\dots$$

حيث θ هي نصف زاوية المخروط الذي يقابل سعة تساوي $\frac{1}{2}$ من سعة الشعاع عند المحور؛ أ هو قطر الحزمة الخارجة من الليزر أو من منظومة عدسية لاحقة في حالة

استخدامها، و λ هو الطول الموجي. ولذلك نحصلُ على قيمٍ عمليةٍ للتباعدِ بحدودٍ ميلي زاويةٍ نصف قطرية (١٠-٣ زاوية نصف قطرية) أو حتى على أقل من ذلك. ونلاحظُ من المعادلة [٥:٥-٢] أنه يمكنُ الحصولُ على تسديد أفضل على حسابٍ قطرٍ أكبرٍ للحزمة الابتدائية بإسقاط الضوء خلفياً بواسطة تلسكوب. فعلى سبيل المثال إذا كانت شبيثة التلسكوب ذات بعدٍ بُؤريٍّ يبلغ ٢٢١ مم وكانت للتلسكوب عينية ميكروسكوب بعدها البؤري ١٦ مم، فإن حزمة الليزر تُوسَّعُ بعاملٍ مقداره $\frac{221}{16} = 13.8$ ، وينقصُ تباعدُ الحزمة بنفس العامل. ويُفضَّلُ استخدامُ تلسكوب جاليليو لأنه لا يركُزُ الحزمة في ما بين العدستين، وبالتالي يمنعُ إمكانَ تهيئته في الهواء (الشكل ١٤).



الشكل ١٤: تُعرض الحزمة من الليزر وتسدَّدُ على نحوٍ أفضل باستخدام تلسكوب جاليليو المقلوب.

تأثيرات الإشعاع الليزري

تتنوع تأثيرات الإشعاع الليزري في المادة. ويعرفُ أي شخصٍ شاهدَ عرضاً للليزر عملية ثقب البالون وخرق الشجرة: فهذه التأثيرات هي نتيجة مباشرة لامتصاص مادةٍ معتمة للطاقة الإشعاعية، وهي ذات أهمية علمية محدودة.

ومن التأثيرات الأكبر أهمية التأثيرات غير الخطية^{*}، فإذا كانت قوة التكبير لمكبر الليزر ثابتة خلال مدى تشغيله، فإن التشغيل يكون خطياً؛ أما إذا كانت قوة تكبيره غير ثابتة بل تتغيرُ بشدة الإشارة المستخدمة، فإن التشغيل يكون غير خطي. وتشمل التأثيرات غير الخطية التغيرات في الاستقطاب ومعامل الانكسار تحت تأثير المجالات الكهربائية والمغناطيسية. ومن التأثيرات الأخرى توليد الضوء التوافقي الثاني second-harmonic light من ضوء ليزر زجاج النيوديميوم، عندما يمرُّ في بلورة كاسرة ثنائية كتيوبات الصوديوم -

*G. C. Baldwin, *An Introduction to Nonlinear Optics* (New York: Plenum Press, 1969). N. Bloembergen, *Nonlinear Optics* (New York: W. A. Benjamin, 1969).

الباريوم؛ إذ يكون الطول الموجي للضوء الناتج من الصيغة متصلة الموجة هو ٥٣٢,٣ نـم أي تماماً نصف الطول الموجي الداخل. ومن الأمثلة الأخرى على التأثير غير الخطي والذي يتصل بالتغيرات الحادثة في معامل الانكسار التركيز الذاتي Self-focusing لحزمة الليزر الذي يؤدي الى تكوين فتائل ضوئية كخيوط قوية جيداً وقصيرة العمر، وقد تصل هذه الفتائل في رُفْعِها (قطرها) بضعة أطوال موجية. وبسبب شدتها المرتفعة فإنها تتسبب في إحداث الفقاعات في المادة وفي كسرها وتلفها؛ ويسمى كبح فعل ليزر بلير آخر بالاحاد . Quenching

تطبيقات

لقد وجدت تكنولوجيا الليزر تطبيقات عديدة، وهي بلا شك ستتطور أكثر في المستقبل. وتُختار بصورة عامة الليزرات متصلة الموجة للخدمات كالمواصلات التي تتطلب بثاً أو نقلاً مستقرًا. أما الليزر النبضي فيكثر استخدامه للحفر واللحام والجراحة نظراً للقدرة العالية التي تنكّس في كل نبضة. ويبدو استخدام الليزر في التواصل مثيراً لأولي وهلة نظراً لما له من عرض نطاق عالٍ مقارنة مع النقل الميكرووي في أو الراديوي العادي؛ غير أن اضطراب الجو يقيد بشدة حجم المعلومات التي يمكن بثها ما لم يُخصر شعاع الليزر في أنابيب (مواسير) توصيل. وفي الخلاء التام حيث لا يوجد أي انقسام أو إضعاف ناشيء من عدم التجانس الجوية، فإن مجرد توجيه الليزر يُعتبر مهمة كبرى.

ومن الممكن تعديل الليزر إما ميكانيكياً بالتشويه المرِن elastic deformation والاحناء والتوترات الأخرى وإما كهربائياً باستخدام عدة تأثيرات كهروبصرية؛ فالتعديل هو المفتاح لأي استخدام للليزر في التواصل، ويُنْذَلُ حالياً جهد أكبر في هذا المجال.

ويحدّ الجوُّ من فائدة الليزر من جهة، ويهيءُ من جهة أخرى مجالاً خصباً لدراسة الليزر. ويُستقصى البث وإزالته الاستقطاب والتشتت بالليزرات متصلة الموجة. وتُجمّد

الليزراتُ النابضةُ حركةً الوسطِ أو الهدفِ موفرةٌ بذلك تسجيلاتٍ قصيرةً المدى من دونِ تلوينٍ أو تلطيخٍ أو اندماجٍ مع الزمن. وَ يُمكنُ الرادارُ البصريُّ المماثلُ للرادارِ الميكروويفيِّ من الحصولِ على أصداءٍ من السحبِ وطبقاتِ الضبابِ وملوثاتِ الجو وأيةِ دقائقٍ أخرى صغيرةٍ جداً لا يمكنُ الكشفُ عنها بالرادارِ العادي. وتكونُ الإشارةُ الابتدائيةُ عادةً عبارةً عن نبضةٍ قصيرةٍ عاليةِ القدرة، أما الإشارةُ المرتدةُ فتستقبلُ بتلسكوبٍ يُثبتُ على محورٍ مشتركٍ أو منفصلاً عن المرسل، ثم تُعرضُ على راسمِ الاهتزازاتِ كما في الرادارِ الميكروويفي.

وللليزرِ القدرةُ على قياساتِ المسافةِ الدقيقةِ جداً. وتُستخدمُ مُعَيَّناتُ المدى الليزريةُ range finders للأغراضِ العسكريةِ والمسحيةِ الأرضيةِ (الجيويدية). وتدلُّ الراداراتُ البصريةُ التي تستخدمُ ظاهرةَ دوبلر على سرعةِ الأجسامِ المتحركةِ التي تنعكسُ منها الحزمةُ. وفي علمِ القياسِ metrology تستخدمُ الليزراتُ بصورةً واسعةً جداً، فهي تعينُ في تثبيتِ الطولِ والتواترِ ومقاييسِ الزمنِ المعيارية. ومن الأعمالِ التي كسبتُ سمعةً واسعةً حَفَرُ الثقوبِ في الموادِ التي يصعبُ حفرُها بالطرقِ الآليةِ الأخرى. فقد حَفَرَ الماسُ الذي هو أشدُّ قساوةً سابقاً، إلا أنَّ العمليةَ كانت صعبةً ومستهلكةً للوقت؛ وتستطيعُ النبضاتُ الليزريةُ فعلَ هذا الحفرِ في زمنٍ قصيرٍ. ويمكنُ أيضاً حَفَرُ الثقوبِ في الصخورِ والاسنانِ وشفراتِ الخلاقةِ وماسكاتِ الورق، وحتى في الأجسامِ الناعمةِ مثل الشعرة. ويشيرُ تأثيرُ أو ظاهرةُ بروكتر Brueckner إلى حرقِ الفجواتِ في السحبِ وتسخينِ قطراتِ الماءِ وتبخيرِها.

ويعتبرُ اللحامُ تطبيقاً آخرَ لليزر؛ ولا نَعْنِي بذلك بالطبعِ لحامَ الجسورِ أو العارضاتِ المعدنية؛ وإنما نَقْصِدُ بذلك اللحامَ الميكروبيِّ للأسلاكِ التي لا يزيدُ قطرها على بضعةِ ميكرومتراتٍ كما في الدوائرِ المُكاملةِ integrating circuits. إن لحامَ الشبكيةِ في موضعِها في العينِ قد يكونُ ضرورياً في حالاتِ انفصالِ الشبكية^{*}. وإضافةً إلى التخثرِ الضوئيِ photocoagulation يُظهِرُ الليزرُ بعضَ الأملِ في الطبِّ في علاجِ بعضِ الأورامِ كذلك الورمِ المذنبِ والقَتاميِّ غالباً الذي يصيبُ الجلدَ ومشيمةَ العينِ التي تنفجرُ أحياناً لما يصيبُها من نموٍ خبيثٍ جداً. ويمكنُ استخدامُ هذه الظاهرةِ لتعيينِ حالةِ انكسارِ العين: فإذا حركَ المشاهدُ

*N. S. Kapany, N. Silbertrust, and N. A. Peppers, "Laser Retinal Photo-coagulator," *Applied Optics* 4 (1965), 517-22.

رأسه ببطء من جهة إلى أخرى كأنه يقول لا، تبدو الحبيبات أنها تتحرك أيضاً، وتسمى هذه الظاهرة بالماصفية الثلجية الحمراء red snowstorm. فإذا تحركت الحبيبات في نفس اتجاه حركة الرأس كان المشاهد طويل النظر؛ أما إذا تحركت الحبيبات عكس اتجاه حركة الرأس كان قصير النظر، ومن دون حركة الحبيبات، يكون المشاهد ذا بصر اعتيادي.

ومن الممكن تفسير ذلك بافتراض أن عدم الانتظامات العشوائية في سطح الستارة تُحطّم التحالف المكاني في الضوء المنعكس، وتساعد عوضاً من ذلك على تكوين محالّ تداخل تتوزع عشوائياً في الفراغ المُجسّم ذي الأبعاد الثلاثة أمام الستارة؛ وتكون هذه المحالّ أيضاً أو صورها المترافقة أمام الشبكية، وهي تُرى بتركيز حادّ حتى لو لم يلبس المشاهد الذي يعاني من عيب انكسار حادّ النظارات المصححة. ويتناسب مقدار خطأ الانكسار الموجود أو المتبقي بعد تصحيحه جزئياً بعدسات تجريبية طردياً مع درجة حركة الحبيبات من حيث علاقتها بحركة الرأس.

التلف والضرر البيولوجيان

يعتبر الإشعاع الليزرّي ذا ضرر بالغ جداً، ويُعزى ذلك جزئياً إلى أنه لا يظهر أي ألم أو إزعاج إلا بعد عدة ساعات من التعرض للإشعاع، ويعزى كذلك إلى أن معظم الليزرّات تشع في منطقة الأحمر التي لا يبدو فيها الضوء قوياً مثل الضوء الأبيض.

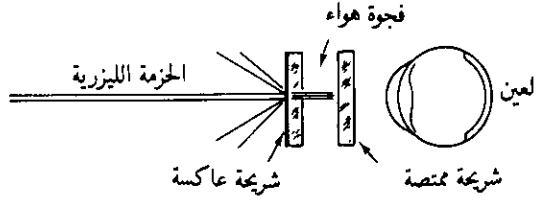
وواضح أن العين هي الجزء الذي يتعرض أكثر من غيره لضرر الإشعاع، وتعتبر القرنية والشبكية أكثر أجزاء العين تعرضاً للضرر. ويتوقف تعرض القرنية والشبكية للتلف على الطول الموجي للإشعاع؛ فلأطوال الموجية العالية تمتص جزئيات الماء معظم طاقتها. ونظراً لأن الماء هو المكون الأساسي للعين فإن الشبكية تتأثر بشدة أكثر من غيرها. ومن أكثر أنواع الليزرّات المسؤولة عن تلف الشبكية ليزر ثاني أكسيد الكربون الذي يعطي طاقة إشعاعية تقع في وسط منطقة تحت الأحمر وذات طول موجي يبلغ حوالي $10 \times 10^3 - 10^4$ مم. ويُمْتَصُّ تقريباً ٩٠٪ من هذه الطاقة بطبقة ماء سُكُّها ٠,٢٥ مم.

ومن ناحية طبية عيادية، فالأذى الذي يصيب العين بسبب إشعاع ليزر ثاني أكسيد الكربون هو الحرق الحراري للقرنية * . وتُعتبر عتبة الإشعاع الذي يتسبب في تلف القرنية تقريباً ١٠٠ ميلي واط/سم^٢ وذلك عند التعرض للإشعاع لفترة طويلة؛ أما للإشعاع ذي النبضات الأقصر، فيمكن تحمل كثافات قدرة أعلى. فلبضة فترتها ١ ثانية، تبلغ العتبة ١٠ واط/سم^٢؛ أما النبضة التي فترتها ٠,٠١ ثانية فتبلغ العتبة ٧٠ واط/سم^٢. ويمكن في حالة التلف الشديد حدوث قروح وتفحم وحدوث حتى ثقب للقرنية. وبخلاف ذلك فإن الإشعاع من ليزر الياقوت وليزر الهيليوم - النيون لا يخترق كرة العين وإنما يمتص بالبطانة الداخلية للشبكية والمشيمة. وهنا يتسبب التسخين في التلف وبدرجات مختلفة. وعلاوة على ذلك فمن الهام أن نعلم أن الضوء الذي يمر في العين ستركز على الشبكية محدثاً بذلك كثافات قدرة أعلى مما تحدث بغير ذلك. ولقد قُدِّرَ أن كثافات القدرة في العين العادية أو المصححة قد تكون أعلى بـ ١٠٠,٠٠٠ إلى ٦٠٠,٠٠٠ مرة. وتصبح البطانة الداخلية عند الإشعاع المنخفض مضطربة التنظيم؛ وفي الحالات الشديدة جداً تنفجر البطانة الداخلية قاذفة صبغة سوداء في السائل العيني ومكونة لذلك فقاعات بخار ومتسببة في نزف حاد حول النسيج المتبخر أو المهدم. وتبلغ الجرعة الحرجة للإنسان كما تقاس في القرنية عند التعرض لإشعاع الليزر الياقوتي تقريباً ١٠-٦ جول/سم^٢. ولا يقدم هذا الرقم ليدل على القيمة الصحيحة وإنما لمجرد توضيح المستويات الطاقية المنخفضة اللازمة للتسبب في تلف شبكي مقارنة بالطاقات المتوافرة عادة من الليزر الياقوتي والتي تبلغ تقريباً ١ إلى ١٠٠ جول. وبالتالي فلا بُدَّ من اتخاذ الحذر المتشدد في أية تجربة يستخدم فيها الليزر الياقوتي النابض أو أي ليزر آخر. وتناظر الجرعة الحرجة المذكورة للقرنية تقريباً ١ جول/سم^٢ على الشبكية وكثافة تبلغ ١٢٥ ميجاواط/سم^٢ على ذلك الموضع وزمن تعريض يبلغ ١٠×٨-٩ ثانية لليزر الياقوت من محولة Q.

ويلزم للحماية من الإشعاع الليزري نظارات تمتص الإشعاع بصورة أساسية في مدى الانبعاث الليزري المعني، حيث يجب أن تكون متآلفة مع تواتر الليزر، كما يجب أن تتحمل كثافات القدرة العالية التي لا تنشأ عندما يُصَوَّبُ الشعاع الليزري على الزجاج فحسب بل

*R. R. Peabody et al., "Threshold Damage From CO₂ Lasers," Arch. Ophthalmol. 82 (1969), 105-107.

وعندما يُرَكَّزُ عليه . وتتألف بعض هذه النظارات الواقية من ظليّة رقيقة عاكسة جداً وشريحة ممتصة خلفية مثبتتين معاً وبينهما فجوة هواء (الشكل ١٥) .



الشكل ١٥ : النظارات الواقية كما تستخدم في المختبرات الليزرية .

اقتراحات لقراءات اضافية

- S. Udenfriend, *Fluorescence Assay in Biology and Medicine*, Vol. 1, 2 (New York: Academic Press, Inc., 1962, 1969).
- A. L. Schawlow, "Lasers and Light," Readings from *Scientific American* (San Francisco: W. H. Freeman and Co., Publishers, 1969).
- J. R. Pierce, *Quantum Electronics: The Fundamentals of Transistors and Lasers* (Garden City, N.J.: Doubleday Science Study Series, 1966).
- B. A. Lengyel, *Introduction to Laser Physics* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1966).
- A. L. Bloom, *Gas Lasers* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1968).
- C. H. Gooch, *Gallium Arsenide Lasers* (New York: Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc., 1969).
- W. Kleen and R. Müller, *Laser* (Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag Inc., 1969).
- A. E. Siegman, *An Introduction to Lasers and Masers* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1968).
- Applied Optics (and Proceedings of the IEEE)* (October 1966).

المسائل

- ١-٥:٥ مادة متفلورة في محلول قاعدي امتصاصية عظمى قرب الطول الموجي ٤٩٥ نـم وفلورة عظمى عند الطول الموجي ٥٢٥ نـم . جد كمية الطاقة التي تُهدَرُ داخلياً في عملية امتصاص كوانتم طاقة وانبعائه ؟

٢-٥:٥ افترض حداً زمنياً اعتبارياً مقداره 10^{-10} ثانية للتمييز بين الفلورة والفسفرة. فانبعث الضوء الذي يدوم أكثر من 10^{-10} ثانية بتعدّ التهيج يُسمى الفسفرة والذي يدوم أقل من ذلك يُسمى الفلورة. فباستخدام لوحين دائرتين مثبتتين على محور مشترك، بيّن كيف يمكنك بناء جهاز بسيط للتمييز بين الظاهرتين (اقترح هذه المسألة أ. زنت-جيورجي).

٣-٥:٥ تُظهر أملاح اليورانيوم التي وُجدت أنها فعالة تماماً في بعض أنواع الليزر فلورة قوية قرب الطولين الموجيين 560 ، 610 ن.م. فإذا زوّدت طاقة حرارية مقدارها 10^{-2} جول للكوانتم الواحد في أثناء عملية الامتصاص - الانبعث، فجدّ إزاحة ستوكس المضادة الحاصلة في الطول الموجي عند خطّي الانبعث هذين.

٤-٥:٥ إذا حدث الفعل الليزري بالانتقال من حالة مهيجة إلى حالة أرضية ط. = ٠، وإذا ما انطوى على انبعث ضوء طوله الموجي 694 ن.م، فجد المستوى الطاقّي للحالة المهيجة.

٥-٥:٥ يحدث الانتقال كما في الشكل ٧ بين حالة شبه مستقرة ط ٢ ومستوى طاقيّ ١ فوق المستوى الأرضي تماماً. فإذا كانت طاقة الليزر في منطقة تحت الأحمر ($\lambda = 10 \times 10^3 - 10^4$ مم) وكانت ط = $10 \times 10^3 - 10^4$ جول، فما طاقة المستوى الطاقّي ط ٢؟

٦-٥:٥ اذكر عدة موادّ ليزرية واذكر الحاقنات النشطة والطول الموجي للضوء المنبعث ونوع عملية الضخّ أو التهيج.

٧-٥:٥ في ليزر الهيليوم - النيون يعطي الانتقال من المستوى 3S إلى المستوى 2p لذرة النيون انبعثاً ليزرياً عند الطول الموجي $632,8$ ن.م. فإذا كانت طاقة المستوى $2p = 10 \times 10^3 - 10^4$ جول، فجد طاقة الضخّ اللازمة بافتراض عدم وجود هدر في الانتقال.

٨-٥:٥ من عيوب معظم ليزرات أنصاف الموصلات أنها تبعث الضوء في مستوى بدل خطّ أو على الأقلّ بدل مخروط ضوئيّ زاويته الجسمة صغيرة. فكر في شكل مناسب للليزر لاستثمار الطاقة الناتجة من هذه الليزرات استثماراً أفضل.

٩-٥:٥ يعطي ليزر ما ملي واطاً واحداً؛ وقطرُ الحزمة منه ٢ مم. جد كثافة قدرته للملمتر المربع الواحد في بُعْثَةِ قطرها ١٠×١-٣ مم مفترضاً خسارة مقدارها ٢٠% في المنظومة المركزة.

١٠-٥:٥١ اذا توافرت لديك ليزرات متنوعة تعطي ألواناً مختلفة، فما أفضل لون لمايلي :

(أ) تهيج الفلورة في الجزء الأخضر من الطيف

(ب) اختراق هواء ذي ضغط عالٍ

(ج) اسقاط الاشعاع على ورم لحمي اللون

(د) تتبع قذيفة مطلية بالفضة بصرياً

(هـ) لحم أسلاك نحاس تبدو مضقرة للعين

(و) استحثاث فوسفور في منطقة تحت الأحمر

اشرح اجاباتك

١١-٥:٥ وُجِّهَ ليزرُ ياقوتي محدودٌ بالحيدود خارجَ الهواءِ على هدفٍ يبعدُ ١٠,٠٠٠ كم، فإذا كان قطرُ الحزمة الليزرية ١٤ مم فبين حجمها عندما تضربُ الهدف.

١٢-٥:٥ يبلغ قطرُ حزمة ليزر الهيليوم - النيون حوالي ١,٥٥ مم. جد تباعد الحزمة (المحدودة بالحيدود): (أ) من دون استخدام تلسكوب إضافي مع الليزر. (ب) باستخدام تلسكوب إضافي تكبيره ٢٠× مع الليزر، (ج) ارسماً شكلاً شعاعياً يوضح استخدام التلسكوب مع الليزر.

١٣-٥:٥ يرسلُ ليزرُ الهيليوم - الكادميوم حزمةً ضوئيةً قطرها ٢ مم وتحتوي على الطولَين الموجيين ٣٢٥ و ٤٨٨ نـم. فعلى أية مسافةٍ من الليزر ينفصلُ هذان الطولان الموجيان مسافة ١ سم بافتراض أداء محدد بالحيدود والانتشار في الخلاء التام.

١٤-٥:٥ صمّم ليزرُ الهيليوم - النيون بمَرَاتين متحدتي البؤرة: نصف قطر تكوير كُلٍّ منهما ٢٠ سم، وتكونان معا الفجوة البصرية. فإذا أريدَ تسديدُ الحزمة الناتجة ضمنَ حدود الحيدود، وإذا كانت المرأتان مصنوعتين من الكوارتز المنصهر الذي سمكه ١ سم (معامل الانكسار = ١,٤٦)، فما نوع السطح الذي ينبغي أن يُصقّل على سطحَي المرأتين من الخارج؟ افترض أن الانبعاث يحدثُ من مركز الأنبوب.

أجزاء السادس

الكهرومغناطيسية والنسبية

Electromagnetics and Relativity

نقدم في هذين الفصلين الأخيرين مجموعة غير متجانسة من الموضوعات . فهناك أولاً خلاصةً بالنظرية الكهرومغناطيسية، وبصورة أساسية معادلات ماكسويل وآثارها التي هي بمثابة استكمالٍ للمعالجة السابقة ذات الصبغة التجريبية لكل من موضوعي الاستقطاب والسطوح الفاصلة البصرية .

ثم ننتقل بعد ذلك إلى مناقشة الظواهر البصرية التي تحدث عندما يكون المصدر أو الوسط أو المستقبل أو أية مجموعة منها في حالة حركة؛ فبعض هذه الظواهر كتجربة ميكلسون - مورلي تشكل الأساس للنظرية النسبية الخاصة، كذلك فإن بعض الظواهر الأخرى تتبع من النظرية النسبية. ومع أن ما نعرفه حتى الآن غير كافٍ، إلا أنه يبدو من باب المقارنة أن أي قانون من قوانين البصريات الاعتيادية هو بحاجة إلى إعادة صياغة عندما نتعامل مع السرعة العالية، مما يُفضي إلى ما يمكن تسميته «بالبصريات النسبوية»

.relativistic optics

الفصل ٦ : ١

النظرية الكهرومغناطيسية

أشرنا مراراً في الفصل ٣ : ٢ عند بحثنا السطوح البصرية إلى معادلات ماكسويل من دون اشتقاقها بالتفصيل، ونقدّم في هذا الفصل هذه الحلقة المفقودة.

معادلة ماكسويل الأولى

يمكن اشتقاق معادلة ماكسويل الأولى من قانوني كولم وجاوس and Gauss and Columb. ويتناول قانون كولم القوة Q بين شحنتين نقطيتين q_1 ، q_2 مفصولتين بمسافة r ؛ وهذه القوة هي :-

$$Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \text{.....} \quad [1-1:6]$$

حيث ϵ_0 هو الثابت الكهربائي أو نفاذية permittivity الخلاء التام، ويُساوي 8.85×10^{-12} كولم^٢/نيوتن - م^٢؛ F المتجه الوحدة الدال على الاتجاه. وبوجود عدة شحنات كهربائية، يصبح قانون كولم على النحو التالي :

$$Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \quad \text{.....} \quad [2-1:6]$$

وبوجود تجمع شحنات على سطح غير منتظم، فإن القوة تُعطى بالمعادلة التالية :-

$$Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}^2} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}^2} + \dots \right] \quad \text{.....} \quad [3-1:6]$$

حيث هـ. هي شحنة الاختبار ود هـ هو جزء الشحنة على السطح.

وتعرف شدة المجال الكهربائي حـ الذي هو متجهة أيضا على النحو التالي :-

$$[4-1:6] \quad \vec{H} = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \left\{ \frac{dH}{F} \right\} \dots$$

ونعتبر بعد ذلك الفيض ϕ للشدة الكهربائية وعلاقته بالشحنة هـ داخل السطح. ولا تعني لفظة (الفيض) أنَّ شيئاً ما كالطاقة أو القدرة يجري فعلاً؛ وإنما هي مجرد فكرة خطوط الفيض التي تقطع سطحاً أو جزءاً من سطح. وإذا ما مرَّ كثر من الفيض ϕ عمودياً على جزء من سطح ما د م، فإنَّ د ϕ تُعطى بالمعادلة التالية :-

$$[5-1:6] \quad d\phi = dM \dots$$

ولكن لا يلزم أن يكون جزء السطح الفعلي عمودياً على خطوط الفيض؛ إذ يمكن أن يكون له أي اتجاه مثل د م كما في الشكل ١، شريطة أن لا يكون العمود المقام على هذا الجزء د ل موازياً لـ ف؛ ولذلك فإنَّ :-

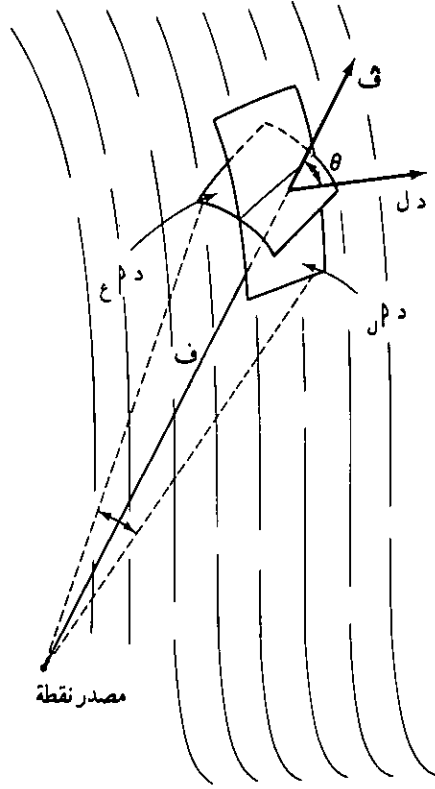
$$dM = F \cdot dL,$$

$$[6-1:6] \quad d\phi = dM \cdot dL \dots$$

ويبلغ جزء الزاوية المجسمة التي يحصرها جزء السطح، كما هو مبين في الشكل، ما يلي :-

$$[7-1:6] \quad d\Omega = F \cdot \frac{dL}{F} \dots \text{ستيراذيان}$$

وتساوي الزاوية المجسمة الكلية التي تُحسب باجراء تكامل المعادلة [7-1:6] لكل السطح الكلي غير المنتظم تلك الزاوية التي تُحصَر بـ سطح كروي: أي $\Omega = 4\pi$. ولذا فإنَّ :-



الشكل ١ : جزء من سطح فعلي د_ل ومسقطه د_ع العمودي على الاتجاه من المصدر النقطي .

$$[٨-١:٦] \quad \left\{ \frac{\vec{f} \cdot \vec{dl}}{f^2} = \epsilon \right. \quad \text{ط استيراديان} \dots\dots$$

ويمكنُ إيجادُ الفيضِ الكلي المارِّ في السطحِ المغلقِ بالتكاملِ بطريقةٍ مماثلةٍ :-

$$[٩-١:٦] \quad \left\{ \frac{1}{\epsilon} = \oint_{\text{سطح مغلق}} \frac{\vec{f} \cdot \vec{dl}}{f^2} \dots\dots \right.$$

وبتضمينِ قيمةِ التكاملِ من المعادلةِ [٨-١:٦] ، نحصلُ على :-

$$[١٠-١:٦] \quad \frac{1}{\epsilon} = \phi \dots\dots$$

وتسمى هذه نظرية الفيض لجاوس Gauss' flux theorem. وبضم المعادلتين [١٠-١:٦]، [٦-١:٦] معاً وبالتكامل نحصل على :-

$$[١١-١:٦] \quad \oint_{\text{السطح المغلق}} \vec{D} \cdot \vec{d\vec{A}} = q_{\text{داخل}} \dots$$

وهذه المعادلة هي قانون جاوس.

ويمكن تمثيل توزيع الشحنات أفضل تمثيل باستخدام كثافة توزيع الشحنة الحجمية ρ (Volume density) « (التي وحدتها الكولم / م^٣) ؛ ولذلك يصبح قانون جاوس على النحو التالي :-

$$[١٢-١:٦] \quad \oint_{\text{السطح المغلق}} \vec{D} \cdot \vec{d\vec{A}} = \int_{\text{الحجم}} \rho \, dV \dots$$

حيث V هو الحجم الكلي المحصور بالسطح المغلق.

افترض أن جزء الحجم ΔV له الأبعاد Δx ، Δy ، Δz ، وأن هذه الأبعاد متناهية في الصغر؛ فمن الممكن وصف الفيض من هذا الحجم بمجموع المشتقات الجزئية الثلاث للمجال $\vec{D}$:-

$$[١٣-١:٦] \quad \oint_{\text{السطح المغلق}} \vec{D} \cdot \vec{d\vec{A}} = \int_{\text{الحجم}} \left(\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \right) dV \dots$$

وباستخدام عامل التباعد $\nabla \cdot$ divergence operator يمكن كتابة الجهة اليمنى من المعادلة السابقة مثل $\nabla \cdot \vec{D}$. ولذلك تصبح المعادلة السابقة على النحو التالي :-

$$[١٤-١:٦] \quad \oint_{\text{السطح المغلق}} \vec{D} \cdot \vec{d\vec{A}} = \int_{\text{الحجم}} \rho \, dV \dots$$

وهذه المعادلة هي الصيغة التفاضلية لقانون جاوس.

لقد بحثنا إلى الآن الفيض الناتج من شحنة في الخلاء التام. ويختلف الوضع داخل عازل كهربائي: فنحن تأثير مجال خارجي تراج نواة الذرة بالنسبة للالكترونات الدائرة وهي الظاهرة التي تعرف بالاستقطاب polarization؛ فالاستقطاب $\vec{P}$ هو متجه مواز لـ $\vec{E}$ ويتناسب معه مقداراً. ويمكن وصف مقدار إزاحة القيمة الإلكترونية بالنسبة للنواة واتجاهها $\vec{P}$ (-ف)، وبصورة أكثر ملاءمة يمكن تصور أن النواة تراج مسافة +ف تحت تأثير المجال $\vec{E}$ ؛ وتسمى النسبة $\vec{P} = \frac{\text{الحقيقة}}{\text{ب}}$ بكثافة الشحنة الحقيقية أو كثافة شحنة الإزاحة displacement charge density.

ولذلك تتألف كثافة الشحنة الكلية من جزئين: كثافة شحنة الاستقطاب $\vec{P}$ وكثافة الشحنة الحقيقية؛ أي أن:-

$\rho_{\text{الكلية}} = \rho + \vec{P} \cdot \nabla$ حقيقة. وبإدخال هذا التوسيع تصبح المعادلة [١٤-١:٦] على النحو التالي:

$$[١٥-١:٦] \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho + \vec{P} \cdot \nabla}{\epsilon_0} \dots\dots$$

ومن دون تقديم البرهان، يمكن القول بأن $\rho + \vec{P} \cdot \nabla$ تساوي $\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ ؛ ولذا تصبح المعادلة [١٥-١:٦] على النحو التالي:-

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_{\text{حقيقة}} - \vec{P} \cdot \nabla}{\epsilon_0} \quad ; \text{أي:}$$

$$[١٦-١:٦] \quad \vec{\nabla} \cdot (\vec{E} + \vec{P}) = \frac{\rho_{\text{حقيقة}}}{\epsilon_0} \dots\dots$$

ويُسمى المتجه $\vec{E} + \vec{P}$ بمتجه الإزاحة $\vec{D}$. وبذلك تصبح المعادلة [١٦-١:٦] كما يلي:-

[١٧-١:٦]

.....

$$\boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \text{ حقيقية}}$$

وهذه المعادلة هي معادلة ماكسويل الأولى في الصيغة التفاضلية . وبايجاد تكامل هذه المعادلة لكل الحجم المحدد بالسطح المغلق (س م) ، فإننا نحصل على :-

$$[١٨-١:٦] \dots\dots \boxed{\int_C \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_C \rho \text{ حقيقية} d\tau} = \int_C \vec{\nabla} \cdot \vec{D} d\tau$$

إنَّ الجزء الأيسر من المعادلة الأخيرة هو معادلة ماكسويل الأولى في الصيغة التكاملية.

معادلة ماكسويل الثانية

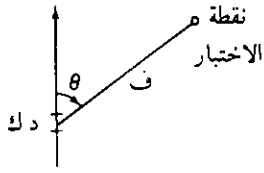
يمكن اشتقاق معادلة ماكسويل الثانية من قانون الحث المغناطيسي^٢ (فانون بيوت وسافارت) الذي يتناول توليد المجالات المغناطيسية بالتيارات الكهربائية. وفي عام ١٨١٩ اكتشف أورستد Oersted أنَّ التيار الكهربائي يوقِّع قوة على إبرة ممغنطة ، وَوَجَدَ أمبير Ampere بعد سنة من ذلك أنَّ هنالك قوتين تَوَثِّرَان في سِلْكَيْن : كُلُّ منهما يَحْمِلُ تياراً كهربائياً . وَقَدْ بَيَّنَ رولاند Rowland عام ١٨٧٩ أنَّ الشحنات داخل السلكين ، وَلَيْسَ السلكين ، هي التي تتسبَّب في هذا التأثير.

وبعد أن بحثنا شدة المجال الكهربائي $\vec{E}$ نُدْخِلُ الآنَ لفظاً مماثلاً هو شدة المجال المغناطيسي $\vec{H}$ ؛ ثُمَّ نَسْأَلُ ما الإسهام $\vec{H}$ الذي يولِّده تيار كهربائي ثابت يَمُرُّ في جزءٍ من السلكِ ذلك .

وإذا كانت $|\vec{r}|$ هي المسافة بين ذلك ونُقْطَةِ الاختبار، وكانت θ هي الزاوية المحصورة بين السلكِ والمسافة $\vec{r}$ ، فَإِنَّ $\vec{H}$ تُعْطَى بالمعادلة التالية :-

[١٩-١:٦]

$$\dots\dots \vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^2} \text{ ت ذلك جا } \theta$$



وباستخدام لغة المتجهات تصير المعادلة السابقة على النحو التالي :

[٢٠:١:٦]

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{r^2} \vec{DK} \times \vec{F} \dots\dots$$

الشكل ٢ : قياس المجال
المغناطيسي الناتج من تيار ثابت

وعلاوة على شدة المجال المغناطيسي $\vec{H}$ ، نستخدم الحث المغناطيسي
B magnetic induction الذي هو متجه كذلك، ومرتبطة مع $\vec{H}$ على النحو التالي :

[٢١:١:٦]

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \dots\dots$$

حيث μ . هو النفاذية المغناطيسية للخلاء التام أو ثابت النفاذية المغناطيسية
ويساوي : $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ وبر/امبير.

ولذلك فإن :

[٢٢:١:٦]

$$\vec{B} = \mu \cdot \frac{1}{4\pi} \frac{1}{r^2} \vec{DK} \times \vec{F} \dots\dots$$

وهو قانون بيوت * سافارت Biot-Savart's law .

ثم نستخدم قانون بيوت - سافارت لحساب الحث المغناطيسي $\vec{B}$ عند نقطة ما ؛
وإذا لم يكن هنالك تشكيل معين للسلك، نستبدل بت كثافة التيار I في الحجم V .
وبحساب التكامل، وباستخدام عامل التباعد كما تم في معادلة ماكسويل
الأولى ، نحصل على :

$$\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \vec{J} \times \frac{\vec{r}}{r^3} dV$$

[٢٣:١:٦]

$$= \frac{\mu}{4\pi} \int_V \left(\vec{J} \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) dV \dots\dots$$

* د ك × ف هو حاصل الضرب المتجهي، وهو متجه يؤشر في اتجاه عمودي على المستوى المحدد
بالمجهين د ك، ف.

وباعتبار المتكامل فقط، نجد أن :-

$$\frac{\hat{F}}{F^2} \times \nabla \cdot \vec{J} - \vec{J} \times \nabla \cdot \hat{F} = \left(\frac{1}{F^2} \times \vec{J} \times \nabla \cdot \hat{F} \right) \cdot \nabla$$

ولما كانت كثافة التيار $\vec{J}$ ثابتة، فإن :-

$$[24-1:6] \quad \dots \dots \dots \vec{J} \cdot \nabla = \text{صفر} \dots \dots \dots$$

وهكذا يتبقى الحد $\vec{J} \cdot \nabla \left(\frac{\hat{F}}{F^2} \right) \times$ ؛ وهذا الحد يساوي صفراً أيضاً. ولذا نجد أن :-

$$[25-1:6] \quad \dots \dots \dots \boxed{\vec{B} \cdot \nabla = \text{صفر}}$$

وهي الصيغة التفاضلية لمعادلة ماكسويل الثانية.

ومن النتائج التي تتبع من هذه المعادلة أن خطوط الفيض المغناطيسي التي تمثل مجال الحث المغناطيسي $\vec{B}$ ينبغي أن تكون متصلة في الخلاء؛ إذ لا توجد هناك أقطاب مغناطيسية منعزلة؛ فالأقطاب المغناطيسية توجد في أزواج. وكما ذكر من قبل فإن قيمة تكامل الحث المغناطيسي $\vec{B}$ المأخوذ على سطح مغلق يحصر حجماً ما تساوي صفراً :-

$$[26-1:6] \quad \dots \dots \dots \boxed{\oint_{\text{مس. م.}} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \text{صفر}}$$

وهذه المعادلة هي معادلة ماكسويل الثانية في الصيغة التكاملية.

ويمكن تحويل الصيغة التفاضلية إلى الصيغة التكاملية وبالعكس باستخدام نظرية جاوس التي تتعلق بتحويل تكامل سطحي إلى تكامل حتمي:

$$[27-1:6] \quad \dots \dots \dots \oint_{\text{مس. م.}} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_{\text{ح. ح.}} \vec{B} \cdot \nabla \times d\vec{A} \dots \dots \dots$$

+ للحصول على تفاصيل ذلك، ارجع إلى كتاب :-

E. M. Pugh and E. W. Pugh, *Principles of Electricity and Magnetism* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co. 1960), 246.

معادلة ماكسويل الثالثة

بينما تُشتقُّ المعادلةُ الأولى لماكسويل من قانونِ جاوس والمعادلةُ الثانيةُ من قانونِ بيوت - سافارت ، فسنرى فيما يلي أنَّ معادلةَ ماكسويل الثالثة تُشتقُّ من قانونِ فَرادي للكهربائيةِ التأثيرية. فإذا حُرِّكت حلقةٌ سلكيةٌ ومجالٌ حثِّ مغناطيسيٌّ بالنسبةِ إلى بعضيهما بعضاً، فإنَّ قوةَ دافعةٍ كهربائيةٍ (ق د ك) تتولَّد في السلك ؛ ويتناسبُ مقدارُ هذه القوةِ الدافعةِ الكهربائيةِ معَ معدلِ التغيرِ للفيضِ المغناطيسي ϕ :

$$[27-1:6] \quad \text{ق د ك} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi_1 - \phi_2}{dt} = \dots$$

وهذه المعادلة هي الصيغةُ الرياضيةُ لقانونِ فَرادي.

ولكنَّ الفيضَ المغناطيسيَّ ϕ الذي يمرُّ في حلقةٍ مغلقةٍ يُساوي الفيضَ المارَّ في أيِّ سطحٍ وهميٍّ (س) تنطَبِقُ حوافُّه على الحلقة :-

$$[28-1:6] \quad \phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{l} \dots$$

وبضمِّ المعادلةِ هذه إلى قانونِ فَرادي نحصلُ على :-

$$[29-1:6] \quad \text{ق د ك} = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{l} \dots$$

ويمكنُ أيضاً وصفُ القوةِ الدافعةِ الكهربائيةِ بالمعادلةِ التالية :-

$$\text{ق د ك} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

حيث يتمُّ التكاملُ على دائرةٍ تتألفُ من جزءٍ من السلكِ د ك . وبضمِّ هذه المعادلةِ إلى

المعادلةِ [29-1:6] ، نحصلُ على :-

$$[30-1:6] \quad \dots \left[\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{l} \right]$$

وهي معادلة ماكسويل الثالثة في صيغتها التكاملية.

وَيُخَصَّلُ على الصيغة التفاضلية لمعادلة ماكسويل الثالثة من نظرية ستوكس theorem
 stokes التي تستخدمُ عموماً لتحويل التكامل الخطي $\oint$ إلى تكامل سطحي $\int_S$ على
 النحو التالي:-

$$[31-1:6] \quad \left[\overrightarrow{ح. د\tau} = \int_S \overrightarrow{\nabla} \times \overrightarrow{ح. د\ell} \dots \dots \right]$$

والمتجه ح يمكن أن يكون متجه أي مجال، أما دτ فهو جزء من الخط الكنتوري و
 دℓ جزء من السطح. ولذلك نجد أن:-

$$[32-1:6] \quad \left[\overrightarrow{ح. د\ell} = \int_S \overrightarrow{\nabla} \times \overrightarrow{ح. د\ell} - \int_S \overrightarrow{\nabla} \cdot \frac{\overrightarrow{B_6}}{z_6} \dots \dots \right]$$

ولما كان السطح س يمثل أي سطح، فإن المتكاملين في التكاملين السطحيين ينبغي أن
 يتساويا؛ أي أن:-

$$[33-1:6] \quad \dots \dots \left[\overrightarrow{\nabla} \times \overrightarrow{ح. د\ell} = \overrightarrow{\nabla} \cdot \frac{\overrightarrow{B_6}}{z_6} \right]$$

وهي الصيغة التفاضلية لمعادلة ماكسويل الثالثة.

معادلة ماكسويل الرابعة

توفر معادلة ماكسويل الرابعة الحلقة المفقودة، ويمكن اعتبارها عكس قانون
 فرادي. فكما أن المجال المغناطيسي المتغير يعطي مجالاً كهربائياً، فالمجال
 الكهربائي المتغير يولد كذلك مجالاً مغناطيسياً.

وتشتق الصيغة التكاملية لمعادلة ماكسويل الرابعة من قانون بيوت - سافارت
 [المعادلة ٢٢-١:٦]؛ فبالتكامل نجد أن:-

$$[34-1:6] \quad \overrightarrow{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{1}{r^2} \overrightarrow{د\ell} \times \overrightarrow{ف\hat{r}} \dots \dots$$

وينطبق قانون بيوت - سافارت على التيارات المستقرة في الدائرة المغلقة فقط . ويمكن ضمُّ التيارات المترددة في دائرة مفتوحة بإدخال إصطلاح رمزي للتغير الزمني كالاتعاضة عن كثافة التيار I بالمقدار $\frac{d6}{z6}$. وبتتبع خط من خطوط الفيض متحدة المركز مع السلك كالخط ϕ على بُعد r من السلك، ثم بحساب التكامل الخطي $\oint B \cdot d\phi$ حول المسار مبتدئين بنقطة معينة ومُنتهين بها، نحصل على :-

$$\oint B \cdot d\phi = \oint \frac{\mu \cdot I}{2\pi r} \cdot d\phi = \frac{\mu \cdot I}{2\pi r} \cdot 2\pi r = \mu \cdot I$$

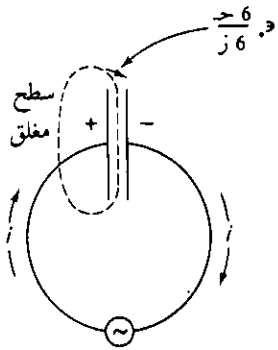
ولأن المسار ϕ يعمل دائرة كاملة : $2\pi r = \mu$ ؛ فإن :-

$$\oint B \cdot d\phi = \mu \cdot I \quad \text{.....} \quad [35-1:6]$$

وهذه المعادلة الأخيرة هي قانون أمبير للدائرة Ampere circuital law . وبالاتعاضة عن μ بـ H ، نجد أن :-

$$\oint H \cdot d\phi = I = \oint J \cdot d\ell \quad \text{.....}$$

حيث J هو كثافة التيار المكانية .



الشكل ٣ : اشتقاق مفهوم تيار الإزاحة

اعتبر بعد ذلك أن مكثفاً ما C قد وُصِلَ بمصدر تيارٍ متناوبٍ كما في الشكل ٣ . فإذا جرى التيارُت لفترةٍ زمنيةٍ قصيرةٍ في الاتجاه المبين ، تتجمعُ (تتراكمُ) الشحنةُ على لوحَي المكثفِ حتى يُشحَنَ تماماً إلى فرقِ جهدٍ المصدر . وعَبْرَ السطحِ المغلقِ CS المبين في الشكل ، كانَ هنالك تيارٌ كهربائيٌّ قد عَبَرَهُ خلالَ الفترة ؛ إلا أنه كما هو ظاهرٌ لم يَخْرُجْ مِنْهُ أيُّ تيارٍ كهربائيٍّ . ولأغراضِ الاتصال ، افترضْ ما كسويل أن هنالك تياراً يخرجُ من السطحِ بقدرٍ ما يدخلُ فيه ؛ ولكن لا يوجدُ هنالك أيُّ تيارٍ عاديٍّ يسيرُ من اللوحِ الواحدِ إلى الآخر . ومن هنا ظهرت فكرةُ تيارِ الإزاحة .

وبشحن المكثف، تزداد شدة المجال الكهربائي بين اللوحين مُدْعَمًا بذلك استقطاب العازل الكهربائي؛ ويمكن اعتبار إزاحة الشحنات الموجبة إلى جهة والسالبة إلى الجهة الأخرى مكافئة لتيار كهربائي على الرغم من أن شحنات الاستقطاب لا تتحرك مواقعها المحلية داخل العازل. ولكن كثافة التيار $\frac{d6}{z6}$ هي جزء فقط من تيار الإزاحة؛ فتيار الإزاحة الكلي هو:

$$[37-1:6] \quad \dots\dots \frac{\overleftarrow{d6}}{z6} + \frac{\overleftarrow{h6}}{z6} \quad \text{د.} = \frac{\overleftarrow{d6}}{z6}$$

ولذا يوجد هنالك حتى في الخلاء التام الذي لا توجد فيه شحنة استقطاب تيار إزاحة يمكن تمثيله على الرغم من صعوبة تصويره بـ $\text{د.} \frac{\overleftarrow{h6}}{z6}$ ؛ فهذا المفهوم لتيار الإزاحة $\frac{\overleftarrow{d6}}{z6}$ قاد مكسويل إلى التنبؤ بالأمواج الكهرومغناطيسية قبل أن يكتشفها هرتز بالتجربة. لاحظ أن تيار الإزاحة «يجري» عندما يتغير جـ، ولكنه ينقطع حالما يثبت جـ؛ والتيار هو معدل جريان الشحنة إلى لَوْحِي المكثف :-

$$[38-1:6] \quad \dots\dots \frac{d\text{هـ}}{dz} = \text{ت}$$

فإذا كانت أ هي مساحة أحد لَوْحِي المكثف، و σ هي كثافة الشحنة السطحية، فإن :-

$$[39-1:6] \quad \dots\dots \text{هـ} = \text{أ} \sigma$$

وتكون كثافة التيار هي :-

$$[40-1:6] \quad \dots\dots \frac{\sigma d}{dz} = \text{ج}$$

لكن $\sigma = \text{د.} \text{ح} \text{و} \text{د.} \text{ح} = \text{د.} \text{د}$ ، حيث د هو متجه الإزاحة. ولذلك يمكن كتابة المعادلة [40-1:6] على النحو التالي :-

$$[41-1:6] \quad \dots\dots \frac{\overleftarrow{d6}}{z6} = \text{ج}$$

ومن ثَمَّ تُصَبِّحُ المعادلةَ [٦: ١-٣٦] على النحو التالي :-

$$[٦: ١-٤٢] \quad \oint \vec{H} \cdot d\vec{\rho} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{1}{c} \frac{d\vec{D}}{dt} \right) \cdot d\vec{S} \quad \dots\dots$$

إنَّ المعادلةَ الكاملةَ التي تحوي التأثيرَ المغناطيسيَّ الناشئَ عن التيارِ الحقيقيِّ والتأثيرِ المغناطيسيِّ الناشئَ عن تيارِ الإزاحةِ هي :

$$[٦: ١-٤٣] \quad \dots\dots \oint \vec{H} \cdot d\vec{\rho} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{1}{c} \frac{d\vec{D}}{dt} \right) \cdot d\vec{S} \quad \dots\dots$$

وهذه المعادلةُ الأخيرةُ هي الصيغةُ التكامليةُ لمعادلةِ ماكسويلِ الرابعةِ ؛ أمَّا معادلةُ ماكسويلِ الرابعةِ للتياراتِ الثابتةِ فهي :

$$[٦: ١-٤٤] \quad \oint \vec{H} \cdot d\vec{\rho} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad \dots\dots$$

ويمكنُ تحويلُ الجزءِ الأيمنِ من هذه المعادلةِ إلى تكاملٍ مساحيٍّ باستخدامِ نظريةِ ستوكس كمايلي :

$$[٦: ١-٤٥] \quad \oint \vec{H} \cdot d\vec{\rho} = \int_S \left(\vec{H} \times \nabla \right) \cdot d\vec{S} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad \dots\dots$$

ولأنَّ التكاملَينِ الأيسرينِ متساويانِ ، فإنَّ المُتكاملَينِ يتساويانِ ؛ أيُّ أنَّ :-

$$[٦: ١-٤٦] \quad \dots\dots \vec{J} = \vec{H} \times \nabla$$

وللتياراتِ المتغيرةِ زمنياً ، يَجِبُ إضافةُ $\frac{1}{c} \frac{d\vec{D}}{dt}$ إلى الطرفِ الأيسرِ من المعادلةِ الأخيرةِ :-

$$[٦: ١-٤٧] \quad \dots\dots \frac{1}{c} \frac{d\vec{D}}{dt} + \vec{J} = \vec{H} \times \nabla$$

وهي الصيغة التفاضلية لمعادلة ماكسويل الرابعة .

ونقدم في الجدول ١ خلاصة بمعادلات ماكسويل في صيغها التفاضلية والتكاملية وقائمة بالبارامترات الأساسية (التأثيرات) والأسباب والتغير الزمني للظواهر المرتبطة بها .

الجدول ١ : خلاصة بمعادلات ماكسويل

رقم معادلة ماكسويل	الصيغة التفاضلية	الصيغة التكاملية
١	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$ حقيقية	$\oint_{\text{سم}} \vec{D} \cdot d\vec{l} = \int_{\text{ح}} \rho$ حقيقية د ح
	مبنية على قانون كولم (القوة بين الشحنات) ونظرية الفيض لجاوس	البارامتران الأساسيان $\vec{D}, \vec{E}$ السبب هـ (الشحنة) التغير الزمني لا
٢	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \text{صفر}$	$\oint_{\text{سم}} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \text{صفر}$
	قانون بيوت - سافارت (التيار المستقر الذي يولد المجال المغناطيسي).	$\vec{B}, \vec{H}$ التيار (ت) لا
٣	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{l}$ سم
	قانون فرادي (مجال مغناطيسي متغير زمنيا يولد بالتأثير مجالا كهربائيا).	$\vec{B}$ نعم
٤	$\vec{H} \times \vec{\nabla} = \vec{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \vec{J} \cdot d\vec{l} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{D} \cdot d\vec{l}$ سم
	عكس قانون فرادي	$\vec{D}, \vec{H}$ نعم

معادلات ماكسويل وسرعة الضوء

نبدأ بالصيغة التفاضلية لمعادلة ماكسويل الثالثة [٣٣-١:٦]، ونعوّض قيمة $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ ؛ وبذلك نحصل على:-

$$[٤٨-١:٦] \quad \dots\dots \frac{\vec{H}_6}{z_6} \cdot \mu - = \vec{H} \times \vec{\nabla}$$

ونأخذ بعد ذلك لَفَّ المعادلة Curl [٤٨-١:٦] على النحو التالي:

$$[٤٩-١:٦] \quad \dots\dots (\vec{H} \times \vec{\nabla}) \cdot \frac{6}{z_6} \cdot \mu - = (\vec{H} \times \vec{\nabla}) \times \vec{\nabla}$$

ثم نعوّض القيمة $\vec{H} \times \vec{\nabla}$ من الصيغة التفاضلية لمعادلة ماكسويل الرابعة [٤٦-١:٦]، ونعوّض أيضاً قيمة $\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{H}$ فنحصل على:-

$$[٥٠-١:٦] \quad \dots\dots (\frac{\vec{H}_6}{z_6} \cdot \epsilon + \vec{J} \text{ حقيقي}) \cdot \frac{6}{z_6} \cdot \mu - = (\vec{H} \times \vec{\nabla}) \times \vec{\nabla}$$

وكما يلاحظ، فقد تم حذف $\vec{H}$ ؛ لكن بقيت $\vec{H}$.

إن لَفَّ دالة متجه هو عموماً:

$$\vec{H} \times \vec{\nabla} = \vec{H} \cdot \vec{\nabla} - \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = (\vec{H} \cdot \vec{\nabla}) - (\vec{\nabla} \cdot \vec{H}) = (\vec{H} \times \vec{\nabla}) \times \vec{\nabla}$$

[٥١-١:٦]

ولكن وفق معادلة ماكسويل الأولى لمنطقة خالية من الشحنة، نجد أن:-

$$\vec{H} \cdot \vec{\nabla} = \text{صفر}$$

ومن ثم، فمن الصيغة العامة لقانون أوم نجد أن:-

$$\vec{J} = \sigma \vec{H} \text{؛ ومن المعادلتين [٥٠-١:٦] و [٥١-١:٦] نجد أن:}$$

$$\left(\frac{\vec{H}_6}{z_6} \cdot \vec{\sigma} + \vec{H}_6 \right) \frac{6}{z_6}, \mu = -(\vec{H}_6 \times \vec{\nabla}) \times \vec{\nabla}$$

$$[52-1:6] \quad \vec{H}_6^2 \vec{\nabla} - (\cdot) \vec{\nabla} = \dots$$

وَأَنَّ :-

$$[53-1:6] \quad \dots \frac{\vec{H}_6^2}{z_6^2} \cdot \mu + \frac{\vec{H}_6}{z_6} \sigma \cdot \mu = \vec{H}_6^2 \vec{\nabla}$$

$$[54-1:6] \quad \dots \frac{\vec{H}_6^2}{z_6^2} \ni \mu = \vec{H}_6^2 \vec{\nabla} \text{ وفي وجود مادة نجد أن :}$$

ونجد للمجال المغناطيسي المماثل أيضاً أن :

$$[55-1:6] \quad \dots \frac{\vec{H}_6^2}{z_6^2} \ni \mu = \vec{H}_6^2 \vec{\nabla}$$

وإذا كانت الموجة مستوية وتنتشر في اتجاه المحور السيني الموجب ، وجب أن لا تعتمد على الإحداثيين الصادي والعيني ، أي أن :

$$\cdot = \frac{H_6}{\epsilon_6} = \frac{H_6}{\epsilon_6}, \cdot = \frac{H_6}{\epsilon_6} = \frac{H_6}{\epsilon_6}$$

ولذلك تُصيَّح المعادلتان [54-1:6] و [55-1:6] على النحو التالي :-

$$[57, 56-1:6] \quad \dots \frac{\vec{H}_6^2}{z_6^2} \ni \mu = \frac{\vec{H}_6^2}{s_6^2}$$

وَنَعُوْضُ لِلْمَجَالِ حـ دَالَةٌ مُتَّجِهَةٌ عَامَةً أَي :-

$$[٥٧-١:٦] \quad \text{حـ} = \text{ق} (ز - \frac{\text{س}}{\text{ر}}) \dots\dots$$

وَبَأْخِذِ تَفَاضِلِ حـ بِالنِّسْبَةِ إِلَى س ، يَكُونُ :-

$$[٥٩-١:٦] \quad \frac{\text{ح}^6}{\text{ز}^6} = - \frac{1}{\text{ر}} \text{ق}^- \dots\dots$$

حَيْثُ قَ هُوَ الْمَشْتَقَّةُ الْأُولَى لِلدَّالَةِ ق .

وَالْمَشْتَقَّةُ الثَّانِيَةُ هِيَ :

$$[٦٠-١:٦] \quad \frac{\text{ح}^2}{\text{س}^6} = \frac{1}{\text{ر}^2} \dots\dots$$

وَبصُورَةٍ مِمَّاثِلَةٍ ، فَإِنَّ أَخْذَ تَفَاضِلِ حـ بِالنِّسْبَةِ إِلَى زِيعْطِي :-

$$\text{ق}^- = \frac{\text{ح}^6}{\text{ز}^6}$$

$$[٦٢، ٦١-١:٦] \quad \frac{\text{ح}^2}{\text{ز}^6} = \text{ق}^- \dots\dots$$

وَتَسْتَوِي الْمَعَادِلَتُ [٥٩-١:٦ ، ...٦٢] الْمَعَادِلَةُ [٥٦-١:٦] إِذَا كَانَ :-

$$\mu \ni \text{ر}^2 = ١ ؛ \text{أَي} :$$

$$[٦٣-١:٦] \quad \dots\dots \quad \frac{1}{\sqrt[3]{\mu}} = \text{ر}$$

وَتَصْبِحُ هَذِهِ الْمَعَادِلَةُ فِي الْخَلَاءِ التَّامِّ :-

$$[٦٤-١:٦] \quad \dots\dots \quad \frac{1}{\sqrt[3]{3.\mu}} = \text{c}$$

وتربط هذه المعادلة سرعة الضوء ثابتين كهربائيين : النفاذية المغناطيسية للخلاء التام μ . وهو ثابت طبيعي ، والنفاذية الكهربائية للخلاء التام ϵ . الذي يجب تعيينه بالتجربة .

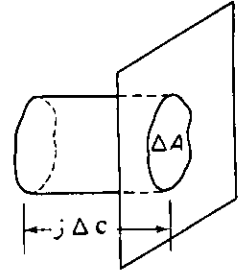
وقد عُيِّنَت القيمة العددية للمقدار $\frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$ إلى درجة عالية من الدقة بطرق كهربائية .

فأولا تُقاس سعة المكثف الذي تعرف أبعاده الفيزيائية بدقة ، وتُعطى هذه السعة بالوحدات الكهروستاتيكية ؛ ثم تقاس سعة المكثف نفسه بدائرة الجسر bridge circuit ، وتُعطى هذه السعة بالوحدات الكهرومغناطيسية . ولا حاجة إلى القول إن هذه النتيجة تتفق تماماً مع سرعة الضوء كما تُقاس بطرق بصرية مختلفة تماماً .

نقل الطاقة Energy Transfer

من خصائص الموجة قدرتها على نقل الطاقة . ومن السهل أن نتصور نقل الطاقة من مثال الصخرة التي تُلقي في كفة ميزان ؛ غير أنه يمكن إلقاء الصخرة أيضاً في ماء هاديء فتستفيد جزءاً من طاقتها في توليد الموجات التي بدورها تنقل الطاقة إلى الميزان .

وفي حالة الأمواج الكهرومغناطيسية ، اعتبر الطاقة التي تمر في مساحة Δ عمودية على اتجاه الجريان (الشكل ٤) . ولما كانت الأمواج تنتقل بسرعة c ، فإن الطاقة التي تخرق Δ خلال فترة زمنية Δt ستكون هي الطاقة التي يحتويها حجم مساحته Δ وارتفاعه $c \Delta t$ ، أي الطاقة المحتواة في الحجم $\Delta c \Delta t$. وإذا كانت w هي كثافة الطاقة ، فإن الطاقة الكلية المارة في Δ تكون :-



الشكل ٤ : اشتقاق متجه بوينتغ .

$$Q = w \Delta c \Delta t \quad (٦:١-٦٥)$$

أما القدرة ϕ أو الطاقة المنقولة في وحدة الزمن فتكون إذا :-

$$\phi = \frac{w \Delta c \Delta t}{\Delta t} = w \Delta c \quad (٦:١-٦٦)$$

ولكن المجالين المغناطيسي والكهربائي يتميزان بكثافتَي طاقة يمكن تسميتهما w_H ، w_E على الترتيب . وتُعطى كثافة الطاقة للمجال الكهربائي على النحو التالي :-

$$W = \frac{1}{\gamma} \cdot |\vec{H}|$$

؛ أمّا كثافة الطاقة للمجال المغناطيسي فهي :-

$$W_H = \frac{1}{2} \mu \cdot |\vec{H}|^2$$

و يشير العامل $\frac{1}{2}$ إلى متوسط مربع الجيب مُكاملاً للزوايا جميعها. وَيُعطى المعدل الزمني لكثافة الطاقة الكلية بالمعادلة الثانية :-

$$[67-1:6] \quad \dots \dots \frac{1}{\gamma} = W_H + W = W \quad \dots \dots \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{2} \mu \cdot |\vec{H}|^2 + \dots \dots$$

افترض أنّ الطاقة تجري في الاتجاه السيني الموجب عبر مكعب صغير أبعاده دس، دص، دع؛ فتكون الطاقة داخل المكعب في لحظة ما هي :-

$$[68-1:6] \quad \dots \dots Q = \left(\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{2} \mu \cdot H^2 \right) \cdot دس \cdot دص \cdot دع \dots \dots$$

وبأخذ التفاضل بالنسبة إلى الزمن نحصل على :-

$$\frac{Q}{\gamma} = \left(\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{2} \mu \cdot H^2 \cdot دس \cdot دص \cdot دع \right) \dots \dots$$

[69-1:6]

وباستبدال المشتقات المكانية بالمشتقات الزمانية التالية :-

$$\frac{Q}{\gamma} = \frac{1}{2} \mu \cdot H^2 \cdot دس \cdot دص \cdot دع \dots \dots$$

وبتضمينها في المعادلة السابقة، فإننا نحصل على :-

$$\frac{Q}{\gamma} = \left(\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{2} \mu \cdot H^2 \cdot دس \cdot دص \cdot دع \right) \dots \dots$$

[70-1:6]

$$\dots \dots \frac{Q}{\gamma} = \left(\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{2} \mu \cdot H^2 \cdot دس \cdot دص \cdot دع \right) \dots \dots$$

وينبغي أن يوصف جريان الطاقة عَبْرَ وَحْدَةِ المساحةِ المتجهة في الفراغ دأ بالمتجه $\vec{S}$ أيضاً؛ ومن ثَمَّ فإنَّ معدلَ تَغْيِيرِ الطاقةِ داخلَ الحجمِ هُوَ:-

$$[٧١-١:٦] \quad \left. \vec{S} \cdot d\vec{A} \right|_{S_6} = -\frac{Q_6}{Z_6} \dots\dots$$

حيث يؤخذ التكامل لكل السطح المغلق. ومن المعادلتين [٧١-١:٦]، [٧٠-١:٦]، نجدُ أنَّ:-

$$[٧٢-١:٦] \quad \left. \vec{S} \cdot d\vec{A} \right|_{S_6} = [S_6 - S_6] = 0 \quad \text{دع} \dots\dots$$

وَأَنَّ:

$$[٧٣-١:٦] \quad \frac{6}{S_6} (\text{حصر } H) = \frac{6}{S_6} (\text{دع } S_6) \dots\dots$$

وتصحُّ المعادلةُ الأخيرةُ لأيِّ حجمٍ؛ ومن ثَمَّ فإنَّ:-

$$[٧٤-١:٦] \quad \frac{6}{S_6} (\text{حصر } H) = \frac{6}{S_6} (\text{دع } S_6) \dots\dots$$

وبإيجاد التكامل على S ، نحصلُ على:-

$$[٧٥-١:٦] \quad S = \text{حصر } H \dots\dots$$

وبصورةٍ عامةٍ:-

$$[٧٦-١:٦] \quad \boxed{\vec{S} = \vec{H} \times \vec{H}} \dots\dots$$

حيثُ $\vec{S}$ هو متجهُ بوينتينغ Poynting vector أي متجهُ تدفقِ طاقةِ الأمواجِ الكهرومغناطيسيةِ، وَوَحْدَتُهُ واط/م^٢. وَتُشكِّلُ المتجهاتُ الثلاثةُ $\vec{S}$ ، $\vec{H}$ ، $\vec{H}$ ثلاثياً

متعامداً بمعنى أن المجالين الكهربائي والمغناطيسي متعامدان وأنَّ كُلًّا منهما عمودي على اتجاه تدفق الطاقة الذي يوصف بمتجه بوينتنغ. وتشير شدتا المجالين $\vec{H}$ ، $\vec{E}$ إلى قيمتيهما الآنيتين. ولجالين يتغيران جيئيا ، نجد أن :-

[٧٧-١:٦]

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{H}) \dots\dots$$

حيث $\vec{E}$ ، $\vec{H}$ هما سعتا الموجة .

ضغط الاشعاع Radiation Pressure

تنطوي أية عملية نقل للطاقة على نقل للزخم. ويوضح زخم الأمواج الكهرومغناطيسية بظاهرة ضغط الإشعاع*، وهي الظاهرة الضوئية الوحيدة التي يُعتقد أنها مرتبطة بالمجال المغناطيسي للضوء. ويُعرف زخم الموجة الكهرومغناطيسية بدلالة كثافة الطاقة W على النحو التالي :-

[٧٨-١:٦]

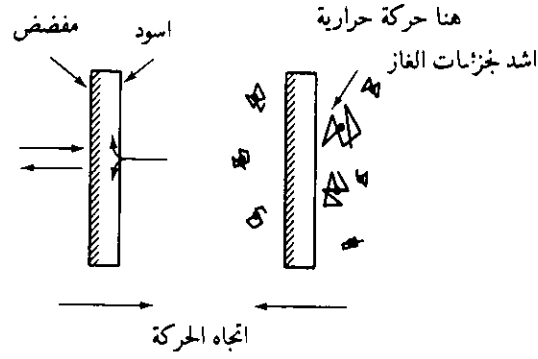
$$p = \frac{W}{c} \dots\dots$$

والزخم الخطي لوحدة الحجم متجه يوازي متجه بوينتنغ؛ كذلك فإن قيمة الزخم المنقول إلى سطح عاكس تبلغ ضعف قيمتها في حالة امتصاص السطح للطاقة.

وتشاهد ظاهرة ضغط الإشعاع يُشير في مقياس إشعاع (راديو متر) كروك Crooke؛ ويتألف هذا المقياس من أربع ريش مروحية تُثبت على محور رأسي: أحد وجهي كل ريشة مُفضّض والآخر مسود. وعندما يسقط الضوء على الريش، تبدأ الدوران في اتجاه يعتمد على كون المنظومة في الخلاء التام أو في غاز مُتبق في الوعاء. ففي الخلاء التام يبلغ ضغط الإشعاع على السطح العاكس ضعف قيمته على السطح المسود، فتتحرك لذلك الريش في

* قاس نيكولز وهُل في الولايات المتحدة وليبيديف في الاتحاد السوفياتي ضغط الاشعاع لأول مرة بعد ٣٠ عاما تقريبا من تنبؤ ماكسويل بهذه الظاهرة؛ ح. هنري «ضغط الاشعاع»، الامريكية العلمية

Scientific American ١٩٥٦ (حزيران ١٩٥٧)، ٩٩-١٠٨.



الشكل ٥: راديومتر كروك: الخلاء التام الى اليسار والخلاء الجزئي الى اليمين .

الاتجاه المبين في الشكل ٥ الى اليسار؛ وفي حالة كون الريش موضوعة في غاز، فإن الدوران يكون في الاتجاه المعاكس؛ ويُعزى هذا إلى أن السطح السوداء تمتص طاقة إشعاعية أكثر فتسخن لذلك أكثر، مما يجعل الجزيئات التي تصطدم بالسطح المسود ترتد بسرعة أكبر من الجزيئات التي تضرب السطح المفضض معطية بذلك زخماً أكبر للسطح المسود .

وعلاوة على الزخم الخطي، فإن الضوء المستقطب دائرياً أو إهليلجياً يُعطي زخماً زاوياً؛ ويعتمد اتجاه العزم على اتجاه استقطاب الضوء الدائري من حيث أنه استقطاب إلى الجهة اليمنى أو إلى الجهة اليسرى .

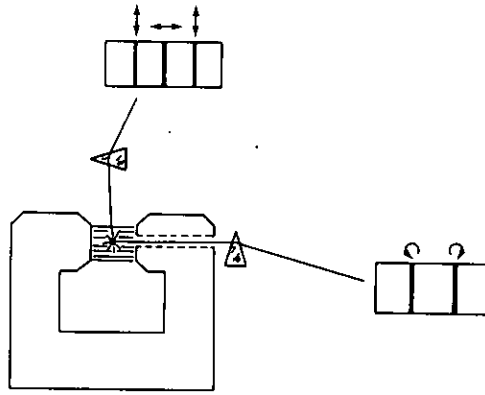
ظاهرة زيمان Zeeman Effect

إذا كان الضوء ظاهرة كهرومغناطيسية، فإن المرء يتوقع أن تتغير بعض خصائص الضوء بالمجالات الكهربائية أو المغناطيسية . وقد اكتشف زيمان + فعلاً عام ١٨٩٦ ظاهرة وصفها أولاً بأنها تعريض (أي زيادة في عرض) خطوط الطيف المنبعثة من مصدر ضوئي موضوع في مجال مغناطيسي قوي؛ وقد وُجد منذ ذلك الوقت أن الخطوط تنفصل حقاً إلى مكونات عديدة بدّل ازدياد عرضها فقط .

- ر. بـ R. A. Beth: «كشف مباشر للزخم الزاوي»، مجلة Phys. Rev. ٤٨ (١٩٣٥)، ٤٧١ .
 + بيتر زيمان (١٨٦٥-١٩٣٥): الفيزيائي الهولندي، والفائز بجائزة نوبل عام ١٩٠٢ . اما عمله الاساسي فهو: «ابحاث في البصريات المغناطيسية» (لندن: ماكملان، ١٩١٣) .

وبعد اكتشاف زيمان بـمدة قصيرة فسر لورنتز Lorentz هذه الظاهرة تفسيراً صحيحاً، وتنبأ بأنَّ كُلَّ خط طيفي، عند النظر إليه في اتجاه يوازي المجال المغناطيسي، ينقسم إلى مكونتين؛ أما إذا نُظِرَ إلى الخط عمودياً على اتجاه المجال، فإنه ينفصل إلى ثلاث مكونات. كما تنبأ أيضاً بأنَّ هذه المكونات هي مستقطبة دائرياً في حالة النظر الموازي للمجال ومستقطبة خطياً عند النظر عمودياً على المجال؛ وقد تحقّق زيمان وآخرون من هذه التنبؤات.

وكما يوضح الشكل ٦، تُحفَرُ فجوة في أحد قطبي مغناطيس في اتجاه يوازي اتجاه المجال المغناطيسي؛ وبذلك يُمكنُ فحص خط طيفي (كخطوط الزئبق أو الهيدروجين)



الشكل ٦: تجربة لمشاهدة ظاهرة زيمان: يشاهد الطيف في الأعلى عند النظر عمودياً على المجال المغناطيسي؛ أما الطيف إلى اليمين فيشاهد عند النظر إليه في اتجاه يوازي المجال.

بكاشف طيفي موضوع عمودياً على اتجاه المجال ثم موازياً له، وينبغي أن يكون للميكروسكوب المستخدم قدرة تبيين عالية.

افترض أنَّ كُلَّ ذرة في المصدر تحوي إلكترونات أو أكثر يدور حولها في مدار لولبي ذي مقطع إهليلجي؛ فمثل هذه الحركة تُعتبرُ محصلة تراكب ثلاث اهتزازات توافقية تحدث في المكان ذي الأبعاد الثلاثة في اتجاه المحاور: السيني، الصادي، والعيني. ويمكن أن تكون الحركة في الاتجاه السيني خطية في حين تكون في الاتجاهين الصادي والعيني دائرية وباتجاهين مختلفين، الأمر الذي ينشأ عنه محصلة إهليلجية.

وإذا كَانَ مصدرُ الضوء موضوعاً في مجالٍ مغناطيسيٍّ شِدْثُهُ B ، فإنَّ القوةَ التي تؤثرُ على كُلِّ إلكترونٍ (شحنته e وسرعته v) هي :-

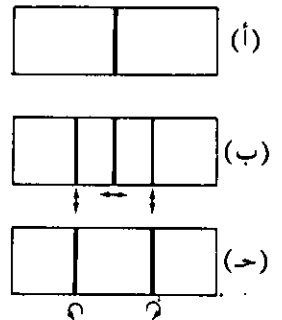
$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B}) \dots\dots$$

ولما كانت محصلة حاصلِ الضربِ المتجهيِّ عموديةً على كُلِّ من المتجهين الابتدائيين ، فإنَّ $\vec{F}$ تتلاشى للإلكترونات التي تتحركُ في اتجاهِ المحورِ السينيِّ كما تتلاشى إذا كانت $\vec{v}$ موازيةً لـ $\vec{B}$ ؛ ومن ثَمَّ فإنَّ الإلكتروناتِ التي تهتزُّ في اتجاهِ $\vec{B}$ لا تتأثرُ بالمجالِ ، وتظلُّ تهتزُّ بنفسِ تواترها الأصليِّ .

ومن جهةٍ أخرى ، تتأثرُ الحركتان الدائريتان بالمجالِ $\vec{B}$ ؛ فالمجالُ المغناطيسيُّ يؤثرُ فيهما بقوةٍ نحوَ مركزِ الدورانِ . ولما كانت الحركتان الدورانيتان متعاكستين ، فإنَّ السرعةَ الزاويةَ للإلكتروناتِ التي تدورُ في اتجاهٍ ما ستَنقُصُ في حينِ ستزيدُ السرعةُ الزاويةُ للإلكتروناتِ الدائرة في الاتجاهِ المعاكسِ وبنفسِ النسبة ؛ وتكونُ الحصلةُ النهائيةُ أنَّ الإلكتروناتِ تظلُّ تتحركُ في مداراتٍ دائريةٍ ولكنَّ بسرعةٍ زاويةٍ تختلفُ في كلا الاتجاهين عن التواترِ الأصليِّ (السرعةِ الأصلية) .

١ . انظرُ إلى المصدرَ عمودياً على $\vec{B}$ ؛ فعندَ تأثيرِ المجالِ تظلُّ المكونةُ في الوسطِ على حالتها السابقة ، إلا أنَّها تُصَحَّبُ بِخَطَّيْنِ مُزَاحَيْنِ عنها مسافةً واحدةً (الشكلُ ٧) ؛ والخَطُّ في الوسطِ هوَ خَطُّ مستقطبٍ خطياً ، إذ يهتزُّ مجالُ ضوئه الكهربائيُّ في اتجاهٍ يوازي $\vec{B}$ ، بينما يكونُ الخطانُ الخارجيانِ مستقطبينِ خطياً في اتجاهٍ عموديٍّ على $\vec{B}$.

٢ . انظرُ الآنَ في اتجاهٍ يوازي $\vec{B}$ ؛ ولما كانت الأمواجُ الكهرومغناطيسيَّةُ مستعرضةً ، فلا تُنتِجُ الاهتزازاتُ في الاتجاهِ السينيِّ أي إشعاعَ ، وتكونُ لذلكِ المكونةُ الوسطيةُ مفقودةً . ولا يُشاهدُ إلاَّ المكونتانِ (الخطان) الناشتان عن الإلكتروناتِ التي تدورُ في اتجاهِ عقاربِ الساعةِ وضيدها في المستوى ص-ع . وهذانِ الخطانِ مستقطبانِ دائرياً وفي



الشكل ٧ : مواقع الخطوط والاستقطابات في ظاهرة زيمان العادية : (أ) من دون مجال مغناطيسي (ب) تشاهد الخطوط عمودياً على اتجاه المجال (ج) تشاهد الخطوط في اتجاه المجال .

اتجاهين متعاكسين كما أُشيرَ إلى ذلك . وتكونُ شدةُ الخطّين في النمط (ح) واحدةً، بينما في النمط (ب) تذهبُ نصفُ الشدةِ الكليةِ إلى الخطّ الوسطي، ويتوزع النصفُ الآخر بالتساوي بين الخطّين الخارجيين.

ويُسمى وجودُ أكثر من مكونتين أو ثلاث مكونات بظاهرة زيمان الشاذة effect anomalous Zeeman . وإذا كانَ المجالُ المغناطيسيُّ قوياً إلى درجةٍ كافيةٍ فإنَّ هذه الخطوط تميلُ إلى أن تصبحَ خطوط زيمان العاديةِ الثلاثية، وهي ظاهرة تُعرفُ بظاهرة باشين - باك Paschen-Back effect . ويُشارُ إلى الظواهرِ المماثلةِ التي تحدثُ في الامتصاصِ بدَل الانبعاثِ بظاهرة زيمان العكسية.

وبعد اكتشافِ ظاهرة زيمان، اكتُشِفَت ظاهرةٌ أخرى مماثلةٌ تُعرفُ بظاهرة ستارك Stark effect . فمثلاً عندَ تهيجِ طيفِ الهيدروجين في مجالٍ كهربائيٍّ قويٍّ شدته ١٠٠ كيلو فولت/سم، فإنَّ كُلَّ خطٍّ ينقسمُ إلى نمطٍ معقدٍ متماثلٍ؛ ويمكنُ تفسيرُ كلا الظاهرتين: ستارك وزيمان تفسيراً كاملاً بالميكانيكا الكوانتية.

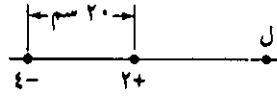
اقتراحات لقراءات إضافية

- R. P. Winch, *Electricity and Magnetism*, 2nd ed. (Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, Inc., 1963).
- C. L. Andrews, *Optics of the Electromagnetic Spectrum* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1960).
- R. S. Longhurst, *Geometrical and Physical Optics*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967).
- E. M. Pugh and E. W. Pugh, *Principles of Electricity and Magnetism* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co. 1960).

المسائل

١-١:٦ وضعت ثلاث شحنات كهربائية نقطية متماثلة «هـ» في قرْنٍ مثلثٍ متساوي الأضلاع: طولُ ضلعيه ٥ سم. احسب باستخدام قانون كولم القوة المؤثرة في كُلِّ شحنة.

٢-١:٦ وضعت شحنة كهربائية (-٤ وحدة) على بُعد ٢٠ سم إلى يسار شحنة أخرى (+٢ وحدة) - الشكل ٨، وَوُجِدَ أَنَّ شدة المجال الكهربائي عند النقطة ل هي صفر؛ فَجِدْ بُعْدَ النقطة ل عن الشحنة +٢ وحدة.



الشكل ٨

٣-١:٦ شحنتان نقطيتان: $+١٠ \times ٦^{-١٨}$ كولم، $+١٠ \times ٣^{-١٨}$ كولم وَضِعَتَا عَلَى بعد ١٠ سم من بعضهما بعضاً، جد القوة الكلية المؤثرة في إلكترون موضوع في مُنْتَصَفِ المسافة بين الشحنتين.

٤-١:٦ يحمل سلك طویل مستقیم تياراً ثابتاً شدته (١٠) أمبير؛ فباستخدام قانون بيوت - سافارت، عَيِّن: (أ) شدة المجال المغناطيسي (ب) والحث المغناطيسي الناشئين عن التيار من طول ١ سم منه وعلى نقطة تبعد ١٠ سم من السلك.

٥-١:٦ هُبِءَ مهتز كهربائي يُعْطِي أمواجاً تواترها ٠,٢٦ جيجا هرتز أمام عاكس فلزيّ مستوي كبير، وَوُجِدَ أَنَّ الأمواج الموقوفة المتكونة أمام العاكس لها عُقْدٌ كُلُّ ٥,٥ سم؛ فبإهمال معامل انكسار الهواء اخسب سرعة الضوء.

٦-١:٦ اكتب الصيغة التفاضلية لمعادلة ماكسويل الثالثة، ثم اشرح المعنى الفيزيائي لعناصرها.

٧-١:٦ تدور إلكترونات في مجال مغناطيسي منتظم، فجد قيمة الحث المغناطيسي B اللازمة لجعل الإلكترونات تعمل دورة واحدة كُلُّ $١٠^{-٨}$ ثانية. [استخدم معادلة القوة التي عُرِضَتْ في أثناء بحث ظاهرة زيمان وقانون نيوتن الثاني].

٨-١:٦ لقد رأينا أَنَّ ضغط الإشعاع الواقع على سطح ما يختلف تبعاً لكون السطح عاكساً أو ممتصاً؛ اعتبر أنك تستخدم ضوءاً مستقطباً دائرياً يُعْطِي السطح زخماً زاوياً؛ فماذا يَحْدُثُ عندما يكون السطح عاكساً أو أسوداً؟

٩-١:٦ تَسْقُطُ حَزْمَةٌ ضَوْئِيَّةٌ مُتَوَازِيَةٌ كَثَافَةُ طَاقَتِهَا الإِشْعَاعِيَّةِ $W = ١٠ \times ٦,٤$ جول / م^٢ على مرآةٍ مُستوية ؛ جد : (أ) الزخم المؤثر في المرآة (ب) القوة الواقعة عليها خلال ٥ ثوانٍ.

١٠-١:٦ تَبْلُغُ القُدْرَةُ الكُلِيَّةُ الَّتِي تَبْعَثُ بِهَا الشَّمْسُ $٢٦١٠ \times ٣,٩$ جول / ثانية : (أ) جد القدرة الساقطة على المتر المربع خارج الغلاف الغازي للأرض مباشرةً مفترضاً مسافةً تبلغ ١٥٠ مليون كيلومتر من الشمس (ب) جد القيمة القصوى لشدة المجال المغناطيسي في الضوء المُسْتَقْبَل.

الفصل ٦ : ٢

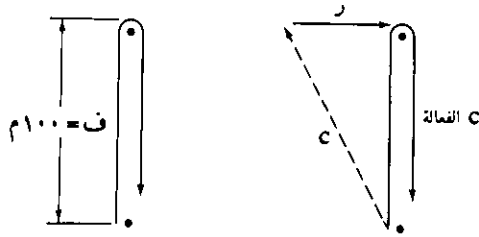
البصريات النسبوية

Relativistic Optics

تُعنى البصريات النسبوية بالظواهر التي تحدث عندما يكون المصدر أو المشاهد أو أي عنصر في المنظومة البصرية أو أية مجموعة منها يتحرك بسرعة عالية. فعلى سبيل المثال لا ينطبق قانون الانعكاس الاعتياديان على الضوء المنعكس عن مرآة متحركة، مثلهما في ذلك مثل قوانين قياس التداخل وقياس الإشعاع والمطيافية الذرية وغير ذلك من قوانين البصريات.

تجربة ميكلسون - مورلي Michelson - Morley Experiment

تُعْتَبَرُ تجربة ميكلسون - مورلي أحد الأمثلة الكلاسيكية على البصريات النسبوية؛ ويمكن فهمها بأفضل صورة باعتبار مثال قارب التجديف. افترض أن رجلاً طُلب منه أن يجتد قارباً مسافة ١٠٠ م في الماء الساكن وأن يعود به بعد ذلك (الشكل ١ إلى اليسار). فإذا كانت سرعته تبلغ ٢ م/ث، فإن الزمن الذي يستغرقه في التجديف ذهاباً وعودة هو:-



الشكل ١ : مماثلة قارب التجديف لتجربة ميكلسون - مورلي .

$$[١-٢:٦] \quad z = \frac{f}{c} \cdot 2 = \left(\frac{100}{\text{م}^2/\text{ث}} \right) \cdot 2 = 100 \text{ ثانية} \dots\dots$$

افترض بعد ذلك أنَّ على الرجل أن يجذِّف القارب ليقطع الماء الذي يجري في اتجاه الشرق بسرعة $r = 1 \text{ م/ث}$ (الشكل ١ الى اليمين)؛ فلكي يصل إلى نقطة البداية فلا بدَّ له من أن يوجه القارب في الاتجاه المشار إليه بالخط المتقطع، وستكون السرعة الفعالة التي يخترق بها النهر أقلَّ من سرعته الفعلية، إذ تساوي فعلاً:

$$c_{\text{الفعالة}} = \sqrt{c^2 - r^2} = 1,73 \text{ م/ث}$$

أما الزمن الذي يستغرقه ذهاباً وعودة فهو:-

$$[٢-٢:٦] \quad z_{\perp} = \left(\frac{100}{1,73 \text{ م/ث}} \right) \cdot 2 = 116 \text{ ثانية} \dots\dots$$

وأخيراً، افترض أنَّ على الرجل أن يجذِّف باتجاه جريان النهر أولاً مع التيار وثانياً ضده؛ وقد يظنُّ المرء أنَّ الزمن الذي يُكسَبُ في التجديف مع التيار يُخسَرُ في التجديف ضدَّ التيار، بحيث يكون الزمن الكلي الذي تستغرقه الرحلة مساوياً زمن الرحلة في الماء الساكن تماماً. لكن:-

$$\text{الزمن الكلي } z_{||} = \text{الزمن مع التيار} \left(\frac{f}{r+c} \right) + \text{الزمن ضد التيار} \left(\frac{f}{r-c} \right)$$

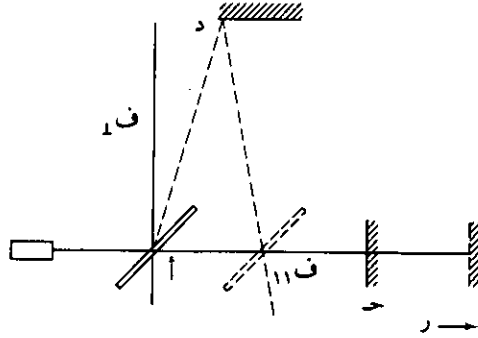
$$= \frac{100}{\text{م/ث}(1+2)} + \frac{100}{\text{م/ث}(1-2)}$$

$$[٣-٢:٦] \quad = 33 \text{ ثانية} + 100 \text{ ثانية} \dots\dots$$

$$= 133 \text{ ثانية}$$

ويستفاد مما سبق أنَّ زمن التجديف في اتجاه مواز للتيار يستغرق وقتاً أطول من التجديف عبره؛ وبدقة أكثر فالزيادة في زمن التجديف مقارنةً بزمن التجديف في الماء الساكن تبلغ تقريباً في حالة التجديف باتجاه التيار ضعف قيمتها عند التجديف عبر التيار.

افترض في تجربة ميكلسون - مورلي أنَّ ذراعَيْ مقياسٍ تداخلٍ ميكلسون متساويان في الطول . ولو كانت الأرض ساكنةً، لاستغرق الضوءُ زمناً واحداً في قَطْعِ الذراعين؛ غَيْرَ أنَّ الأرض والمقياسَ عليها يتحركان ولذلك فإنَّ الزمنَ الذي يستغرقه الضوءُ في قَطْعِ الذراعين يتغيرُ ولا يَظَلُّ واحداً، تماماً كما في ممائلةٍ قاربِ التجديف . وتشيرُ الخطوطُ المتصلةُ في الشكل ٢ إلى وَضْعِ مقياسِ التداخلِ لحظةَ سُقوطِ الضوءِ على الشاطِرِ الشعاعيِّ أ؛ أما



الشكل ٢: تجربة ميكلسون - مورلي

الخطوطُ المتقطعةُ فتشيرُ إلى وَضْعِ كُلِّ من النقطةِ أ والمرايا عندما يصلُ الضوءُ المنعكسُ من المراةِ د النقطةِ أ مرةً أخرى . وكما هو الحالُ في ممائلةٍ القاربِ فإنَّ الزمنَ الذي يستغرقه الضوءُ لإتمامِ رحلةٍ كاملةٍ على الذراعِ الجنوبيِّ - الشماليِّ هو:-

$$[٤-٢:٦] \quad z = \frac{2F_{\perp}}{\sqrt{v_r^2 - v_c^2}} \dots\dots$$

أما الزمنُ المستغرقُ في رحلةٍ كاملةٍ على المسارِ الغربيِّ - الشرقيِّ فهو:-

$$[٥-٢:٦] \quad z = \frac{2F_{\parallel}}{v_r - v_c} + \frac{2F_{\parallel}}{v_r + v_c} \dots\dots$$

ولأنَّ المنظومةَ تتحركُ في الاتجاهِ الغربيِّ - الشرقيِّ، فإنَّ كلا المسارينِ قد ازدادَ طولاً تماماً كما في ممائلةٍ قاربِ التجديف . وقد استخدَمَ ميكلسون و مورلي ٥ في تجربتهما الانعكاساتِ

٥ ألبرت ميكلسون: كَانَ وقتَ إجراء التجربة أستاذَ الفيزياء في كلية كينس Case للعلوم التطبيقية في كليفلاند. ادوارد مورلي (١٨٣٨-١٩٣٤): أستاذُ الكيمياء في جامعة وشترن ريزيرف في كليفلاند أيضاً. أ. ميكلسون وأ. مورلي: «حول الحركة النسبية للأرض والاثير المضيء» المجلة الفلسفية

Phil. Mag. (٥) ٢٤ (١٨٨٧)، ٤٤٩-٤٦٣.

المتعددة عن المرايا وذلك لزيادة طول المسار إلى ١١ م؛ وقد ثبتت مقياس التداخل على قطعة كبيرة من الإسمنت الطافية في بركة زئبق. وشهدت الأهداب عند إدارة الجهاز ٩٠؛ الأمر الذي تسبب في جعل الذراعين متوازيين أو عموديين بالتعاقب على اتجاه حركة الأرض.

وبصورة عامة فإن عدد الأهداب N التي تمرّ بعلامة مرجعية في مقياس تداخل ميكلسون هو النسبة بين فارق المسار Γ والطول الموجي λ ؛ وعلاوة على ذلك فإن $\Gamma = \Delta c \cdot z$. ولأن المسارين $\perp$ ، $\parallel$ يتبادلان، فإن زمن الإبطاء الكلي هو ضعف الزمن بين المسارين؛ ولذلك فإن:-

$$[6-2:6] \quad \dots \frac{2Fz}{\lambda^2 c} = \frac{(2Fz)(c)}{\lambda^3 c} = \frac{\Delta c \cdot z}{\lambda} = N$$

ومن ثم، فعندما تكون $F = 11$ م، λ لضوء الصوديوم ≈ 590 نم، وسرعة الأرض المدارية حول الشمس $R = 30$ كم/ث، فإن الإزاحة الهدبية المتوقعة هي:-

$$[7-2:6] \quad \dots 0,37 = \frac{(2)(11)(3 \times 10^8 \text{ م/ث})}{[3 \times 10^8 - 10^5,9]^2} = N$$

وقد كان من السهل مشاهدة هذه الإزاحة؛ ولكن لم تشاهد أية إزاحة. وقد أعاد جوز Joos الذي كان يعمل في شركة زائس بألمانيا فيما بعد تجربة ميكلسون - موري بحرص غير عادي، كذلك أعيدت أيضاً في عام ١٩٥٨ باستخدام ميزر الأمونيا الجديد آنذاك؛ وفي كل مرة أعيدت فيها التجربة، كانت النتيجة واحدة.

وجاءت النتيجة الصفرية (أي لا إزاحة هُديبة) * لتجربة ميكلسون - موري مفاجأة تامة؛ إذ ناقضت النظرية التي كانت مقبولة آنذاك وهي أن الأمواج الكهرومغناطيسية يلزمها

*G. Joos, "Die Jenaer Wiederholung des Michelsonversuchs," *Ann. Physik* 7 (1930), 385-407.

†J. P. Cedarholm, G. F. Bland, B. L. Havens, and C. H. Townes, "New Experimental Test of Special Relativity," *Phys. Rev. Lett.* 1 (1958), 342-43.

* نتجنب هنا استخدام لفظ النتيجة السالبة التي يبدو أنها تشير إلى نتيجة غير حاسمة أو غير صحيحة.

وَسَطَ للانتقال في الخلاء، وَقَدْ سمي هذا الوسط الأثير المضيء* الذي افترض أنه مادة منتشرة في كُلِّ أنحاء الخلاء. وقد أجريت الحسابات العديدة لتحديد خصائصه، وقام ماكسويل ببعضها. وبعد تأمل طويل للنتيجة اقترح فتزجيرالد Fitzgerald + عام ١٨٩٢ أن أحد ذراعي مقياس التداخل قد تقلص قليلاً في اتجاه حركة الأرض، وقام لورنتز Lorentz † عام ١٨٩٥ منطلقاً من اقتراح فتزجيرالد بإجراء الحسابات الرياضية اللازمة. ولأن:-

$$\frac{\frac{f_{\perp}}{(\frac{v}{c})^2 - 1}}{\frac{v}{c}} = \frac{f_{\perp} \sqrt{c^2 - v^2}}{c}$$

$$؛ \quad \frac{\frac{f_{\parallel}}{(\frac{v}{c})^2 - 1}}{\frac{v}{c}} = \frac{f_{\parallel} \sqrt{c^2 - v^2}}{c}$$

فإن الفارق الزمني يكون:-

$$\Delta z = \frac{v}{c} \left[\frac{f_{\perp}}{(\frac{v}{c})^2 - 1} - \frac{f_{\parallel}}{(\frac{v}{c})^2 - 1} \right] \dots\dots [٦: ٢-٨]$$

ولكي نجعل الزمن Δz صفراً، فلا بُدَّ أن يُجعل الذراع الغربي - الشرقي على النحو التالي:-

* خلافاً لمادة الاثير «الاثير الأثيري» ونظراً لسرعة الضوء العالية، فإن الاثير لا بد من ان يكون صلباً جداً أكثر من الفولاذ؛ ومن جهة أخرى فإن كثافته ينبغي ان تكون صغيرة إلى درجة يمكن اهمالها، وهولا يبدي اية مقاومة لحركة الكواكب.

جورج فرانسيس فتزجيرالد (١٨٥١-١٩٠١) : الفيزيائي الارلندي.

† هندريك انطون لورنتز (١٨٥٣-١٩٢٨): الفيزيائي الهولندي، استاذ الفيزياء النظرية في جامعة. ليدن، حصل على جائزة نوبل عام ١٩٠٢.

H. A. Lorentz, "De relative beweging van de aarde en dem aether," *Versl. gewone Vergad. Akad. Amst.* 1 (1892), 74.

ف_{١١} ← ف_{١١} $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$ ؛ أي أن بُعد مقياس التداخل في اتجاه حركة

الأرض يتقلص بمقدار العامل $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$. وتُعرف هذه النظرية بتقلص
فتزجيرالد-لورنتز Fitzgerald-Lorentz Contraction.

النظرية النسبية الخاصة

تحويل لورنتز Lorentz transformation

يوجد هنالك عدة تحويلات، إضافة إلى التغير النسبي في الطول، نمر عليها مراً
سريعاً. فبينما ينص تحويل جاليلو فيما يتعلق بالحركة في الاتجاه السيني الموجب أن
الإحداثيات المكانية تتغير على النحو التالي:-

$$\begin{aligned} s - s' &= v t \\ s &= v t + s' \\ s &= v t + s' \end{aligned}$$

[٩-٢:٦]

.....

ع = ع

، نجد في تحويل لورنتز أن:-

[١٠-٢:٦]

$$s - s' = v t \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

ص = ص

ع = ع

أي أن التغير النسبي في الطول هو:-

[١١-٢:٦]

$$L = L' \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

في حين أنَّ التغير النسبوي للكتلة هو:-

$$[١٢-٢:٦] \quad \dots\dots \quad \text{ك.ر} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

ولفظُ «الكتلة النسبوية» قليلُ المعنى؛ ذلكَ لأنَّه لا يمكنُ قياسُ الكتلةِ إلَّا وهيَ في سكونٍ (نسبيّ). فإذا كانَ الجسمُ متحركاً، فإننا نتعاملُ معَ الزخمِ الذي يُضْبَحُ عندَ السرعةِ النسبويةِ على النحوِ التالي:-

$$\text{ي.ر} = \text{ك.ر} \cdot v = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

أما تمدُّ الزمن الذي يتسبَّبُ في إبطاءِ الساعةِ المتحركةِ فيُعْطى على النحوِ التالي:-

$$[١٣-٢:٦] \quad \dots\dots \quad \Delta z = \Delta z' \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

فرضاً أينشتين Einstein's postulates

بنى أينشتين نظريته في النسبية الخاصة على قرصين هما:

• البرت أينشتين (١٨٧٩-١٩٥٥): أَلْفِيزِيَانِي الألماني المولد، فاحص البراءات (١٩٠٢-١٩٠٩) في المكتب الفيدرالي السويسري للبراءات، والاستاذ في جامعتي زوريخ وبراغ ومعهد البولتكنيك السويسري واكاديمية العلوم البروسية في ألمانيا. ان البحث الاساسي الذي وضع اساس النظرية النسبية الخاصة هو:

Einstein, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper," *Ann. Physik* 17 (1905), 891-921.

وبروايته هو. فان اينشتين لم يعلم بتجربة ميكلسون - مورلي الا بعد نشره هذا البحث. وقد بدأ العمل في نظريته في عمر ١٦ سنة، وعمل فيها بين الحين والآخر من ٧ إلى ١٠ سنوات؛ وفي عام ١٩٣٣ قدم اينشتين للعمل في المعهد الذي انشأ حديثاً: معهد الدراسات المتقدمة في برنستون - نيوجرسي، وبقي فيه طوال حياته.

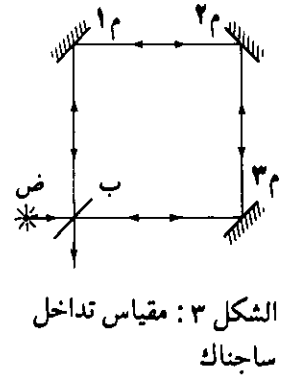
١. مبدأ التكافؤ الذي يعني أن قوانين الفيزياء لا تتغير في جميع الأطر المرجعية القصورية؛ ولذا فمن غير الممكن الكشف عن حركة الأجسام المطلقة في المكان، وإنما يُمكن الكشف فقط عن الحركات النسبية لجسم بالنسبة إلى جسم آخر.

٢. ثبات سرعة الضوء التي هي واحدة في الخلاء التام في جميع الأطر المرجعية القصورية، فسرعة الضوء دائماً هي c بغض النظر عن سرعة المصدر الضوئي.

فإذا ما أُطلقت قذيفة من شاحنة متحركة، فإن سرعة القذيفة تختلف تبعاً لاتجاه إطلاق القذيفة: في اتجاه حركة الشاحنة أو ضدها. أما الأمر فهو مختلف بالنسبة إلى الضوء. ورغم المحاولات العديدة والتجارب المجرأة لإثبات نظرية المقذوفات، فلم يتوافر الدليل التجريبي المباشر المؤيد للفرض الثاني إلا منذ سنوات قريبة فقط.

تجارب ساجناك وميكلسون - جيل Sagnac and Michelson - Gale experiments

نُغنى هنا بالفوارق في زمن مرور الضوء التي تحدث عند الدوران والتي تُشبه بغض الشيء تجربة ميكلسون - مورلي. وفي مقياس تداخل ساجناك (الشكل ٣)، يُضيء مُصدر ضوئي (ض) شاطر الأشعة ب؛ وهناك ينقسم الضوء إلى جزئين: أحدهما يسير باتجاه عقارب الساعة والآخر ضدها، ثم يتضام الجزءان عند ب، وتُشاهد الأهداب من تلسكوب كما في مقياس تداخل ميكلسون.



ويثبت مقياس التداخل على دُعامة صلبة يمكن إدارتها حول محور رأسي. ويتسبب الدوران في فارق في الزمن الذي يلزم للحزمتين لكي تسيرا في دائرة. ويتبدو أن الضوء الذي يدور في اتجاه الدوران ينتقل في مسار أطول، بينما يسير الضوء الدائر في اتجاه معاكس في مسار أقصر؛ وتكون النتيجة إزاحة هدية تتناسب مع السرعة الزاوية. ويكون فارق المسارين الحزمتين هو:-

†A. A. Michelson, "Effect of Reflection from a Moving Mirror on the Velocity of Light," *Astrophys. J.* 37, (1913), 190-93. G. C. Babcock and T. G. Bergman, "Determination of the Constancy of the Speed of Light," *J. Opt. Soc. Am.* 54, (1964), 147-51. P. Beckmann and P. Mandies, "Test of the Constancy of the Velocity of Electromagnetic Radiation in High Vacuum," *Radio Science, J. Res. NBS* 69D, (1965), 623-28.

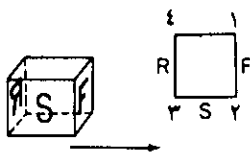
[١٤:٢:٦]

$$\Gamma \approx \frac{1}{\omega} \dots$$

حيث ω هي مساحة الدائرة و ω هي السرعة الزاوية .

وفي تجربة ميكلسون - جيل ، تقوم الأرض في مكان الدعامية الدائرة . ولقد شاهد ساجناك إزاحة هدية باستخدام مسار ضوئي حول مربع مساحته ١ م^٢ وسرعة دورانه الزاوية $\omega = ١٢٠$ دورة في الدقيقة . وحتى يمكن كشف سرعة زاوية أقل ، يلزم مسار أكبر؛ ولذا استخدم ميكلسون وجيل ٥ أنبوباً مفرغاً جزئياً يَحْضُرُ مساحةً بُعْداها ٣٤٠ × ٦١٠ م قُرب مطار أوهر في شيكاغو . ويستخدم نفس المبدأ الآن في الجيروسكوب الليزري gyroscope laser الذي صمم للكشف عن الحركات الدورانية الصغيرة؛ إذ يغادر شعاعان ضوئيان في اتجاهين متعاكسين في مسار دائريٍّ أُرْباعيٍّ ، ثم يَسْقُطان على كاشف مشترك . فإذا ما أُديرَ الجهاز ارتفع تواتر أحد الشعاعين وانخفض تواتر الآخر . ولا تحتوي بعض الجيروسكوبات على أجزاء آلية ، ومن ثم فهي لا تتأثر بالاهتزازات الخطية والتسارعات .

دوران تيرل Terrel rotation



وبالإضافة إلى تقلص فترجيرالد - لورنتز الذي يحدث في اتجاه الحركة ، تُشاهد هناك ظاهرة أخرى تعرف بدوران تيرل . تَحَيَّلُ مكعباً مصنوعاً من بلاستيكٍ شفافٍ يتحرك إلى اليمين كما في الشكل ٤ ؛ وَيُشارُ إلى الحواف الرأسية للمكعب بالأرقام ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، كما يُشارُ إلى الأوجه : الامامي ، الجانبي ، والخلفي بالحروف F ، S ، R . افترض أنَّ طول المكعب ل . وَسُرْعَتُهُ ر ، وَافترض كذلك أنَّ مُشَاهِدًا يَنْظُرُ إلى المكعب من الجانب من زاوية ٩٠ . كأنه يشاهد الحرف S من مالا نهاية (الشكل ٥ إلى اليسار) .

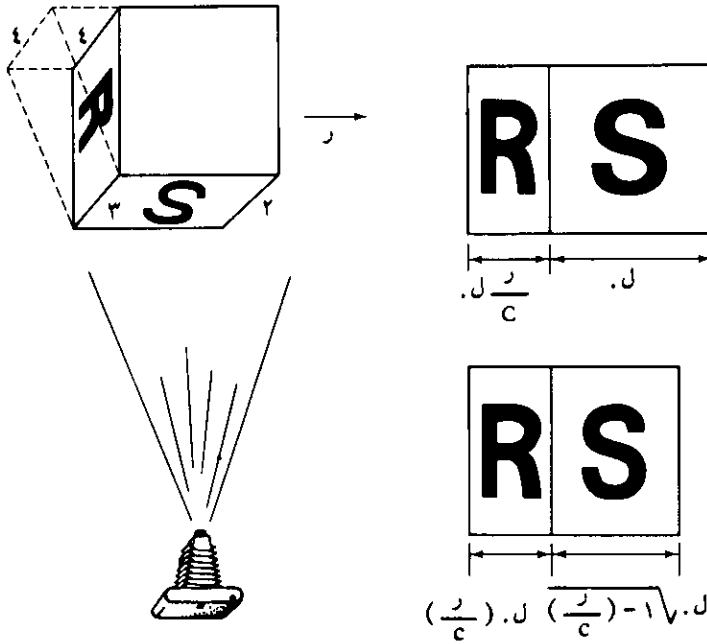
الشكل ٤ : مكعب شفاف
حيث تُرى الحروف F - S - R
رؤيةً منظوريةً (إلى اليسار)
ومن الأعلى (إلى اليمين) .

فإذا كان المكعب ساكناً أو يتحرك بسرعة بطيئة ، فإنَّ الوجه S يبدو مثل مربع تامٍّ ؛ أما الوجه الخلفي R بيّن الحافتين ٣ و ٤ فلا يمكن رؤيته . وإذا ما تحرك المكعب بسرعة عالية ، فإنَّ الوجه الخلفي يَظْهَرُ لأنَّ الضوء من الحافة ٤ كان قد انبعث قَبْلَ ذلك أي عندما كان ذلك الطرف في الموضع ٤ . فالفوتونات التي تُكوِّنُ الصورة تصلُ في آنٍ واحدٍ إلى الشبكية

†J. Terrell, "Invisibility of the Lorentz contraction," *Phys. Rev.* 116, (1959), 1041-45. J. F. Weisskopf, "The Visual Appearance of Rapidly Moving Objects," *Physics Today* 13, (Sep 1960), 24-7.

(ويمكنُ تصوُّرُ سببِ ذلك بسهولةٍ إذا ما تصورنا كاميرا ذاتِ غالقٍ عالي السرعةِ بدَلَ العينِ)؛
 غَيْرَ أنَّ شرطَ الحصولِ على وصولٍ متزامنٍ يَمْتَنِعُ بوضوحِ الانبعاثِ الآنيِّ المتزامنِ للفوتوناتِ .
 وَلَمَّا كانتِ الحافةُ ٤ أبعدَ عن العينِ من الحافةِ ٣ ، فإنَّ الفوتوناتِ من ٤ يَتَّبِعِي أنْ تَبْعَثَ
 من ٤ ؛ ولأنَّ المسافةَ ٤ تساوي $(\frac{c}{v})L$ ، فإنَّ الوجهَ الخلفيَّ للمكعبِ المتحركِ يبدو
 للمشاهدِ كمستطيلٍ ارتفاعه L . وَعَرَضُهُ $(\frac{c}{v})L$. (الشكل ٥ - الرسم إلى الأعلى جهةَ
 اليمين). وعلاوةً على ذلك، فإنَّ الوجهَ الجانبيَّ ، وليس الوجهَ الأماميَّ أو الخلفيَّ يَخْضَعُ
 لتقلصٍ لورنتز؛ ولذلك، فإنَّ الطولَ الظاهريَّ الكليَّ للمكعبِ المتحركِ بسرعةٍ ر يكونُ :-

$$L_r = L + L(\frac{v}{c}) = L \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2} \dots\dots [١٥-٢:٦]$$



الشكل ٥ : يتحرك المكعب إلى اليمين بسرعة R وينظر المشاهد إلى الوجه الجانبي S .

وفي حالة السكون $r = .$ ، وعندما تكون السرعة $r = c$ (سرعة الضوء) ، فإنَّ الطولَ الظاهريَّ الكليَّ للمكعبِ هو $l . .$. وعندَّ السرعة المتوسطة يكونُ الطولُ الظاهريُّ أكبرَ من $l . .$. ولكيَّ نجدَ السرعةَ التي تَحْدُثُ عندها الاستطالة القصوى ، نُفاضِلُ المعادلةَ [١٥-٢:٦] بالنسبة إلى السرعة :-

$$\text{ص} = \left(\frac{l}{c} + r \right) \sqrt{\frac{r}{r^2} - \frac{c}{c^2}} \quad [١٦-٢:٦]$$

$$\dots \dots \sqrt{\frac{l}{c} + r} = \dots \dots$$

فتُخَصَّلَ على :-

$$\text{دص} = \frac{l}{c} + \frac{(r^2 - c^2)}{c^2} \dots \dots [١٧-٢:٦]$$

ثم نَضَعُ الطرفَ الأيسرَ للمعادلة الأخيرة مساوياً صفراً :

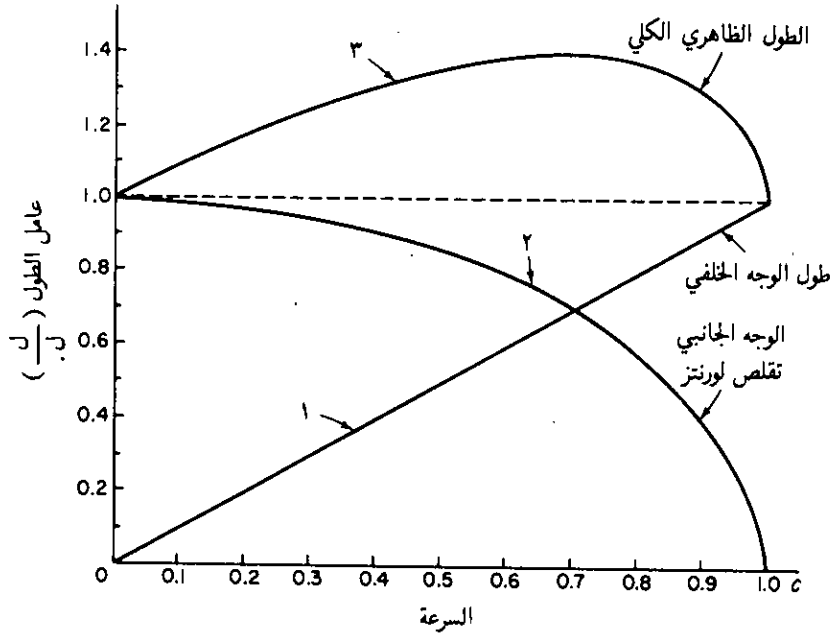
$$\text{صفر} = \frac{l}{c} - \frac{r^2}{c^2} \dots \dots [١٨-٢:٦]$$

$$\dots \dots c = \frac{r}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{c^2}}} = r ; \dots \dots [١٩-٢:٦]$$

والمشتقة الثانية هي :-

$$\text{د}^2 \text{ص} = \frac{l}{c} - \frac{r^2}{c^2} \dots \dots [٢٠-٢:٦]$$

وتظهرُ هذه المشتقة أنَّ هنالك حقاً نهايةً عظمى عندَّ السرعة المحددة سابقاً . وَ يُوضَّحُ الشكلُ



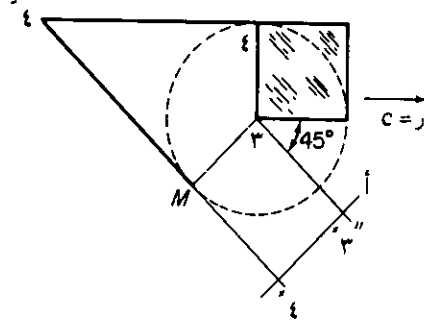
الشكل ٦ : أَلطول الظاهري لمكعب طوله L . وَيتحرك بسرعة R كما يُرى من زاوية ٩٠° . (١) يمثل العرض الظاهري للوجه الخلفي بدلالة R ؛ (٢) يمثل طول الوجه الجانبي الذي يعاني من تقلص لورنتز، و (٣) يمثل الطول الظاهري الكلي للمكعب .

٦ هذه العلاقة بيانها ؛ ولذلك ، فإنَّ تقلص لورنتز المتوقَّع لجِسْمٍ مجسِّمٍ مُتَحَرِّكٍ يُلغى فعلياً ، وهو يُعَوَّضُ تعويضاً زائداً بِدورانٍ يَرْلُ .

افتراض بعد ذلك أنَّ الجِسْمَ يُشَاهَدُ من زاوية $\theta = ٤٥^\circ$ كما يُبيِّنُ ذلك الشكل ٧ ؛ فالضوءُ المُسَهَّمُ في الصورة ينبغي أن يمرَّ بالنقاطِ المتماثلةِ في المستوى أ في الوقتِ المناسب .

ويعني هذا ، مرةً أخرى ، أنَّ الضوءَ الآتِيَّ من ٤ ينبغي أن يكونَ قد غادرَ قَبْلَ الضوءِ الآتِيَّ من ٣ . وَيُظْهِرُ الرَّسْمُ في الشكلِ كيفَ توجَدُ الحافةُ ٤ . ويمكنُ رسمُ أشكالٍ متماثلةٍ للزوايا الأخرى ، وهي تبينُ أنَّ المشاهدَ سَيَرى الوجهَ الخلفيَّ كمربَّعٍ كاملٍ طالما $c = R$.

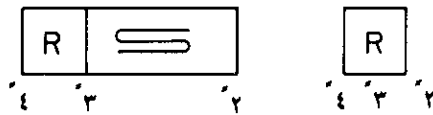
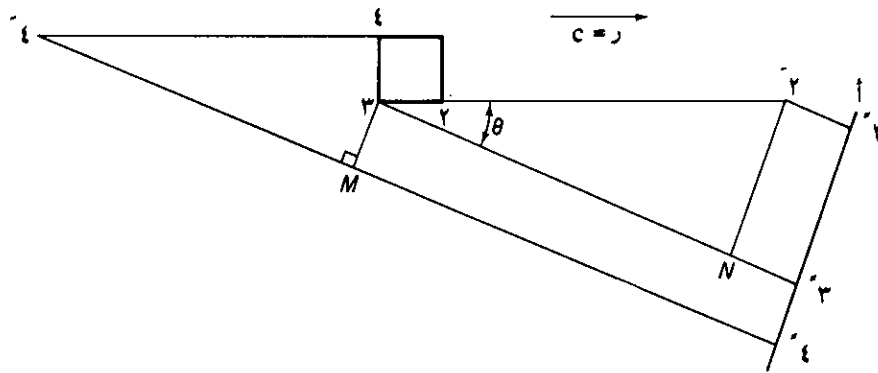
وأخيراً ، اعتبر الضوءَ المنبعثَ من الحافةِ ٢ ؛ ولأنَّ الحافةَ (٢) أَقْرَبُ إلى المستوى المرجعيِّ أ من الحافةِ ٣ فإنَّ الضوءَ القادمَ من ٢ (لَكِنِّي يصلُ في نَفْسِ الوقتِ) يَنْبَغِي أن يكونَ قد غادرَ



الشكل ٧: مكعب يتحرك بسرعة الضوء ويرى من اتجاه ٤٥°. النقطتان ٣، ٤ تُشيران إلى نقطتي تقاطع الضوء القادم من الحافتين ٣، ٤ مع المستوى أ.

٢ بعد الضوء الآتي من ٣. وفي الحقيقة فإن الضوء غادر عندما كان المكعب قد تحرك قبل ذلك إلى الموضع الجديد ٢. الذي هو أبعد إلى اليمين كما في الشكل ٨. ويُعَيَّن موقع ٢ من العلاقة $2 - 2 = 3 - N$ ؛ ولذلك، فإن الحافة ٣ ستُرى بين ٤، ٢. وستكون الحافة ٢ بعيدة إلى يمين ٣، وسيبدو المكعب مستطيلاً في اتجاه الحركة على الأقل في العالم غير النسبوي (الرسم السفلي إلى اليسار). أما في العالم النسبوي فالوضع مختلف. فإذا كانت $c = r$ ، فإن الطول في اتجاه الحركة يُختزل إلى الصفر، وتنطبق الحافتان ٣ و ٢ ولا تُرى S. ولكن لما كان الوجه الخلفي لا يُخضع لتقلص لورنتز فسَيبدو مثل مربع كامل (الرسم السفلي في الوسط). وباختصار يبدو الجسم كما لو عانى تقريباً نوعاً من الدوران بمقدار $(\theta - 180^\circ)$.

وبنفس المنطق، يمكن تبيان أن الوجه الأمامي سينقلب وأن الحرف F سيظهر مثل ٦، وذلك عند تجاوز سرعة حرجة معينة وعند النظر إليه من زوايا معينة. وعند السرعة البطيئة، وعند النظر في اتجاه θ ، فإن الوجه الأمامي سيبدو مثل وجهه العادي F، وسينقلب الحرف R في الوجه الخلفي مثل ٨. ولسرعة أعلى من $c = r$ جتا θ ، سينقلب الوجه الأمامي F مثل ٦، وستُرى الحرف R بصورة صحيحة. ومرة أخرى، فإن ظاهرة دوران تيرن تجعل الجسم الذي يتحرك بسرعة عالية يبدو مختلفاً عما يُتوقع عادة من تقلص فيتزجيرالد - لورنتز.



الشكل ٨: المكعب يتحرك بسرعة $c = v$ ؛ النقاط ٢، ٣، ٤ تبين مواقع الحواف ٢ - ٣ - ٤ كما يراها المشاهد. الرسمان المدرجان في الاسفل يبينان الصورة كما ترى في العالم غير النسبوي (الى اليسار) وفي العالم النسبوي (الوسط). [اعيد رسمه باذن من ف. و. ويسكوف V. Weisskopf، مجلة الفيزياء اليوم Physics Today، ص ٢٥، ايلول ١٩٦٠].

اعتبارات الشدة Intensity considerations

عندما يُصدرُ مصدرُ الضوءَ بانتظامٍ في الاتجاهاتِ جميعها، فإنَّ نصفَ الضوءِ يتجهُ إلى الأمامِ ويُحصَرُ بزَاوِيَةٍ $\theta = 90^\circ$ ؛ حيث θ هي الزَاوِيَةُ بَيْنَ المحوَرِ أو اتجاهِ الحركةِ والضوءِ. أما لِمَصْدَرٍ متحركٍ * فإنَّ:-

$$\text{جا } \theta_r = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \dots\dots [١:٦-٢١]$$

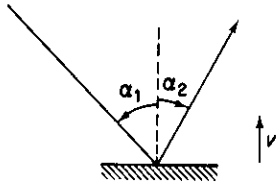
ولذلك فعندما يتحركُ المصدرُ بسرعةٍ أعلى، تصغرُ زَاوِيَةُ θ_r ، ويظهرُ الضوءُ المُستَقْبَلُ

* بحسب ما يقوله ح. ه. سميث: «مقدمة الى النظرية النسبية الخاصة» (نيويورك: و. أ.

بنجامين، ١٩٦٥)، ص ٨٣.

* J. H. Smith, *Introduction to Special Relativity* (New York: W. A. Benjamin,

Inc., 1965), 83.



الشكل ٩: عند تحريك المرآة نحو المصدر تصبح زاوية الانعكاس أقل أي $\alpha_2 < \alpha_1$.

أكثر شدة؛ وتعرف هذه الظاهرة بظاهرة الضوء الأمامي headlight effect. ولو تحرك المصدر الضوئي نحو المشاهد بسرعة الضوء لظهر الضوء ذا شدة غير متناهية.

وثمة حالة خاصة للضوء الذي ينبعث من مصدر متحرك تُعرف بإشعاع سيرنكوف Cerenkov radiation، حيث ينبعث الضوء من دقائق تتحرك سريعاً في الوسط بسرعة أعلى من السرعة الطورية للضوء في ذلك الوسط؛ وتكون النتيجة عبارة عن متسلسلة من الجبهات الموجية المخروطية لا تختلف عن موجات الصدمة التي تنتجها مقذوفة تتحرك في غار بسرعة أعلى من سرعة الصوت.

انعكاس الضوء عن مرآة متحركة

إذا تحركت مرآة في اتجاه يماس سطحها، فلا يلاحظ أي تغير؛ أما إذا تحركت في اتجاه عمودي على سطحها، فإن عدة بارامترات تتغير من بينها زاوية الانعكاس. ومن الواضح عند سقوط الضوء على مرآة ساكنة أن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس؛ ومع ذلك فإذا تحركت المرآة نحو المصدر فإن زاوية الانعكاس في الإطار المرجعي للمشاهد لا تعود تساوي زاوية السقوط عند السرعة صفر (أي والمرآة ساكنة)، وإنما تصبح أصغر (الشكل ٩). فإذا كانت α_1 هي زاوية السقوط، α_2 زاوية الانعكاس، و v سرعة المرآة نحو المصدر، فنستنتج من تقلص لورنتز أن:-

[٢٢-٢:٦]

.....

$$\frac{\cos \alpha_2}{\frac{v}{c} - \cos \alpha_1} = \frac{\cos \alpha_1}{\frac{v}{c} + \cos \alpha_2}$$

وإذا كانت $v = 0$ ، فإن:-

$$\cos \alpha_2 = \cos \alpha_1$$

ولهذه المعادلة حل واحد هو $\alpha_2 = \alpha_1$

وهو قانون الانعكاس في عالم غير نسبي.

ولكن إذا كانت $c = r$ وكانت $\alpha = 5^\circ$ مثلاً، فإن :-

$$\frac{\sin \alpha}{1 - \sin \alpha} = \frac{0,707}{1 + 0,707}$$

أي :

$$\sin \alpha = 0,413 \quad \text{جنا} \quad \sin \alpha = 0,413$$

$$\alpha = \text{صفر} \dots\dots [6:2-23]$$

وباختصارٍ فبازدياد $\frac{r}{c}$ من الصفر إلى ١+ ، تتغير زاوية الانعكاس من قيمتها عند السرعة الصفرية إلى 90° ؛ وبابتعاد المرآة عن المصدر، تكبر زاوية الانعكاس، وتصبح أكبر من زاوية السقوط تبعاً لسرعة المرآة.

ونشيرُ هنا مروراً إلى أنَّ النتائجَ نفسها يمكنُ استخلاصُها بإنشاء الجبهاتِ الموجية ؛ فإذا اقتربت جبهةٌ موجيةٌ ضوئيةٌ مائلةٌ بزاوية حادة من المرآة ، فإنَّ أجزاءً مختلفةً مِنْهَا تصلُ سطحَ المرآة في أوقاتٍ مختلفةٍ ، الأمرُ الذي يجعلُ المرآة تبدو مائلةً بالنسبة إلى وضعِها الحقيقي ، ولذلك يُفسَّرُ الانعكاسُ عن المرآة الوهمية المتكونة عَدَمَ التساوي النسبويِّ بين زاويتي السقوط والانعكاس .

ويتبعُ من المعادلة [6:2-21] وكذلك من الرسم الهندسي أنَّ زاوية الانعكاسِ قد تتجاوزُ حتَّى قيمة 90° .

مثال ١

ما السرعة اللازمة لمشاهدة الظاهرة فعلاً ؟

اعتبر قمرًا صناعيًا يدورُ حولَ الأرضِ بسرعة $28,000$ كم / الساعة = $7,8$ كم / الثانية ، فإذا سقط ضوءٌ على مرآةٍ مثبتةٍ أمامَ القمرِ على زاوية سقوطٍ مقدارها 5° ، فبأيِّ مقدارٍ تكونُ زاوية الانعكاسِ أصغر؟

الحل

جا α = جتا α = ٠,٧٠٧١١ ؛ إنَّ الفارقَ الزاويَّ «١ دقيقة» يُعطي :
 جا α = ٠,٧٠٧٣١ ؛ جتا α = ٠,٧٠٦٩٠ ؛ وبذلك فإنَّ
 جتا $\alpha \Delta \approx$ جتا $\alpha \Delta$ = ٠,٠٠٠٢٠ $\approx$ ٠,٠٠٢٠ = ١٠ × ٢^{-٤} ،

$$\frac{\text{جا } (\alpha \Delta + \alpha)}{\frac{r}{c} - (\alpha \Delta + \alpha)} = \frac{\text{جا } \alpha}{\frac{r}{c} + \alpha} \quad \dots$$

$$\frac{0,707 + s}{\frac{7,8}{10 \times 3} - (s - 0,707)} = \frac{0,707}{\frac{7,8}{10 \times 3} + 0,707}$$

$$s = 1,3 \times 10^{-5}$$

ولذلك $\alpha \Delta \approx 3,9$ ثانية

مثال ٢ :

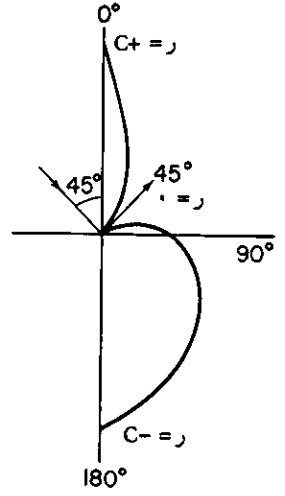
متطرقين إلى المسألة من جانبٍ آخر، نسأل ما السرعة التي ينبغي أن تتحرك بها المرأة لإحداث فارقٍ يمكنُ الكشف عنه ؟

الحل : إذا اعتبرنا أنَّ مقياسَ تداخلِ ميكلسون النجميَّ يستطيعُ قياسَ ٠,٢ ثانية ، فإنَّ :-

$$\frac{s + 0,707}{\frac{20}{810 \times 3} - (s - 0,707)} = \frac{0,707}{\frac{20}{810 \times 3} + 0,707}$$

$$s = 4,4 \times 10^{-2}$$

ويعني هذا سرعة منخفضة تساوي تقريباً ٢٠ م/ث.



الشكل ١٠: العلاقة بين سرعة المرآة وزاوية الانعكاس :-
 $\alpha = 45^\circ$

ويمكن عرض العلاقة بين سرعة المرآة وزاوية السقوط في صورة رسومٍ زاوية تُبين سرع المرآة اللازمة لتفسير الفوارق بين زاويتي السقوط والانعكاس. ففي الشكل ١٠ على سبيل المثال، زاوية السقوط هي ٤٥° وزاوية الانعكاس عندما تكون سرعة المرآة $r = 0$ هي أيضاً ٤٥°. وجميع زوايا الانعكاس الممكنة من ٠° إلى ١٨٠° تُمثّل بنقاطٍ على المنحنى المين. وإذا قيسَت المسافة من مركز منظومة المحاور إلى نقطة ما على المنحنى، فإنَّ هذه المسافة تُبين سرعة المرآة (نحو المصدر في الجزء العلويّ وبعيداً عنه في الجزء السفلي) التي تُنتج مثلَ زوايا الانعكاس هذه. وعلاوةً على ذلك، فإذا ما غيّرت زاوية السقوط على محورٍ ثالثٍ عموديٍّ على مستوى الشكل، أمكن دمج هذه الرسومات في سطح مبعوج ثلاثي الأبعاد.

سرعة الضوء في المادة المتحركة

بينما يمكن جمع سرعتين في ميكانيكا نيوتن على النحو التالي :-

[٢٤-٢:٦]

$$r_{عملية} = r_1 + r_2 + \dots$$

فإنَّ جمعهما وفقَ نظرية اينشتين يتم على النحو أدناه :-

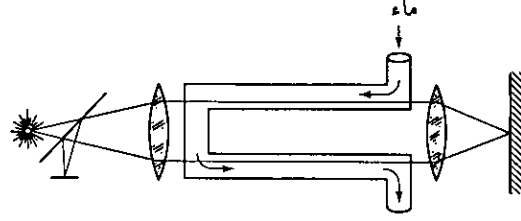
$$r_{عملية} = \frac{r_1 + r_2}{1 + \frac{r_1 r_2}{c^2}} \quad \dots [٢٥-٢:٦]$$

وفي عام ١٨١٨، قدّم فرينل* اقتراحاً لتمرير الضوء في ماءٍ يجري في أنبوبٍ لتعيين فيما إذا كان الماء «يُجرُّ» الضوء معه، ونقّذ فيزو+ هذه التجربة مستخدماً صيغةً معدلةً من مقياس كشريلي Rayleigh refractometer كما يبين ذلك الشكل ١١.

ويجري الماء في اتجاهٍ واحدٍ في أحد ذراعي مقياس الكسر وفي الاتجاه الآخر في الذراع

*A. Fresnel, *Ann. chim. et phys.* (2), 9 (1818), 56.

†H. Fizeau, "Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière," *Ann. Chim. et Phys.* (3), 54 (1859), 385.



الشكل ١١: مقياس تداخل أعد للكشف عن ظاهرة جر الضوء الماء.

الآخر. وَيُعَدُّ مقياسُ التداخلِ، عندما يكونُ الماءُ ساكناً، لِيَتَمِطَّ هُذْبِيَّ معين؛ وبتحريك الماءِ تُرى الأهدابُ مزاحةً. وقد وُجِدَ أنَّ إزاحةَ الأهدابِ تتناسبُ مع سرعةِ الماءِ w ، كذلك وُجِدَ أنَّ سرعةَ الضوءِ الفعالةِ هي:

$$r = \frac{c}{m} + w \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \dots\dots [2: 26-27]$$

حيث m هو معاملُ انكسارِ الماء.

ومن الجمعِ النيوتوني، يتوقعُ المرءُ أن تكونَ سرعةُ الضوءِ مساويةً للمقدارِ $w + \frac{c}{m}$ ؛ إلا أن التجربةَ تظهرُ أنَّ سرعةَ الضوءِ لا تتغيرُ بتغيرِ سرعةِ الوسطِ الكاملة، وإنما تتغيرُ مع كسْرِ منها σ فقط، حيثُ $\sigma = 1 - \frac{1}{m}$ ؛ وَيُسَمَّى σ معاملَ جَرِّ فَرِنِل drag coefficient Fresnel. ومن الممكنِ جعلُ هذه النتيجةِ أكثرَ دقةً بأخذِ ظاهرةِ دو بلر بعينِ الاعتبار.

ظاهرة دو بلر Doppler Effect

تشيرُ ظاهرةُ دو بلر + إلى التغيرِ في التواترِ أو الطولِ الموجيِّ بدلالةِ السرعةِ النسبيةِ للمصدرِ والمشاهد. وفي الصوتياتِ يسهلُ اشتقاقُ هذه المعادلة. فمثلاً إذا كانَ المصدرُ يتحركُ بسرعةِ v وكانت c سرعةُ الصوتِ، فإنَّ الطولَ الموجيَّ الجديدَ هو:-

$$\lambda_r = \lambda \left(1 \mp \frac{v}{c} \right) \dots\dots [2: 26-27]$$

+ نسبة الى يوهان دو بلر (١٨٠٣-١٨٥٣): استاذ الفيزياء التجريبية في جامعة فينا في النمسا.

وَتُشِيرُ العلامة - إلى المصدرِ وهو يقترب ؛ وإذا كَانَ المشاهدُ متحركاً ، فإنَّ :-

$$\lambda_r = \lambda \left(\frac{c}{c \pm v} \right) \dots\dots [2:28-29]$$

وتشير الآن الإشارة + إلى المشاهدِ وهو يقتربُ من المصدر.

أما في البصريّات فالوضعُ مختلفٌ ؛ لأنَّ الضوءَ لَا يتطلبُ أيَّ وسطٍ للانتشار، ولأنَّ سرعةَ الضوءِ ثابتةٌ أيضاً بقطعِ النظرِ عن حَرَكَةِ المصدرِ واتجاهِ حركته .

وإذا كانت λ_r هي الطولُ الموجيُّ للضوءِ كما يبدو لِلْمُشَاهِدِ ، λ الطولُ الموجيُّ الصحيحُ المنبعثُ ، و+ سرعةُ المصدرِ نسبةً إلى المشاهدِ وفي اتجاهِ الانتشار، فإنَّ :-

$$\lambda_r = \lambda \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \dots\dots [2:29-30]$$

وإذا كانت θ هي الزاويةُ المحصورةُ بين اتجاهِ حركةِ المصدرِ والاتجاهِ الذي يشاهدُ منه ، فإنَّ :-

$$\lambda_r = \lambda \frac{1 + \left(\frac{v}{c}\right) \cos \theta}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \dots\dots [2:30-31]$$

وَبِفَلَكَ الجذرِ التربيعيِّ ، نجدُ أنَّ :-

$$\lambda_r = \lambda \left[1 + \left(\frac{v}{c}\right) \cos \theta + \frac{1}{4} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \cos^2 \theta + \dots\dots \right]$$

[2:31-32]

وَيُمَثِّلُ الْمَقْدَارُ λ ($\frac{c}{v}$) جتا θ ظاهراً دوبلر الكلاسيكية، بينما يُمَثِّلُ الْمَقْدَارُ λ $\frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$ ظاهراً دوبلر التريبيعية أو النسبوية؛ أما حاصل ضرب R جتا θ فيُمَثِّلُ مَكُونَةَ سُرْعَةِ الْمَصْدَرِ أَوِ الْمَشَاهِدِ.

ومما يميز النظرية النسبية أنَّ ظاهراً دوبلر لا تختفي، حتَّى لو كان الجسمُ يتحركُ عمودياً على اتجاهِ المِشَاهِدَةِ (جتا $\theta = 0$)؛ وفي هذه الحالة نجدُ باستخدامِ المعادلةِ [٣٠-٢:٦] أنَّ:-

$$[٣٢-٢:٦] \quad \lambda = \lambda_r \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \dots\dots$$

وهي معادلةٌ مماثلةٌ لمعادلةِ تمددِ الزمنِ النسبوية. وتتوافقُ إزاحَةُ دوبلر النسبويَّةُ المستغرِضةُ هذه نَحْوَ الْأَحْمَرِ تَمَاماً مَعَ تَمَدُّدِ الزَّمَنِ الْمَفْتَرَضِ لِلْسَّاعَةِ الْمُتَحَرِّكَةِ.

وتلعبُ ظاهراً دوبلر دوراً بالغَ الأهمية في الفلك. وقد عَزَا دُوبلرُ نَفْسُهُ أُلْوَانَ النُجُومِ الْمُخْتَلِفَةِ إِلَى حَرَكَتِهَا بِاتِّجَاهِ الْمَشَاهِدِ أَوْ بَعِيداً مِنْهُ * ، وَقَدْ أَخْطَأَ فِي هَذَا لِأَنَّ سُرْعَةَ الضَّوِّ عَالِيَةً جِداً مِمَّا يَتَطَلَّبُ أَنْ تَكُونَ سُرْعَةُ النُجُومِ الْلازِمَةُ لِتَغْيِيرِ اللَّوْنِ عَالِيَةً جِداً حَتَّى عَلَى الْمُسْتَوَى الْفَلَكَيِّ؛ إِذْ كُلُّ مَا يُمْكِنُ الْكَشْفُ عَنْهُ هُوَ إِزَاحَاتٌ صَغِيرَةٌ نَوْعاً مَا فِي الْخُطُوطِ الطِّيفِيَّةِ.

وَيَتَّبِعُ مِنَ الْمَعَادِلَةِ [٣١-٢:٦] أَنَّ:-

$$\lambda \approx \lambda_r + \lambda_r \frac{v}{c}, \text{ أي أن:}$$

$$[٣٣-٢:٦] \quad \frac{\lambda \Delta}{\lambda} \approx R \dots\dots$$

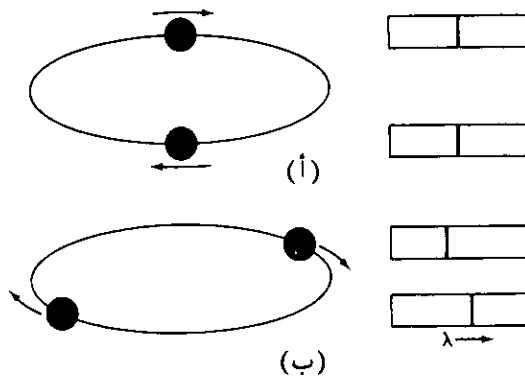
فمثلاً إذا أزيحَ خَطُّ الْهَيْدُرُوجِينِ ($\lambda = 656,28$ نَم) مَسَافَةً ١,٤ أَنْجَسْتروم، فَإِنَّ R تَكُونُ:

$$R = \frac{1,4 \times 10^3}{31 \times 6,56} = 64 \text{ كم / الثانية.}$$

*J. C. Doppler, "Über das farbige Licht der Doppelsterne and einiger anderer Gestirne des Himmels," *Abh. Königl. böhm. Gesellsch.* 2, (1842) 466.

وللمجرات البعيدة إزاحات دوبلرية أكبر بكثير من ذلك ؛ وتبدو هذه الإزاحات التي تُعرف بالإزاحات الحمراء المجرية أنها تتناسب مع المسافة (قانون هبل Hubble's law) . وقد فُسِّرَت على أنها تُشير إلى تمدد الكون . ومن أكبر الإزاحات الحمراء المسجلة ما يتعلق بالمصدر الراديوي (الذي يُعرف بمصدر راديو كامبردج والذي يُرمز إليه بالرمز $3C_{295}$) حيث يبدو أنه يتحرك مبتعداً بسرعة تساوي ١٣٢,٠٠٠ كم/ ث أي ما يساوي تقريباً نصف سرعة الضوء .

ويمكن تبين النجوم الثنائية باستخدام ظاهرة دوبلر حتى لو كان النجمان قريبين جداً من بعضهما بعضاً بحيث يصعب تبيينهما بطرق أخرى . وتدور هذه النجوم الثنائية التي تُعرف بالثنائيات المطيافية spectroscopic binaries حول محور مشترك ؛ فعندما يقترب أحد النجمين من الأرض و يبتعد الآخر عنها تُظهر خطوط طيف الانبعاث لهما إزاحات دوبلرية زرقاء وحمراء مميّزة (الشكل ١٢) .



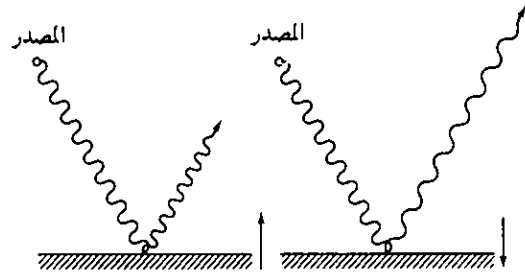
الشكل ١٢ : تمثيل تخطيطي لحركة منظومة نجمية ثنائية وللإزاحات دوبلرية المتصلة بها : (أ) حركة جانبية - لا إزاحة دوبلرية (ب) الحركة باتجاه المشاهد أو بعيداً منه تُنتج إزاحة زرقاء وحمراء .

ومن الظواهر الأخرى التي تقوم على ظاهرة دوبلر تعريض خطوط الطيف ؛ ويعزى هذا التعريض الدوبلري Doppler broadening إلى الحركة الحرارية العشوائية للذرات (في غاز) ؛ إذ يتحرك بعضها في اتجاه المشاهد وبعضها بعيداً عنه . وتكون النتيجة الخالصة

تعريضاً منظماً لحظ الانبعاث يصل غالباً عدة مرات قدر عرضه الطبيعي . ويمكن تبيان أن العرض الناشئ عن الحركة الحرارية يتناسب مع الجذر التربيعي لدرجة الحرارة المطلقة وعكسياً مع الجذر التربيعي لكتلة الذرة ؛ ولذا ، فإن الهيدروجين الذي هو أخف الذرات يُعطي أغرض خطوط عند أية درجة حرارة .

التغير في الطول الموجي عند الانعكاس من مرآة متحركة

إذا تحركت مرآة في اتجاه عمودي على سطحها ، فإن زاوية الانعكاس لا تعود تساوي زاوية السقوط ؛ وعلاوة على ذلك فإن الطولين الموجين للضوء الساقط والضوء المنعكس يختلفان أيضاً . ويمكن فهم هذا بيسر من خلال الاعتبار عن مصدر نقطي ساكن بالجبهات الموجية الساقطة واعتبار صورة المصدر المنعكسة عن المرآة المتحركة . فالصورة تقترب من المشاهد بسرعة تساوي ضعف سرعة المرآة المتحركة ؛ ومن ثم فإن الطول الموجي للشعاع المنعكس يقل ، ويزداد بذلك تواتره (الشكل ١٣) . وبنفس المنطق ، يستنتج المرء أن المرآة المتحركة تُضيف إلى المحتوى الطاقى للفوتون الساقط مُزيدة بذلك من حاصل الضرب $h\nu$ أي تزيد تواتره .



الشكل ١٣ : بتحريك المرآة باتجاه المصدر ، يصغر الطول الموجي للضوء المنعكس (اليسار) ؛ وبحركة المرآة بعيداً عن المصدر ، يطول الطول الموجي (اليمن)

وتُعطى نسبة الطول الموجي للشعاع الساقط إلى الطول الموجي للشعاع المنعكس بالمعادلة التالية :-

[٣٤-٢:٦]

$$..... \frac{1 + \left(\frac{v}{c}\right) \cos \alpha_1}{1 - \left(\frac{v}{c}\right) \cos \alpha_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

حيث λ_1 هو الطول الموجي للشعاع الساقط، λ_2 هو الطول الموجي للشعاع المنعكس، c هي سرعة الضوء، v هي سرعة المرآة المتحركة (وهي موجبة إذا كانت باتجاه المصدر وسالبة إذا كانت مبتعدة عنه)، α_1 هي زاوية السقوط و α_2 هي زاوية الانعكاس.

وإذا كانت $v = 0$ ، فإن زاوية السقوط = زاوية الانعكاس؛ كذلك فإن:-

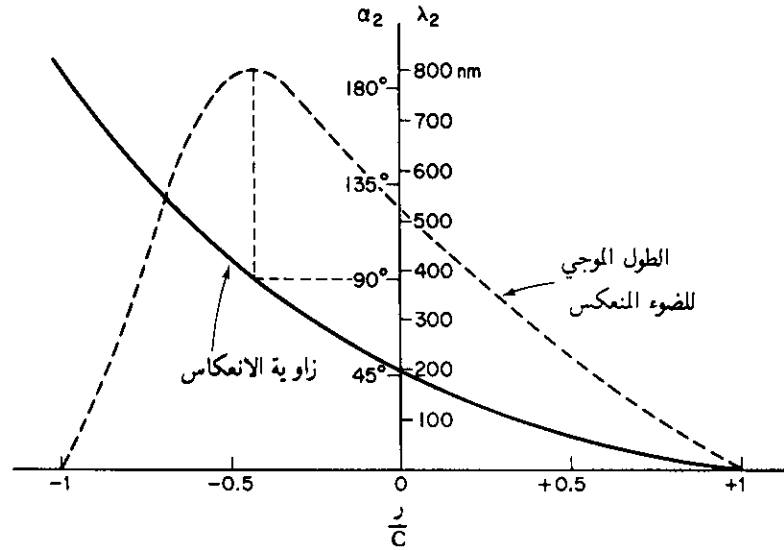
$$1 = \frac{1 + \cos \alpha_1}{1 - \cos \alpha_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

ولذلك $\lambda_2 = \lambda_1$ ، وهي الحالة الاعتيادية. ومن جهة ثانية، فإذا كانت $v = 0$ ، فإن زاوية الانعكاس لا تعود تساوي زاوية السقوط كما شرحنا ذلك من قبل، كذلك فإن الطول الموجي للضوء المنعكس يتغير. وفي الحقيقة يصل الطول الموجي للضوء المنعكس ذروته عند زاوية الانعكاس 90° ؛ ولكن هذه الزاوية ليست بالضرورة النهاية أو الحد. فليست نسبية، يمكن أن تتجاوز زاوية الانعكاس القيمة 90° . وإذا حصل ذلك، يقصر الطول الموجي للضوء المنعكس مرة أخرى. ويوضح الشكل ١٤ هذه العلاقة.

البصريّات والنظرية النسبية العامة

[٣٥-٢:٦] في نظرية نيوتن للجاذبية، $G = \frac{K_1 K_2}{r^2} \dots$

ويعني هذا بوضوح أن القوة التي تعتمد على الكتلتين تؤثر تأثيراً آنياً. [الرمز G يُشير إلى ثابت الجاذبية الكوني و r إلى المسافة بين الكتلتين K_1 ، K_2]. ويخرق هذا التأثير الآني أحد مبادئ النسبية الذي ينص على عدم جواز انتقال إشارة بسرعة أكبر من

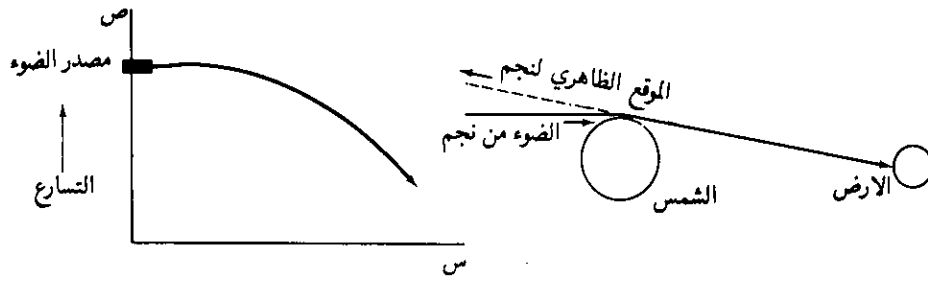


الشكل ١٤ : رَسَمٌ لزاوية الانعكاس بدلالة النسبة بين سرعة المرآة وسرعة الضوء $(\frac{v}{c})$ (الخط الجامد). ويشير الخط المنكسر الى رسم الطول الموجي بدلالة $\frac{v}{c}$. وعند زاوية الانعكاس $\alpha = 90^\circ$ ، يصل الطول الموجي للضوء المنعكس نهايته العظمى. البيانات محسوبة لزاوية سقوط $\alpha = 45^\circ$ ولطول موجي $\lambda = 500$ نم.

سرعة الضوء. وقد طَوَّرَ أينشتين في نظرية الجاذبية النسبوية مبدأ تكافؤ آخر ينصُّ على أنَّ تأثيرات التسارع لا يمكنُ تمييزها من تأثيرات المجال الجاذبيِّ؛ ويتبعُ من هذا أنَّ أية كتلة تشوُّء الخلاء المحيط بها، مما يعني أنَّ أيَّ جسم حر الحركة وكذلك الضوء ينتشرُ في مسارات منحنية بدلَ خطوطٍ مستقيمة. وكمياً تتناسبُ درجة التشوُّء طردياً مع مقدار الكتلة التي تُحدثُ التشوُّء.

إنَّ إحدى نتائج هذه النظرية أنَّ الضوء، عندما يغادرُ كتلة ما، يَفْقِدُ طاقةً للتغلبِ على المجال الجاذبيِّ للكتلة؛ وعندما يَفْقِدُ الضوءُ طاقةً، يزدادُ طوله الموجيُّ. وتُسَمَّى هذه الظاهرةُ الإزاحة الجاذبية الحمراء **gravitational red shift**. وتشاهدُ هذه الظاهرةُ فعلاً في الخطوط الطيفية للشمس والنجوم الكثيفة. وبطريقةٍ مماثلة، فإذا انبعثَ الضوءُ من مصدرٍ

*A. Einstein, "Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes," *Ann. Physik* 35 (1911), 898.



الشكل ١٥ : انحناء الضوء في منظومة متسارعة (الى اليسار) وفي مجال جاذبي (اليمن).

متسارع، فإنه ينحني إلى الأسفل (كما في الشكل ١٥ إلى اليسار) متخذاً مساراً على شكل قِطْع مكافئ لا يختلف عن مسارٍ مقذوفةٍ في مجالٍ جاذبيٍّ.

وتحدث الظاهرة نفسها، بمبدأ التكافؤ نفسه، في المجال الجاذبي (الرسم إلى اليمين)؛ وقد تنبأ أينشتين أن الضوء المارّ بالشمس ينحرف بمقدار $1,75''$ ، وقد وُجِدَ حقاً أن النجوم القريبة من القرص الشمسي تُزاح بمقدار $0,1 \pm 1,72''$ و $0,15 \pm 1,82''$ ثانية بعيداً عن الشمس. وهذا تدعيمٌ قويٌّ جداً لنظرية أينشتين.

لقد سُئِلَ مرةً السير آرثر أدنجتون Eddington الفلكي البريطاني: هل صحيحٌ يا سير آرثر أنك أحد رجالٍ ثلاثةٍ في العالم يفهمون نظرية النسبية لاينشتين؟ «وبدا الفلكي كارهاً للإجابة؛ ثم سأله السائل: «سامعني، كان عليّ أن أتحمق أن رجلاً بمثل تواضعك سيجد مثل هذا السؤال مزعجاً»؛ فأجاب أدنجتون: «لنيس بتاتا، كنتُ أفكر من عساه يكون الشخص الثالث».

اقتراحات لقراءات اضافية

- A. Einstein, *The Meaning of Relativity*, 5th ed. (Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1955).
- P. G. Bergmann, *Introduction to the Theory of Relativity* (Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, Inc., 1960).
- R. W. Ditchburn, *Light* (New York: Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc., 1963).

- W. Rindler, *Special Relativity* (New York: Interscience Publishers John Wiley & Sons, Inc., 1960).
- T. P. Gill, *The Doppler Effect* (New York: Academic Press, Inc., 1965).
- J. H. Smith, *Introduction to Special Relativity* (New York, W. A. Benjamin, Inc., 1965).
- E. F. Taylor and J. A. Wheeler, *Spacetime Physics* (San Francisco, Calif.: W. H. Freeman and Co., Publishers, 1966).
- R. Resnick, *Introduction to Special Relativity* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1968).
- A. P. French, *Special Relativity* (New York: W. W. Norton & Company, Inc., 1968).
- L. P. Williams, *Relativity Theory: Its Origin and Impact on Modern Thought* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1968).

المسائل

- ١-٢:٦ كرة قطرها ٢ م تتحرك مرة بالارض بسرعة $v = 0.6 \times 10^8$ م/ث؛ فباعتبار تقلص لورنتز فقط، فما الشكل الذي تأخذه الكرة بالنسبة إلى مشاهد على الأرض، وما أبعادها الظاهرة؟
- ٢-٢:٦ إلى أي سرعة يجب أن تسارع الإلكترونات لتتضاعف كتلتها؟
- ٣-٢:٦ يتحرك جسم بسرعة معينة بحيث ازدادت كتلته ١٠٪؛ جد مقدار تقلصه في اتجاه الحركة؟
- ٤-٢:٦ احسب زخم إلكترون يسير بنصف سرعة الضوء وكذلك طاقته الكلية.
- ٥-٢:٦ إذا كان معدل زمن حياة الميزون π في إطار مرجعي ثابت 1.0×10^{-8} ثانية، فجد معدل زمن حياتها إذا كانت تتحرك بسرعة ٠,٩ سرعة الضوء.
- ٦-٢:٦ تقطع مركبة فضائية مسافة ٢٠٠٠ كم كما تشاهد من الأرض في ٠,٠٢ ثانية؛ فكم الزمن الأرضي الذي ينقضي على مسافر في العربة ينظر إلى ساعته؟

- ٧-٢:٦ يمكنُ مقارنةُ إشعاع سيرنكوف بموجة صدمية تتسببُ من قاربٍ سرعةُ يسيرُ في الماءِ الضحلِ ؛ فإذا كانت سرعةُ القاربِ ٦٠ كم/الساعة وإذا كانت زاويةُ رأسِ الأمواجِ ٣٠°، فجدُ عمقَ الماءِ ؟ ألسرعةُ الطوريةُ للأمواجِ $v_g = \sqrt{g\lambda}$.
- ٨-٢:٦ ينظرُ مشاهدٌ من زاوية ٩٠° إلى مكعبٍ طائرٍ طولُهُ د؛ جد الطولَ الظاهريَّ الكليَّ للمكعبِ (جميعُ الجوانبِ الواضحةِ مجتمعةً) للسرعِ التالية :

$$r=0, \quad c=\frac{1}{4}, \quad c=\frac{1}{3}, \quad c=\frac{3}{4}; \quad c=r.$$

- ٩-٢:٦ يسقطُ ضوءٌ بزاوية ٤٠° على مرآةٍ مستويةٍ تتحركُ نحوَ مصدرِ الضوءِ بسرعةٍ $r=0,15c$ ؛ جد (أ) زاويةَ الانعكاسِ (ب) الطولَ الموجيَّ للضوءِ المنعكسِ مفترضاً أنَّ الطولَ الموجيَّ للضوءِ الساقطِ هو ٥٥٠ نـم .
- ١٠-٢:٦ يسقطُ ضوءٌ على مرآةٍ مستويةٍ تتبَعُ في اتجاهٍ عموديٍّ على سطحِها بسرعةٍ تبلغُ نصفَ سرعةِ الضوءِ ؛ احسبْ ثم ارسِّمْ ثلاثة أشكالٍ شعاعيةٍ تبيِّنُ كيفَ ينعكسُ الضوءُ إذا سقطَ على المرآةِ بزاويا ٣٠°، ٤٥°، ٦٠° على الترتيبِ .
- ١١-٢:٦ تتحركُ عربةٌ فضائيةٌ بسرعةٍ ٦٠٠ م/ث :
- (أ) تُبْنَتُ بندقيةٌ على العربةِ تطلقُ قذائفَ في اتجاهِ الحركةِ ؛ فإذا كانت سرعةُ القذائفِ والعربةِ ساكنةً ٢، ١ كم/ث ، فما سرعَتُها والعربةُ متحركةٌ ؟
- (ب) إذا وجهتِ البندقيةُ بحيثُ تعملُ زاويةً ٤٥° مع اتجاهِ الأمامي ، فجد سرعةَ القذائفِ .
- (ج) إذا اعتيَضَ عن البندقية بمصباحٍ ضوئيٍّ كاشفٍ يُوْشِرُ في الاتجاهِ الأماميِّ وكانت العربةُ تسيرُ بنصفِ سرعةِ الضوءِ ، فما سرعةُ الضوءِ المنبعثِ ؟
- (د) ما سرعةُ الضوءِ في الاتجاهِ ٤٥° ؟

- ١٢-٢:٦ تخيلُ أنَّ المكعبَ الذي يحملُ الحرفَ F على وَجْهِهِ الأماميِّ شوهدَ من زاوية ٤٥° مع الاتجاهِ الأمامي (كما هو مبين في الشكل ٧) ؛ ارسِّمْ متسلسلةً من الأشكالِ تبيِّنُ كيفَ يبدو الوجهُ الأماميُّ لمشاهدٍ ساكنٍ في الأحوالِ التالية :-
- (أ) المكعبُ ساكنٌ (ب) المكعبُ يتحركُ بنصفِ سرعةِ الضوءِ
- (ح) المكعبُ يتحركُ بـ $\frac{9}{10}$ سرعةِ الضوءِ .

١٣-٢:٦ إذا ابتعد نجمٌ بعيدٌ عن الأرض بسرعة $v = ٢,٤ \times ١٠^٧$ م/ث، فعلى أيّ طولٍ موجيّ يمكنُ فعلاً مشاهدةُ خطِّ الهيدروجين الأحمر ($\lambda = ٦٥٦,٢٨$ نـم) المنبعث من النجم؟

١٤-٢:٦ إذا شوهدَ خطُّ الهيدروجين الأحمر ($\lambda = ٦٥٦,٢٨$ نـم) في ضوءٍ من نجمٍ بعيدٍ عندَ الطولِ الموجيّ ٦٧٢,٨ نـم؛ فما سرعةُ التراجع التي تشيرُ إليها إزاحةُ دوبلر هذه؟

١٥-٢:٦ هل تستطيعُ أنْ تمرَّ بضوءِ إشارة المرور، وهو أحمرٌ، بسرعةٍ عاليةٍ بحيث يَبدو لَكَ الضوءُ أخضرًا؟ افترض أنَّ λ للضوء الأحمر تبلغُ ٦٠٠ نـم وللضوءِ الأخضرِ ٥٠٠ نـم.

١٦-٢:٦ تتبعُ محطةُ رادارٍ أرضيةٌ طائرةً نفاثةً بمعنى أنَّ الإشارةَ تُرسلُ من المحطةِ الأرضيةِ ثم تنعكسُ عن الطائرةِ ومنها إلى موقعِ الرادارِ حيث تُستقبلُ في المحطة؛ فإذا وُجدَ أنَّ إزاحةَ دوبلرِ المَلاحظةَ فعلاً تختلفُ عن النتيجةِ المتوقعةِ بعاملٍ مقداره ٢ اعتماداً على افتراضِ أنَّ المصدرَ أو المستقبلَ وليس كلاهما معاً يتحركُ، فهلُ تستطيعُ تفسيرَ الفارق؟

إجابات المسائل الفردية

المقدمة

٣-٠ : ٢٨,٨ م

٥-٠ : ٢٥ : ١

٧-٠ : ٦,٢٥ م

٩-٠ : (أ) ٢٠ سم (ب) ١٠ سم

١١-٠ : (أ) مستطيل (ب) مدور

الفصل ١ : ١

١-١ : ١-١ : ٧٤°

٣-١ : ٣-١ : ٣٨°

٥-١ : ٥-١ : [٥°, ٥°]

٩-١ : ٩-١ : ١,٦ سم

١١-١ : ١٨,٢ (أ) ٢٤,٦ (ب) ١٨,٢°

١٣-١ : ٦١°

١٥-١ : ٤٢ (أ) ٦٢ (ب) ٨٣ (ج) ٤٢°

الفصل ٢ : ١

١-٢ : ١-٢ : ٣,٣٣ سم، ٦,٦٧ سم

٣-٢ : ٣-٢ : ٤٠ سم؛ محدبة؛ -٤/١°

٥-٢ : ٥-٢ : نعم

٧-٢ : ٧-٢ : × ٤

١١-٢ : ١١-٢ : ٩١ سم

١٣-٢ : ٤٥°

١-٢: ١٥ : ٢٢,٥°

١-٢: ١٧ : موقع الصورة ٦,٣٧ سم من المرأة المقعرة؛ الطول ٢٧٣,٠ سم

الفصل ١ : ٣

١-٣: ١ : ١٢ سم

١-٣: ٣ : ٨,٠٦ سم

١-٣: ٥ : (أ) ٦٠ سم، حقيقية، في الداخل

(ب) ٩٠ سم، حقيقية، في الخارج

١-٣: ٧ : ١,٦

١-٣: ٩ : ٢٠,٨ سم

١-٣: ١١ : ١,٥٠ م^١

١-٣: ١٣ : ٢٠ سم

١-٣: ١٥ : (أ) هـ (ب) د (ح) وهمية الى يسار ب (د) أ (هـ) في مالا نهاية الى

اليمين

١-٣: ١٧ : ١٤,٨°

١-٣: ١٩ : ٤ سم

الفصل ١ : ٤

١-٤: ٥ : مسافة الصورة - ٥ سم، طول الصورة ٣,٦ سم

١-٤: ٧ : ١٥,٣ سم

١-٤: ٩ : (أ) ١٦,٠٠ م^١ (ب) ١٧,٧٣ م^١ (ح) ١٦,٤٧ م^١ (د)

١-٤: ١١ : ٢٢,٣٦ م^١

١-٤: ١١ : (أ) نعم مجمعة قليلا (ب) مفرقة

الفصل ١ : ٥

- ١-٥:١ : ع/٣٣,٥
٣-٥:١ : حاجر الثقب؛ ع/٢,٧٨؛ إلى يسار العدسة على -٧,٥ سم.
٥-٥:١ : ١,٣٣ سم
٥-٥:١ : ٤٢:٧°
٩-٥:١ : ٠,٥٧ مم

الفصل ١ : ٦

- ١-٦:١ : ٩,٦°
٣-٦:١ : (أ) ٤٨,٤° (ب) ٥٢,٥°
٥-٦:١ : ٢٢,٤°
٧-٦:١ : ١,٢°
٩-٦:١ : ٠,١١ مم
١١-٦:١ : ٢,٧٣°

الفصل ١ : ٧

- ١-٧:١ : (أ) ٢,٨ مم (ب) ٠,١٨٧ مم
٣-٧:١ : (أ) ١/٣ (ب) -٠,١٦٥
٥-٧:١ : ٥٨ مم
٧-٧:١ : ٩,٧٢ مم
٩-٧:١ : ١,٦٣٥

الفصل ١ : ٨

- ١-٨:١ : (أ) ٦,٩ سم (ب) ٦,٨ سم (ج) ١ مم
٣-٨:١ : ٨,٣٣ سم، ٠,٣٣

١-٨-٥ : موجبة اكثر؛ سالبة أكثر

١-٨-٧ : -٢٣,٤م-١

١-٨-٩ : ١٢,٩ سم، ٣٢,٣ سم

١-٨-١١ : ٧,٩٢ سم

١-٨-١٣ : -١؛ ١,٠٢؛ ٣,٤٧+؛ ٣,٥٠+ سم

١-٨-١٥ : نق١ = نق٢ = +٥,٨٣ سم؛ نق٣ = -٥,٨٣ سم؛ نق٤ = ١٦,٣٤ سم

١-٨-١٧ : ع = ٦ سم؛ د = ٩ سم

١-٨-١٩ : س = ٥ س + ٣ ص؛ ص = ٤ س

١-٨-٢١ : $\begin{bmatrix} ١,٠٢ & -٠,٠٥٢ \\ ٠,٤ & -٠,٩٦ \end{bmatrix}$

الفصل ٩ : ١

١-٩-١ : ١,٢م-١؛ ٦م-١

١-٩-٣ : (أ) ٤٨,٤٢ سم (ب) ١,٧ ×

١-٩-٥ : (أ) ٤ × (ب) ١٠ سم

١-٩-٧ : ١٦ سم؛ -٤ سم

١-٩-٩ : (أ) ٦ مم-١؛ ٦٦,٧ سم (ب) -٦م-١؛ ٣٣,٣ سم

١-٩-١١ : ١٠٦٦ ×

١-٩-١٣ : ٩٤ ×؛ نعم

١-٩-١٥ : (أ) ١٦,٦٧ مم (ب) ٣,٣٣ مم (ج) ١٤ ×

الفصل ٩ : ٢

٢-١-١ : ٢٥ هرتز

٢-١-٣ : ٨ م/ث

٢-١-٥ : ٢٧٣ م؛ ٢٣٠ م.

٢-١-٧ : (أ) ٠,٣١٨ هرتز (ب) ط ثانية (ج) ٠,٢ م/ث

$$\begin{aligned}
 & ٩-١:٢ : (أ) ٢م (ب) ٢١٦° (ح) ٣,٧٨ زاوية نصف قطرية \\
 & ١١-١:٢ : (أ) ٥٠ هرتز (ب) ٨مم (ح) ص = ٠,٠٢ جا [١٠٠ ط \\
 & \quad \quad \quad \left(\frac{ص}{ن} - \frac{٠,٤}{٠,٤} \right)
 \end{aligned}$$

الفصل ٢ : ٢

$$\begin{aligned}
 & ١-٢:٢ : ٤,٢٩مم \\
 & ٣-٢:٢ : (أ) ١,٠٨سم، (ب) ٩مم \\
 & ٥-٢:٢ : ٧,٢مم \\
 & ٧-٢:٢ : ٦٣٢,٨نم \\
 & ٩-٢:٢ : اقرب. المسافة البينية $\frac{٣}{٤}$ قيمتها في الهواء \\
 & ١١-٢:٢ : ٦كم/ث. \\
 & ١٣-٢:٢ : (أ) $ل_١ - ل_٢ = \lambda (ن + \frac{١}{٢})$ \\
 & \quad \quad \quad (ب) $ل_١ - ل_٢ = \lambda ن$ \\
 & ١٥-٢:٢ : ٦٠، ١٢٠، ١٨٠سم \\
 & ١٧-٢:٢ : (أ) ص١ + ص٢ = جا س (١ + جتاس) \\
 & \quad \quad \quad (ب) ٢ ط
 \end{aligned}$$

الفصل ٢ : ٣

$$\begin{aligned}
 & ١-٣:٢ : ١٠x٧,٥-٣مم \\
 & ٣-٣:٢ : (أ) ٠ (ب) ١,٢٧٣؛ ٠,٧٦٤؛ ٠,٣٤٧ \\
 & ٥-٣:٢ : ٠,٠٠٢مم \\
 & ٧-٣:٢ : بالانكسار عن بلورات الجليد \\
 & ٩-٣:٢ : ١٠x٢,٠٦-° زاوية نصف قطرية؛ ٠,٠١٦٥مم \\
 & ١١-٣:٢ : ١٠x٥,٦-° زاوية نصف قطرية؛ ٠,٠١٤مم
 \end{aligned}$$

الفصل ٢ : ٤

- ١-٤:٢ : الى ٣ م؛ ٣ الى ∞
٢-٤:٣ : (أ) ١,٦٥ ؛ ٢,٧٠ ؛ ١,٣٥ (ب) ١,٢٤ ؛ ١,٥٣ ؛ ٠,٧٧
٢-٤:٥ : ١,٠٠
٢-٤:٧ : ١٥٦ سم ؛ ٥٢ سم ؛ ٣١,٢ سم
٢-٤:٩ : ٠,٨٢ مم ؛ لا شيء
٢-٤:١١ : ٠ : ٠,١٥ : ٠,٥ : ٠,٨٥ : ١

الفصل ٢ : ٥

- ١-٥:٢ : ٧٧٧,٠٠٠
٢-٥:٣ : ٦٧٥,٧٤ نم ؛ ٦٧٦,٢٦ نم
٢-٥:٥ : ٠,٠٤ ، ٠,٠٨ ، ٠,١٢ ، ...
٢-٥:٧ : ١٠x٢,٢٩^٧ زاوية نصف قطرية ؛ ٠,٠٤٧ ثانية
٢-٥:٩ : ١٠x١,٠٧^٤ مم
٢-٥:١١ : ٤,٥٥ % ؛ نعم
٢-٥:١٣ : (أ) ١,٤٦١ ، ١,٤٦٣ (ب) ١,٩٩٦

الفصل ٢ : ٦

- ١-٦:٢ : ٨,٥٨
٢-٦:٣ : ٦٥ نم ؛ ١٠x٤,٦٢^{١٥} هرتز
٢-٦:٥ : ١,٣٦ م
٢-٦:٧ : ١٠x٥,٢^٤ أنجستروم

الفصل ٢ : ٧

- ١-٧:٢ : ٥٨٩/مم
٢-٧:٣ : ١,٢ م

٢-٧-٥ : ٤٩١ خطأ

٢-٧-٧ : ٣ ؛ غير هام

٢-٧-٩ : ٣٦٤٥

٢-٧-١١ : ١,٧٣٥ أنجستروم

٢-٧-١٣ : ١٤,٧ ؛ ٣٠,٩°

الفصل ٢ : ٨

٢-٨-١ : ١٠٠ نم

٢-٨-٣ : ٤,٠٧ ، ٢,٤٤ ، ٠,٨١ ؛ ١٠×١٠^٧ م

٢-٨-٥ : ٧١ ؛ مستقيم

٢-٨-٧ : ١,٦٤ مم

٢-٨-٩ : ٤٠,٢ سم

٢-٨-١١ : ٤٠ سم ؛ ٤,٩ مم

٢-٨-١٣ : ١,٠٢٨ سم

٢-٨-١٥ : ٠,٠٠١٦١٤ مم ؛ ٤,٢٩ نم

٢-٨-١٧ : ١,٢٤٥ ؛ ١١٠ نم

الفصل ٣ : ١

٣-١-٣ : ٥٢,٢°

٣-١-٥ : ٥٦,٢° ؛ ٣٣,٨°

٣-١-٧ : ٨٧% ؛ ٧٥% ؛ ٥٠% ؛ ٢٥% ؛ ١٠% ؛ ٠% .

٣-١-٩ : ٣٩%

٣-١-١١ : اصفر

٣-١-١٣ : ٠,٠٠٠٨٦ مم

٣-١-١٥ : (أ) [!] ، مستقطب خطيا في الاتجاه الافقي ، (ب) لانفاذ

$$٣:١-١٧: ١ = \frac{١ع}{٢ع} (خطي) ؛ ١ع + ٢ع = ٢ع (دائري)$$

$$٣:١-١٩: ١٥,٤ مم$$

$$٣:١-٢١: ١٥,٠٠٠ أمبير / م ؛ صفر$$

الفصل ٣ : ٢

$$٣:٢-١: ٠,٤٤ ؛ ٠,٩٤ \%$$

$$٣:٢-٣: (أ) ٢-١ ؛ (ب) ٢-١ ؛ ٢-٢ ؛ ٣-٢ ؛ (ج) ٣-٢ ؛ (د) لاشيء$$

$$٣:٢-٥: زاوية بروستر للموازي ٣٧,٧° ؛ الحرجة للعمودي ٥٠,٦°$$

الفصل ٣ : ٣

$$٣:٣-١: ٣,٦ مم$$

$$٣:٣-٣: ٣°$$

$$٣:٣-٥: ١,٣٦ ؛ ١,٨٤$$

الفصل ٣ : ٤

$$٣:٤-١: ١ نوتانية ، نعم$$

$$٣:٤-٣: ٢٠,٥$$

$$٣:٤-٥: ١٠,١٢ x ٣,١٠ م / ث$$

الفصل ٣ : ٥

$$٣:٥-١: ٠,٠٨٠٩ لومن$$

$$٣:٥-٣: ٢٥ x$$

$$٣:٥-٥: حوالي ٢٠ سم من احد المصباحين$$

$$٣:٥-٧: ٠,٠٠٧٩٥ واط / استيراديان$$

$$٣:٥-٩: ١٥ ثانية ؛ ٢٢,٥ ثانية$$

$$٣:٥-١١: ١١,٤ لوكس$$

الفصل ٣ : ٦

١-٦:٣ : ١:٦,٥٥

٣-٦:٣ : ٣:٣٥٧ نم

٥-٦:٣ : ٥:٠,٠٣ مم

الفصل ٤ : ١

١-١:٤ : ١:٠,٩١ ؛ ١:٠,١٨ ؛ ١:٠,٢٦٧ ؛ ١:٠,٣٥ ؛ ١:٠,٤٢٧ ؛ ١:٠,٤٩٧ ؛ ١:٠,٥٦٣ ؛

٠,٧٢ ؛ ٠,٦٧٥ ؛ ٠,٦٢

٣-١:٤ : ٣:١,٤٧ مم/ث

٥-١:٤ : ٥:٢٥°

٧-١:٤ : ٧:١٠×١,٦١ سم^٤-١ (ب) ٠,١٤٥ أنجستروم

الفصل ٤ : ٢

١-٢:٤ : ١:١٠×٩,٤٤ ؛ ١:١٥,٧٥ دقيقة

٣-٢:٤ : ٣:١٠×٨-٤ زاوية نصف قطرية

٥-٢:٤ : ٥:١,٢ مم ؛ ٥:٠,٠٢ مم

الفصل ٤ : ٣

١-٣:٤ : (أ) بتاتاً (ب) في اتجاه عقارب الساعة (ح) ينتشر أكثر في البعد الرأسي

٧-٣:٤ : ٧:٩٠ مم-١

الفصل ٤ : ٤

١-٤:٤ : ١:٠,٠٧٧٨

٣-٤:٤ : ٣:٧,٣°

٥-٤:٤ : ٥:١,١٥ %

الفصل ٥ : ١

- ١-١:٥ : ١٠×٤,٩٧-١٩ جول ؛ ١٠×١,٦٦-٢٧ كغ . متر/ثانية
 ٣-١:٥ : ٠,٤٩٧ إلكترون فولت ؛ ٤,٤٤ إلكترون فولت
 ٥-١:٥ : ١٠×١,٦٣ °
 ٧-١:٥ : ٠,١٢١٣ أنجستروم
 ٩-١:٥ : ٠,٠١٧٥ أنجستروم
 ١١-١:٥ : ٠,٠١٢ أنجستروم
 ١٣-١:٥ : ٣٢٦ نم
 ١٥-١:٥ : ٧٢٨ كم/ثانية
 ١٧-١:٥ : ٣,٦٤ مم .

الفصل ٥ : ٢

- ١-٢:٥ : ١٠×٦,٨٢ م/ث
 ٣-٢:٥ : (أ) ١٠×١,٣٣ م/ث (ب) سترتد
 ٥-٢:٥ : ٣,٧ مم
 ٧-٢:٥ : ١٥,٦ سم
 ٩-٢:٥ : ١٠×١,٤٣ أنجستروم

الفصل ٥ : ٣

- ٣-٣:٥ : ١٠×١,٠٥ ، ٠٠٠١,٦٣ ، ٠٠٠٢,٢٨ ، ٠٠٠٣,٧٥ م
 ٥-٣:٥ : ٦٥٦ نم ؛ أحر
 ٧-٣:٥ : ٩١,٢ نم ؛ ٣٦٥ نم
 ٩-٣:٥ : ٣٧٥ نم
 ١١-٣:٥ : ١٠×٢,١٨ م/ث
 ١٣-٣:٥ : ١٠×٩,٣٥ هرتز

الفصل ٥ : ٤

١-٤:٥ : (أ) ٠,٦٥٨ (ب) ٠,٢٨٤ ؛ ٠,٠٠٨٦ ؛ ١,٦٩٩

٣-٤:٥ : ٣٤,٧ %

٥-٤:٥ : ٠,٠٨ %

٧-٤:٥ : ٦٣ %

٩-٤:٥ : (أ) اخضر - اصفر ؛ ٥٤٧ نم ؛ ٤٧,٣ %

(ب) اخضر ؛ ٥١٣ ؛ ٣٥ %

الفصل ٥ : ٥

١-٥:٥ : ١٠×٠,٢٣ - ١٩ جول

٣-٥:٥ : ١٤ نم ؛ ١٧ نم

٥-٥:٥ : ١٠×٢,٢٨ - ١٩ جول

٧-٥:٥ : ١٠×١٨,٣٤ - ١٩ جول

٩-٥:٥ : ١ كيلوواط / مم^٢

١١-٥:٥ : ٦٣٢ م

١٣-٥:٥ : ١٩٢ م

الفصل ٦ : ١

١-١:٦ : ١٠×٦,٢٣ - ١٢ هـ^٢

٣-١:٦ : ١٠×١,٥ - ٢٤ نيوتن

٥-١:٦ : ١٠×٢,٩٩ - م^٨/ث

٧-١:٦ : ١٠×٣,٥٦ - ٣ وبر

٩-١:٦ : ١٠×٤,٢٨ - ٤ كغ - متر/ث ؛ ١٠×٨,٦ - ٥ نيوتن

قائمة المصطلحات

Aberration	ألزوغان
Chromatic Aberration	ألزوغان اللوني
Spherical Aberration	ألزوغان الكروي
Stellar Aberration	ألزوغان النجمي
Absorbance	الْمُمْتَصِّية
Absorption	الامتصاص
Absorptivity	الامتصاصية
Absorption Coefficient	معامل الامتصاص
Selective Absorption	الامتصاص الانتقائي
Acceptance Angle	زاوية القبول
Achromatic Prism	ألموشور الأكروماتي (ألموشور اللألوني)
Acoustic holography	ألهلوغرافيا الصوتية
Airy disk	قرص أيري
Amplitude	سعة
Analogs	المماثلات
Angstrom	الانجستروم
Analyzer	مُحلِّلة
Angular Aperture	ألفتحة الزاوية
Angular dispersion	ألتحليل الزاوي ، التفريق الزاوي
Angular Motion	الحركة الزاوية
Anomalous dispersion	ألتحليل غير المنتظم ، التفريق غير المنتظم
Antireflection coating	الطلية مضادة الانعكاس

Numerical Aperture	الفتحة العددية
Aperture stop	الحاجز ذو الفتحة ، الحاجز ذو الثقب
Aplanatic	لا زوغي ، لا زوغي
Aspheric	شبه الكروي ، شبه الكروي
Apodization	تكوين الزوائد
Astigmatism	الاستجماتية
Astronomical Telescope	التلسكوب الفلكي
Atmospheric Refraction	الانكسار الجوي
Atomic Spectra	الاطياف الذرية
Auto-Collimation	التسديد الذاتي
Auto-Correlation	الارتباط الذاتي
Avalanche Action	فعل الانهيار
Azimuth angle	الزاوية السمتية
Bessel Function	دالة بيسل ، اقتران بيسل
Birefringence	ألكسر المزدوج
Crystalline Birefringence	ألكسر المزدوج البلوري
Flow Birefringence	ألكسر المزدوج الجرياني
Form Birefringence	ألكسر المزدوج الشكلي
Black body	الجسم الاسود
Blazed grating	المحزوز المتقد ، المحزوز اللاهب
Brewster angle	زاوية بروستر
Brewster band	نطاق بروستر ، مدى بروستر
Bunsen photometer	فوتوميتر بنزن ، مقياس بنزن الضوئي
Cardinal points	النقاط الكاردينالية ، النقاط الرئيسية
Cassegrain Telescope	تلسكوب كاسيجرين

Catoptric System	المنظومة الكاتوبتريّة ، (المنظومة المرآتية أو المنظومة الانعكاسية)
Cat's eye Reflector	عاكس عين القط
Caustic	الكاوي ، الحارق
Cerenkov Radiation	إشعاع سيرنكوف
Character Recognition	تعرف الرموز أو الحروف
Chemical laser	الليزر الكيميائي
Chief ray	الشعاع الأساسي
Cristiansens filter	مرشحة كريستيانسن
Chromatic Aberration	الزوغان اللوني
Resolving Power	قدرة التبين ، قدرة الفصل
Cromatic Resolving Power	قدرة التبين اللوني
Circle of least confusion	دائرة التشويش الاقل ، دائرة الاضطراب الاقل
Coddington factors	عوامل كودنجتن
Coelostat	الكولستات ، منظّم الضوء النجمي ، مُوجّه الضوء النجمي
Coherence	التحالف ، التماسك
Coherent background	الأرضية المحالفة
Collimator	المُسَدّد ، الموازي
Coma	دُؤابة
Comatic flare	النار الذؤابية
Combination of lenses	توليفة عدسات ، مجموعة عدسات
Complementarity	التتامية ، المُتِمّة
Complex Refractive index	معامل الانكسار المركب
Complex conjugate	المترافق المركب
Compound microscope	الميكروسكوب المركب

Compton effect	ظاهرة كومبتون
Conjugate points	ألنقاط المترافقة، النقاط المتبادلة
Conjugate Planes	المستويات المترافقة، المستويات المتبادلة
Conoscopy	الكونوسكوبية، فحص المصدر الضوئي
Constant-deviation prism	موشور الانحراف الثابت
Contrast	المغايرة
Contrast transfer	نقل المغايرة
Cooke triplet	ثلاثي كروك
Cornu spiral	حلزون كورنيه
Cosine law	قانون جيب التمام
Critical angle	الزاوية الحرجة
Crooke radiometer	راديوميتر كروك، مقياس كروك الاشعاعي
Cross-correlation	الارتباط المتبادل
Crystal lattice	الشبكة البلورية
Crystal lattice optics	بصريات الشبكة البلورية
Cube corner reflector	العاكس الزاوي المكعبي
Curvature of field	تقوس المجال، انحناء المجال
Cusp of the curve	قرن المنحنى
Cylinder lens	عدسة اسطوانية
Czerny-Turner mount	ماسك شيرني - ترنر، مثبت تشيرني - ترنر
De Broglie waves	أمواج دو بروي
Decay time	زمن التلاشي، زمن الاضمحلال
Delta function	دالة دلتا، اقتران دلتا
Deviation	الانحراف

Dichroic mirror	المرآة ثنائية اللون ، مرآة تلوانية
Diffraction	الحيود
Fraunhofer diffraction	حيود فرونهوفر
Fresnel diffraction	حيود فريزل
Diffraction grating	محزوز الحيود
One-dimensional diffraction grating	محزوز الحيود أحادي البعد
two-dimensional diffraction grating	محزوز الحيود ثنائي البعد
Diopter	الديوبتر
Direct-vision prism	موشور الرؤية المباشرة
Displacement current	تيار الازاحة
Displacement vector	متجه الازاحة
Dissymetry	عدم التماثل ، فقدان التماثل
Distortion	التشويه ، التشويش
Doppler effect	ظاهرة دوبلر
Double slit interference	تداخل الشق المزدوج
Double star	نجم مزدوج ، نجم ثنائي
Drag effect	ظاهرة السحب ، تأثير السحب ، ظاهرة الجر أو الانجرار
Echelon grating	المحزوز السلمى
Effective bandwidth	عرض النطاق الموجي الفعال
Equivalence equation	معادلة التكافؤ
Electromagnetic spectrum	الطيف الكهرومغناطيسي
Electron diffraction	الحيود الالكتروني - حيود الالكترونات
Electron lens	العدسة الالكترونية
Electron microscope	الميكروسكوب الالكتروني
Electron optics	بصريات الالكترون ، البصريات الالكترونية

Electron volt	الإلكترون فولت
Ellipsoid mirror	المرآة البيضوية، مرآة الجسم الناقص
Emission spectroscopy	مطيافية الانبعاث
Energy level	المستوى الطاقي
Equivalence principle	مبدأ التكافؤ
Error	خطأ
Etalon	الاتالون
Exitance	الخروجية
Extinction	الاطفاء
Excited Atomic States	المنزلات الذرية المهتاجة، الحالات الذرية المثيجة
Eyepiece	العينية
Fermat's Principle	مبدأ فيرمات
Fiber optics	بصريات الألياف
Fiberscope	الكاشف الليفي
Field emission microscope	ميكروسكوب الانبعاث بالمجال
Field ion microscope	الميكروسكوب الأيوني المجالي
Fine Structure	البنية الدقيقة
First-order theory	نظرية الرتبة الاولى
Fish-eye lens	عدسة عين السمكة
FitzGerald-lorentz contraction	تقلص فيتزجيرالد - لورنز
FitzGerald-lorentz Transformation	تحويل فيتزجيرالد - لورنز
Fizeau fringes	أهداب فيزو
Flourescence	الفلورة، التفلور، اللّصف
Fly's eye	عين الذبابة
F-number	العدد البؤري، عدد ف
	(نسبة البعد البؤري الى قطر فتحة العدسة)

Focal length	أالبعد البؤري
Focal plane	أالمستوى البؤري
Focal ray	أالشعاع البؤري
Focal point	أالبؤرة، النقطة البؤرية
Focus monitor	منظم التركيز، مراقب التركيز
Foucault grid	مُشَبَّك فوكو
Fourier diffraction	حيود فورييه
Fourier diffraction spectroscopy	مطيافية حيود فورييه
Fourier diffraction spectrum	طيف حيود فورييه
Fourier Transform	محولة فورييه
Fourier Transform hologram	هلوغرام محولة فورييه، أالمُسَجَّلَة الضوئية لمحولة فورييه
Fraunhofer lines	خطوط فرونهوفر
Frequency	التواتر
Fresnel biprism	موشور فرنل الثنائي
Fresnel drag coefficient	معامل سحب فرنل، معامل جر فرنل
Fresnel equations	معادلات فرنل
Fresnel integrals	مُكاملات فرنل، تكاملات فرنل
Fresnel lens	عدسة فرنل
Fresnel zone plate	لوحة مناطق فرنل
Fringes	اهداب
Fringe thickness	عرض الهذب
Galilean Telescope	تلسكوب غاليليو
Galilean Transformation	تحويل جاليليو
Gauss constant	ثابت جاوس

Gauss Eyepiece	عينية جاوس
Gauss formula	معادلة جاوس
Gauss optics	بصريات جاوس
Gauss thin lens equation	معادلة العدسة الرقيقة لجاوس
Graphical construction	الرسم البياني، الانشاء بالرسم
Grating equation	معادلة المحزوز
Gravitation	الجاذبية
Group velocity	السرعة الزمرية، السرعة الجمعية
Gyroscope	ألجيروسكوب
Half width	نصف العرض
Halo	الهالة
Headlight effect	ظاهرة الضوء الامامي
Heterodyning	التضريب، تكوين الضربات
Holography	الهلوغرافيا، التسجيل الضوئي التام
Holography Theory	نظرية الهلوغرافيا
Hue	التدرج اللوني
Hurter-Driffeld Curve	منحنى هيرتر-ذريفيلد
Huygens eyepiece	عينية هيجنز
Huygens Principle	مبدأ هيجنز
Hyper fine structure	البنية الدقيقة العالية
Hysteresis	التخلفية
Illuminance	الاستضاءة
Image distance	مسافة الصورة
Image space	فراغ الصورة، حيز الصورة
Information theory	نظرية المعلومات

Information Transfer	نقل المعلومات
Infrared	الاشعة تحت الحمراء، الاشعة الحرارية، الاشعة فوق الحمراء
Integration	التكامل
Intensity	الشدة
Interference	التداخل
Interference color	اللون التداخلي
Interference filter	مرشحة تداخل
Interferometry	قياس التداخل، المداخلية
Internal reflection	الانعكاس الداخلي
International system of Units	نظام الوحدات العالمي
Interval of Sturm	فترة ستيرن، مدى ستيرن
Inverse square law	قانون التربيع العكسي
Ion laser	أليزر الأيوني
Irradiance	الانشعاع، الانشعاعية
Isoplanatic patch	الرقعة متساوية الاستجابة، الرقعة متساوية التسطح
Isomorphous replacement	الاستبدال المتبلر، الاستبدال متماثل البنية البلورية
Jones calculus	حساب تفاضل وتكامل جونز
Kerr cell	خلية كر
Kerr effect	ظاهرة كير
Kerr magneto-Optic effect	ظاهرة كر المغناطيسية - البصرية
Lamellar grating interferometer	مقياس تداخل المحزوز الرقائقي
Laser cavity	الفجوة الليزرية
Lau diagram	شكل لاو
Length standard	معيار الطول
Lens makers' formula	معادلة صانعي العدسة

Lens system	منظومة العدسات المنظومة العدسية
Thick lens	عدسة سمكية
Thin lens	عدسة رقيقة
Light Fans	المراوح الضوئية
Light scattering	تشتت الضوء، تبعثر الضوء
light tubes	الاوعية الضوئية، الانابيب الضوئية
Line spread function	دالة الانتشار الخطي
Looming	الظهور فوق الافق
Long path interferometry	قياس تداخل المسار الطويل
Luminance	السطوعية، الاضاءة
Luminous energy	طاقة السطوع، طاقة الاضاءة
Magnification	التكبير
Mask	القناع
Matrix	المصفوفة
Lens Design Matrix	مصفوفة تصميم العدسة
Polarization Matrix	مصفوفة الاستقطاب
Refraction Matrix	مصفوفة الانكسار
Rotation Matrix	مصفوفة الدوران
Metal Reflection	الانعكاس الفلزي
Meteorological optics	البصريات الجوية - بصريات الجو
Metrology	ألقياس الميثري
Michelson Interferometer	مقياس تداخل ميكلسون
Michelson stellar Interferometer	مقياس تداخل ميكلسون النجمي
Microscope	الميكروسكوب
Holographic Microscope	الميكروسكوب الهلوغرافي

Micro spectro photometry	فوتومترية الاطيااف الدقيقة
Mie scattering	تشتت مائي، تبعثر مائي
Miller indices	معاملات ميلر
Minimum ray definition	تعريف الشعاع الأصغر
Mirage	سراب
Mirror	مرآة
Aspheric mirror	مرآة شبه كرية
Plane mirror	مرآة مستوية
Mode	صيغة، غلط، وضعة
Modulation Transfer function	دالة نقل التعديل
Moire fringes	أهداب مواري
Monochromaticity	اللونية الأحادية
Monochromator	الفاصل أحادي اللون
Multilayer	متعدد الطبقات
Mutual intensity function	دالة الشدة المتبادلة
Neutralizing power	القدرة المعادلة، القدرة المحايدة
Neuton's Ring	حلقات نيوتن
Newton's thin lens equation	معادلة العدسة الرقيقة لنيوتن
Nodal Points	النقاط العقدية، العقدات
Noise	التشويش
Non-linear effect	التأثير غير الخطي
Normalized amplitude	ألسعة المُسَوَّاة
Normalized intensity function	دالة الشدة المسواة
Nuclear spin	الغزل النووي، الالف النووي

Object distance	مسافة الجسم
Object space	فراغ الجسم ، حيز الجسم
Oblique ray method	طريقة الاشعة المنفرجة ، طريقة الشعاع المائل
Obliquity factor	عامل الانفراج ، عامل الميلان
Optic axis figure	شكل المحور البصري
Optical data Processing	معالجة البيانات البصرية
Optical density	الكثافة البصرية
Optical path length	طول المسار البصري
Optical path difference	فارق المسار البصري
Optical radar	الرادار البصري
Optical rotation	الدوران البصري
Optical transfer function	دالة النقل البصري
Order	الرتبة
Orthoscopic eyepiece	العينية الاورثوسكوبية
Output plane	مستوى المخرج
Paraboloid mirror	مرآة مجسم القطع المكافئ ، مرآة الجسم المكافئ الدوراني
Parallel ray	الشعاع الموازي
Parallel-ray method	طريقة الشعاع الموازي
Paraxial ray	الشعاع المحوري المحاذي ، الشعاع محاذي المحور
Partial coherence	التحالف الجزئي ، التماسك الجزئي
Patches	رُقاقات
Path length	طول المسار
Penumbra	شبه الظل
Period	زمن الدورة
Periodic function	دالة دورية

Periscope	البريسكوب
Phase angle	زاوية الطور
Phase contrast	مغايرة الطور
Phase Difference	فارق الطور
Phase grating	محزوز الطور
Phase hologram	هلوغرام الطور، مسجلة الطور التامة
Phase transfer	نقل الطور
Phase velocity	السرعة الطورية
Phasor	متجه الطور
Phosphorescence	الفسفرة
Photochromic glass	الزجاج اللوني الضوئي
Photoelasticity	المرونة الضوئية
Photoelectric effect	الظاهرة الكهروضوئية
Photography	التصوير الفوتوغرافي، الفوتوغرافية
Photometry	الفوتومترية، القياس الضوئي
Photon	الفوتون
Pinhole camera	الكاميرا ذات الثقب
Planck's radiation law	قانون الإشعاع لبلاك
Plane-parallel plate	الشريحة متوازية الوجهين المستويين
Point spread function	دالة الانتشار النقطي
Poisson's spot	بقعة بوازون
Polarimeter	مقياس الاستقطاب، البولاميتر
Polarization	الاستقطاب
Polaroid	البولارويد، المستقطبة
Population inversion	قلب المجتمع

Positional power change	تغير القدرة الموقعية
Position factor	عامل الموقع
Power	القدرة
Power series	متسلسلة القوة
Luminous power	قدرة السطوع ، قدرة الإضاءة
radiant power	القدرة الاشعاعية ، القدرة المشعة
Power spectrum	طيف القدرة
Poynting vector	متجه بوينتنگ
Principal axis	المحور الرئيسي
Principal points	النقاط الأساسية
Pulse-width analyzer	محلة عرض النبضة
Pumping	ألضخ ، الرفع
Pupil	البؤؤ
Quantum optics	البصريات الكوانتية ، بصريات الكم
Quarter-wave plate	الشريحة الربع الموجية ، شريحة ربع الموجة
Quenching	الكبح ، الاخماد
Radiance	الاشعاعية
Radiant Energy	الطاقة الاشعاعية ، الطاقة المشعة
Radiation pressure	الضغط الاشعاعي
Radio astronomy	علم الفلك الراديوي
Radiometric distance law	قانون المسافة الراديومتري
	قانون التربيع العكسي للاشعاع
Radiometry	الراديومترية ، قياس الاشعاع
Random diffraction	الحيود العشوائي
Rayleigh criterion	معيار ريلي

Rayleigh Ratio	نسبة ريلي
Rayleigh Scattering	تشتت ريلي ، تبعثر ريلي
Ray Tracing	الرسم الشعاعي ، الرسم بالاشعة
Reading machine	آلة القراءة
Reciprocal lattice	الشبكة المتبادلة
Red shift	الازاحة نحو الاحمر، الازاحة الحمراء
Reduced distance	المسافة المختزلة
Reference circle	الدائرة المرجعية ، دائرة المرجع
Reflection	الانعكاس
Moving mirror reflection	انعكاس المرآة المتحركة
Relativistic reflection	الانعكاس النسبوي
Specular reflection	الانعكاس المنتظم
Reflectivity	الانعكاسية
Refraction	الانكسار
Refractive index	معامل الانكسار
Refractive index gradient	تحدّر معامل الانكسار، تدرج معامل الانكسار
Refractive power	قدرة الكسر
Refractivity	الانكسارية
Refractometer	مقياس الانكسار، مقياس الكسر
Resolving power	قدرة التبين ، قدرة الفصل
Ronchi Ruling	خطوط رونشي
Rotary dispersion	التحليل الدوراني ، التفريق الدوراني
Rowboat analogy	مماثلة قارب التجديف
Ruby laser	الليزر الياقوتي
Saccharimeter	مقياس تركيز السكارين

Saturation	الاشباع
Schlieren Optics	البصريات الشليرنية، بصريات الأوساط غير المتجانسة
Schrodinger wave equation	معادلة شرودنجر الموجية
Scintillation	الايماض، الوميض
Self-Focusing	التركيز الذاتي
Semiconductor laser	ليزر نصف الموصل
Shadow	الظل
Shape factor	عامل الشكل
Signal representation	تمثيل الإشارة
Signal-to-noise ratio	نسبة الإشارة الى التشويش
Sign convention	اصطلاح الاشارات
Sine condition	شرط الجيب
Sodium spectrum	طيف الصوديوم
Solid angle	الزاوية المجسمة
Spatial coherence	التحالف المكاني
Spectrophotometer	الفوتومتر الطيفي
Spectroscopy	المطيافية
Spectrum lines	خطوط الطيف
Spiral fringes	الاهداك اللولبية، الاهداب الحلزونية
Spread function	دالة الانتشار
Step function	دالة الدرجة
Standing waves	الامواج الواقفة، الامواج المستقرة
Stiffness	قساوة
Strain Analysis	تحليل الاجهاد
Sturm's conoid	شبه مخروط ستيرن

Superposition	تراكب
Super-resolution	التبين الفوقي
Surface interferometry	قياس التداخل السطحي
System matrix	مصفوفة المنظومة
Tangential focus	البؤرة التماسية
Telecentric System	منظومة المركز البعيد - منظومة التركيز عن بُعد
Telephoto lens	العدسة التليفونية ، العدسة ناقلة الصورة
Theta modulation	تعديل ثيتا
Thin film	فيلم رقيق
Third-order theory	نظرية الرتبة الثالثة
Through put	المُدخل البيني ، المُدخل الوسيط
Time dilation	المد الزمني ، التمدد الزمني
Total internal reflection	الانعكاس الداخلي الكلي ، الانعكاس الداخلي التام
Fourier Transform	محولة فورييه
Transfer function	دالة النقل
Translation matrix	مصفوفة الانتقال
Transmittivity	النفاذية
Transmittance	المنفذية
Transmission function	دالة النفاذ
Triangular path interferometer	مقياس التداخل ذو المسار المثلثي
Turbulence	الاضطراب
Ultraviolet	فوق البنفسجي
Ultraviolet Catastrophe	الاخفاق فوق البنفسجي
Uncertainty principle	مبدأ الارتياب ، مبدأ اللاحتمديد
Velocity	سرعة

Vergence	الامالة
Vertex	قطب
Vibration curve	منحنى الاهتزاز
Visibility	الوضوح
Wavefront	الجهة الموجية
Wave configuration	التشكيلة الموجية
Wave equation	المعادلة الموجية (معادلة الموجة)
Wave group	زمرة موجبة
Wavefront reconstruction	اعادة بناء الجهة الموجية
Wave length	الطول الموجي
Wave number	العدد الموجي
Wave train	الرتل الموجي
Wedge interference filter	مرشحة التداخل الاسفيني
Wide-angle lens	عدسة الزاوية الواسعة
Wien displacement law	قانون الازاحة لفين - قانون فين للإزاحة
X-ray diffraction	حيود الاشعة السينية
X-ray Scattering	تشتت الاشعة السينية
X-ray Spectra	اطياف الاشعة السينية
Zone plate	لوحة المناطق
Zoom lens	عدسة التزويم