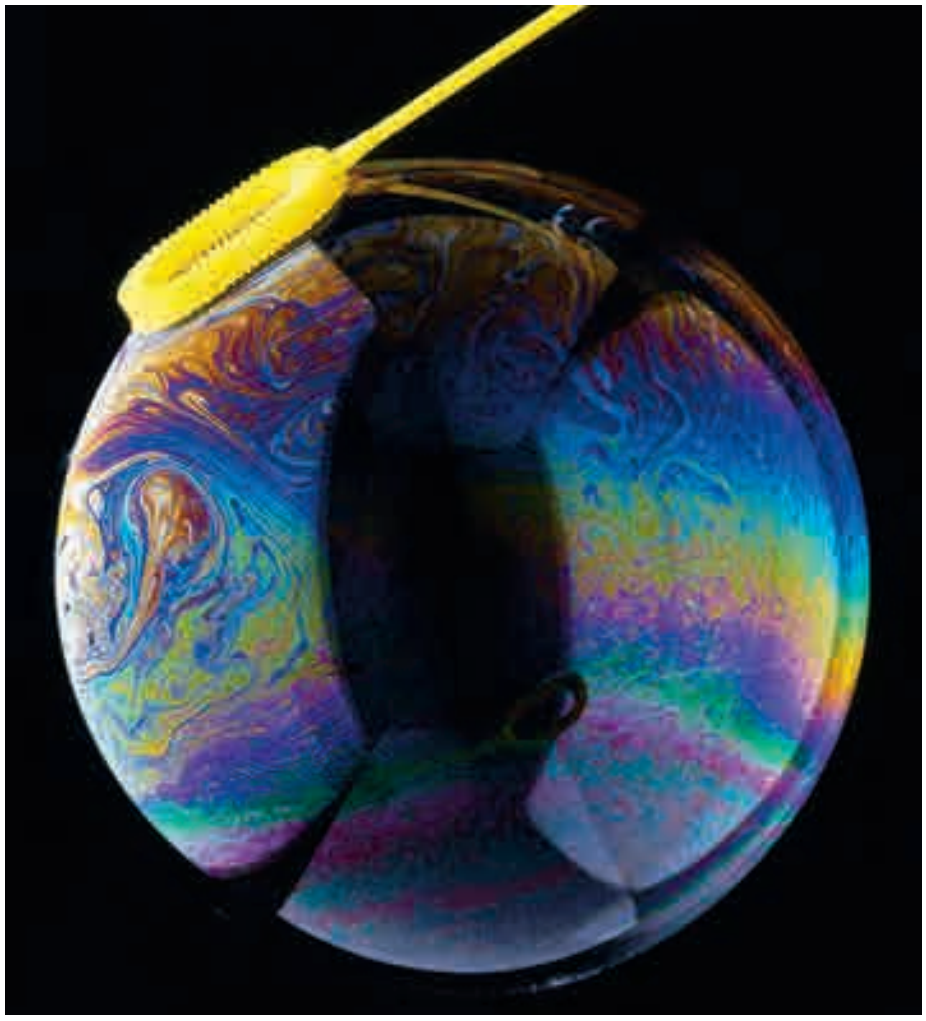


يمكن تفسير الألوان الجميلة المشاهدة من سطح فقاعة الصابون هذه بطريقة بديعة بالنّظريّة الموجيّة للضَّوء. إنّ فقاعة الصابون هي غشاء كروي رقيق مملوء بالهواء؛ الضَّوء المنعكس على السطحين الخارجي والداخلي لهذا الغشاء من الماء الصابوني يتداخل تداخلا بناءً لإنتاج الألوان البراقة. وأيّ لون نراه عند أيّ نقطة يعتمد على سمك الغشاء عند تلك النّقطة، وعلى زاوية النظر أيضًا.

سندرس في هذا الفصل مفاهيم أساسية لطبيعة الضَّوء الموجيّة، بما في ذلك التّداخل، والحيود، وتداخل الأغشية الرقيقة، والاستقطاب. بالإضافة إلى الكثير من التطبيقات من القياسات الطّيفية، إلى شاشات عرض LCD.

الفصل 24

الطّبيعة الموجيّة للضَّوء

إنّ حمل الضَّوء لطاقة هو شيء واضح لكلّ شخص جمّع أشعة الشّمس بعدسة لامّة على قطعة من الورق وحرق فجوة فيها. ولكن كيف ينتقل الضَّوء؟ وبأيّ شكل تُحمل هذه الطّاقة؟ في مناقشتنا للموجات في (الفصل 11)، لاحظنا أنّ الطّاقة يمكن حملها من مكان إلى آخر بطريقتين هما: الجسيمات، والموجات. في الحالة الأولى، يمكن أن تحمل الجسيماتُ المادية الطّاقةَ مثل الماء المتدفق. وفي الحالة الثانية، موجات الماء وموجات الصّوت، مثلا، يمكن أن تحمل الطّاقة لمسافات بعيدة مع أنَّ جُسيمات الوسط المهتز لا تقطع هذه المسافات. واستنادًا إلى ذلك، ماذا يمكننا القول عن طبيعة الضَّوء: هل ينتقل الضَّوء مثل سيل من الجُسيمات بعيدًا عن مصدره، أم هل ينتقل بصورة موجات تنتشر نحو الخارج بعيدًا عن المصدر؟

تاريخيًّا، يُعدّ هذا سؤالًا صعبًا. أوّلًا، لأنّ الضّوء لا يظهر نفسه بوضوح على أنّه مكوّنٌ من جُسيمات دقيقة؛ كما أنّنا لا نرى موجات ضوئية صغيرة تعبر أمامنا مثل موجات الماء. بدت الدلائل تفضل الجانب الأول في البداية، ولكن أصبح الميل إلى الجانب الثاني في حدود عام 1830، عندما تقبل معظم الفيزيائيين النّظريّة الموجيّة. ومع نهاية القرن التاسع عشر، اعتبر الضّوء موجات كهرمغناطيسية (الفصل 22). وفي بداية القرن العشرين، أثبت أنّ للضّوء طبيعة جسيمية كذلك، كما سنناقش في (الفصل 27). وعلى أيّ حال، فقد بقيت النّظريّة الموجيّة سارية المفعول، وأثبتت نجاحها. ونستقصي الآن دلائل النّظريّة الموجيّة، وكيفية استعمالها لتفسير مدى واسع من الظواهر.

1-24 الموجات مقابل الجسيمات مبدأ هويغنز والحيود

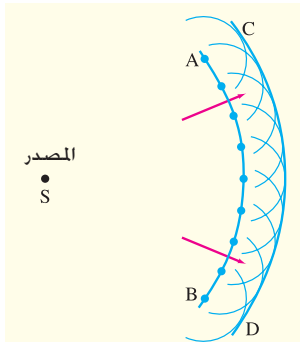
وضع العالم الهولندي كريستيان هويغنز (1629 – 1695)، المعاصر لنيوتن، مشروع النّظريّة الموجيّة للضّوء. ولا يزال مفيدًا حتى اليوم ذلك الأسلوب الذي طوره هويغنز لاستنتاج المكان المستقبلي لمقدمة الموجة إذا كنا نعرف الموقع السابق. ونعني بمقدمة الموجة النقاطَ جميعها في بُعدين أو ثلاثة أبعاد التي تكون قمّة – وهو ما ندعوه "موجة" كما يظهر في المحيط. إنّ مقدمات الموجات تكون عمودية على الأشعة كما ناقشناها في (الفصل 11) (الشّكل 11 – 34).

مبدأ هويغنز

ويمكن أن نصيغ **مبدأ هويغنز** كما يلي: [كلّ نقطة على مقدمة الموجة يمكن اعتبارها مصدرًا للمويجات الصغيرة التي تنتشر نحو الأمام، وبسرعة مساوية لسرعة الموجة. وتكون مقدمة الموجة الجديدة هي الغلاف للمويجات جميعها؛ أي المماس لها كلها.]

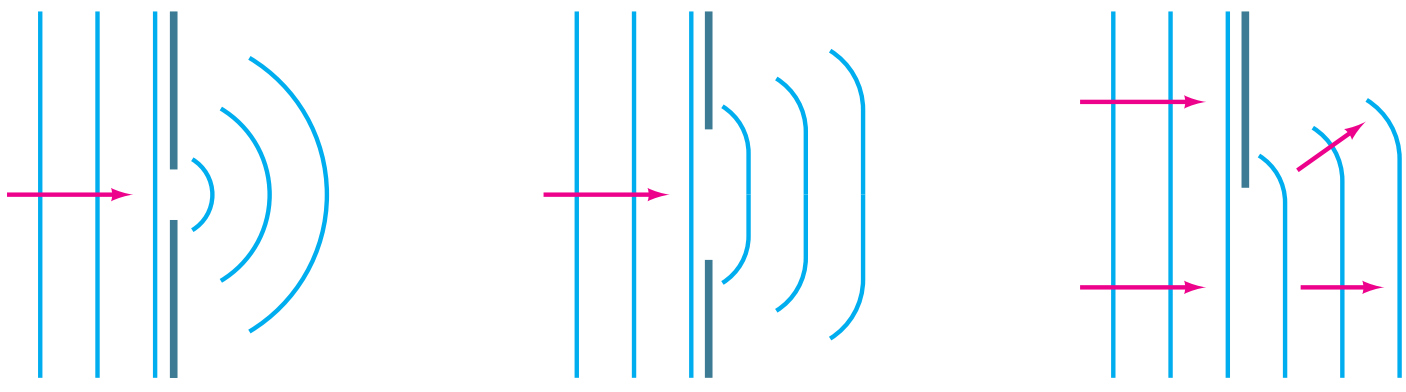
وكمثال بسيط لمبدأ هويغنز، نأخذ مقدمة الموجة AB كما في الشّكل (24-1)، والتي تنتقل بعيدًا عن المصدر S. ونفرض أنّ الوسط متماثل الجوانب؛ أي أنّ سرعة الموجة v هي نفسها في الاتجاهات جميعها. ولنجد مقدمة الموجة بعد زمن t من المقدمة AB؛ نرسم دوائر صغيرة نصف قطر كلّ منها $r = vt$. إنّ مراكز هذه الدوائر هي النقاط الزرقاء على مقدمة الموجة الأصلية AB، وتمثل الدوائر مويجات هويغنز (الوهمية). إنّ المماس لكلّ هذه الدوائر هو المنحنى CD، وهو الموقع الجديد لمقدمة الموجة.

يُعدّ مبدأ هويغنز مهمًّا بصورة خاصة لتحليل ما يحدث عندما تسقط الموجات على حاجز، ويتمُّ اعتراض مقدّمات الموجات جزئيًّا. يتنبّأ مبدأ هويغنز بأنّ الموجات تنحني خلف الحاجز، كما هو مبين في الشّكل 24 – 2. وهذا ما تفعله موجات الماء تمامًا، كما رأينا في (الفصل 11) (الشّكلان 11 – 44، 11 – 45). ويُسمّى انحناءُ الموجات خلف الحواجز إلى "مناطق الظل" **الحيودَ**. ولأنّ الحيود يحصل للموجات وليس للجسيمات، فإنّ الحيود هو طريقة لتمييز طبيعة الضّوء.



الشّكل 24 – 1. مبدأ هويغنز، يستعمل لإيجاد مقدمة الموجة CD إذا عرفنا مقدمة الموجة AB.

الشّكل 24 – 2. ينسجم مبدأ هويغنز مع الحيود (أ) حول حافة الحاجز. (ب) عبر فتحة كبيرة. (جـ) عبر فتحة صغيرة يقع عرضها في حدود الطّول الموجيّ.



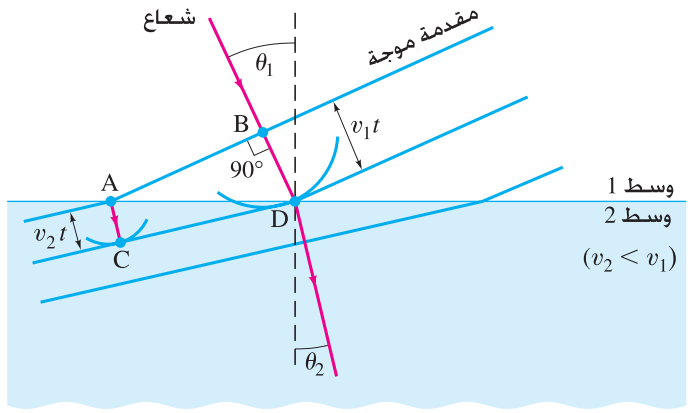
هل يبدي الضَّوء حيودًا؟ في منتصف القرن السابع عشر، لاحظ الراهب فرانسيسكو غريمالدى (1618 – 1663) أنه عندما يدخل ضوء الشّمس إلى غرفة معتمة عبر ثقب صغير في ستارة، فإنّ البقعة على الجدار المقابل تكون أكبر مما هو متوقع من الأشعة الهندسية. وقد لاحظ أيضًا أنّ حدود الصورة لم تكن واضحة، بل كانت محاطة بِهُدُبٍ ملونة. وقد عزى غريمالدي ذلك إلى حيود الضَّوء.

يتناول النّموذج الموجيّ للضَّوء عملية الحيود بصورة رائعة. لكن نموذج الأشعة (الفصل 23) لا يستطيع التعبير عن الحيود، ومن المهم أن نكون ملمين بهذه الحدود للنموذج الشّعاعي. إنّ الضَّوء الهندسي باستعمال الأشعة الضوئية ينجح في تفسير كثير من الظواهر فقط؛ لأنّ الحواجز والفتحات العادية تكون أكبر بكثير من الأطوال الموجيّة للضَّوء. لذلك يحدث القليل من الحيود والانحناء للضَّوء.

* 2-24 مبدأ هويغنز وقانون الانكسار

كان قانونا الانعكاس والانكسار معروفين جيّدًا في عصر نيوتن. ولكن، لم يستطع قانون الانعكاس التمييز بين النظريتين؛ الموجات مقابل الجسيمات. عندما تنعكس الموجات، فإنّ زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس (الشّكل 11 – 35). والحال صحيح كذلك بالنسبة للجسيمات؛ فكرّ في كرة التنس التي تصطدم بسطح منبسط دون حركة مغزلية.

أمّا قانون الانكسار فمسألة أخرى؛ تأمّل شعاعًا ضوئيًّا يدخل وسطًا بحيث ينحني مقتربًا من العمود، كانتقاله من الهواء إلى الماء. وكما هو مبين في (الشّكل 24 - 3)، فإنّ هذا الانحناء يمكن بناؤه باستعمال مبدأ هويغنز إذا فرضنا أنّ سرعة الضَّوء ستكون أقلّ في الوسط الثاني $(v_2 < v_1)$. في زمن t، النّقطة B على مقدمة الموجة AB (عموديًا على الشّعاع الساقط) تنتقل مسافة $v_1 t$ للوصول إلى النّقطة D.



الشّكل 24 – 3، تفسير الانكسار باستعمال مبدأ هويغنز. مقدمات الموجات عمودية على الأشعة.

النّقطة A على مقدمة الموجة، تسير في الوسط الثاني، وتقطع مسافة $v_2 t$ لتصل إلى النّقطة C، حيث $v_2 t < v_1 t$. يطبق مبدأ هويغنز للنقطتين A، و B للحصول على الموجات المنحنية المبينة عند C، و D. مقدمة الموجة هي المماس لهاتين الموجتين. لذا، فمقدمة الموجة الجديدة هو الخط CD. وعليه، فإنّ الأشعة العمودية على المقدمات، تنحني نحو العمود إذا كانت $v_2 < v_1$، كما هو مرسوم. (وهذه هي المناقشة نفسها التي وردت فيما يخص الشّكل 11 – 43).

لقد فضل نيوتن النّظريّة الجسيمية للضَّوء، والتي أعطت نتائج معاكسة؛ أي أنّ سرعة الضَّوء في الوسط الثاني كانت أكبر $(v_2 > v_1)$. ولهذا، نستنتج من النّظريّة الموجيّة أنّ سرعة الضَّوء في الماء أقلّ من سرعته في الهواء. ولكن نظرية نيوتن الجسيمية تستنتج عكس ذلك. إنّ التجربة التي أجريت لقياس سرعة الضَّوء في الماء كانت في عام 1850 على يد العالم الفرنسي جين فوكولت، وأيدت نتائج النّظريّة الموجيّة. عندها كانت النّظريّة الموجيّة مقبولة تمامًا، كما سنرى في البند اللاحق.

يستند قانون سنيل في الانكسار إلى مبدأ هويغنز باعتبار أنّ سرعة الضَّوء v في أيّ وسط مرتبطة بسرعته في الفراغ c، ومعامل الانكسار n، (بالمعادلة 23-4). أي: $v = c/n$.
من بناء هويغنز (للشكل 24-3)، الزاوية ADC تساوي θ_2، والزاوية BAD تساوي θ_1. وبالتالي في المثلثين اللذين لهما ضلع مشترك AD، عندنا

$$\sin\theta_1 = \frac{v_1 t}{\text{AD}}, \qquad \sin\theta_2 = \frac{v_2 t}{\text{AD}}$$

نقسم هاتين المعادلتين لنحصل على

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

ولكن $v_1 = c/n_1$ و $v_2 = c/n_2$ ، وأن

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

وهذا هو قانون سنيل في الانكسار، (المعادلة 23 – 5). (قانون الانعكاس يمكن اشتقاقه من مبدأ هويغنز بطريقة مماثلة).

عندما تنتقل موجة ضوئية من وسط إلى آخر، فإنّ تردّدها لا يتغيّر، أمّا طولها فيتغيّر. ويمكن ملاحظة ذلك من (الشّكل 24 – 3)، حيث إنّ كلًّا من الخطوط الزرقاء يمثّل مقدّمة موجة تعود لقمة موجة. عندها

يعتمد طول الموجة على n.

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{v_2 t}{v_1 t} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2},$$

في الخطوة الأخيرة، استعملنا المعادلة (32 – 4)، $v = c/n$ ، إذا كان الوسط 1 هو الفراغ (أو الهواء)، لذلك $n_1 = 1,\ v_1 = c$، ونُسَمّي λ_1 ببساطة λ. وعندئذ، فإنّ طول الموجة في وسط آخر معامل انكساره $n\ (= n_2)$ ستكون

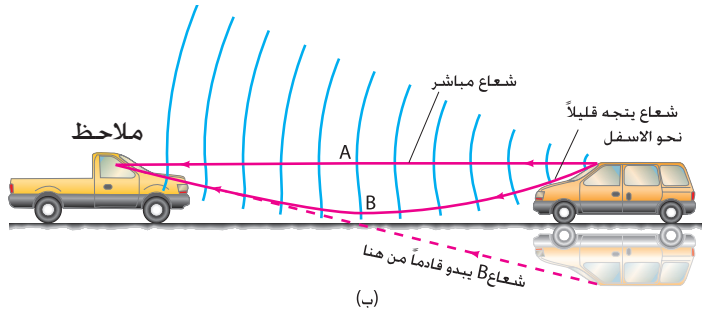
$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \qquad \textbf{(1-24)}$$

تنسجم هذه المعادلة مع عدم تغيّر التردّد f بغضّ النظر عن أيّ وسط يتحرك فيه الضَّوء حيث $c = f\lambda$. يمكن استعمال مقدمات الموجات لتفسير كيفية تكوّن السّراب بواسطة انكسار الضَّوء. فمثلا، يرى السّائقون في يوم حار سراب ماء على الطرق أمامهم، مع انعكاس المركبات البعيدة فيها (الشّكل 24 – 4أ) ، حيث تتكون هناك طبقة من الهواء الساخن مباشرة فوق سطح الأرض في مثل هذه الأيام الحارة. (التسخين بسبب أشعة الشّمس). يكون الهواء الساخن أقلّ كثافة من الهواء الأبرد، لذلك يكون معامل الانكسار أقل قليلا في الهواء الساخن. ونرى في (الشّكل 24 – 4 ب) مخططًا للضَّوء القادم من نقطة على سيارة بعيدة (إلى اليمين) متجهة إلى اليسار نحو المُلاحِظ. وتتبين مقدمات الموجات وشعاعان. الشّعاع A يتجه مباشرة إلى الملاحظ ويتبع مسارًا مستقيمًا، ومثل المنظر العادي لسيارة بعيدة. في حين يتجه الشّعاع B في البداية نحو الأسفل، ولكنه ينحني قليلا عندما يسير خلال طبقات من الهواء ذات معاملات انكسار مختلفة. إنّ مقدمات الموجات، المبينة باللون الأزرق في (الشّكل 24 – 4 ب)، تنتقل أسرع قليلًا في طبقات الهواء القريبة من الأرض (الشّكل 24 – 3) وكذلك التماثل في (الشّكل 11–43). وهكذا، فإنّ الشّعاع B ينحني كما هو مبين، ويبدو للناظر على أنه قادم من الأسفل (الخط المتقطع) كما لو كان منعكسًا عن الطريق؛ وهكذا يتكوّن السّراب.

تطبيق الفيزياء
السّراب في الطرق الخارجية

الشّكل 24 – 4 (أ) سراب على طريق سريع. (ب) الرسم (مبالغ فيه كثيرًا) يبين مقدمات الموجات والأشعة لتفسير السّراب. لاحظ كيف أنّ أجزاءً من مقدمات الموجات القريبة من الأرض تتحرك أسرع فتبدو متباعدة.

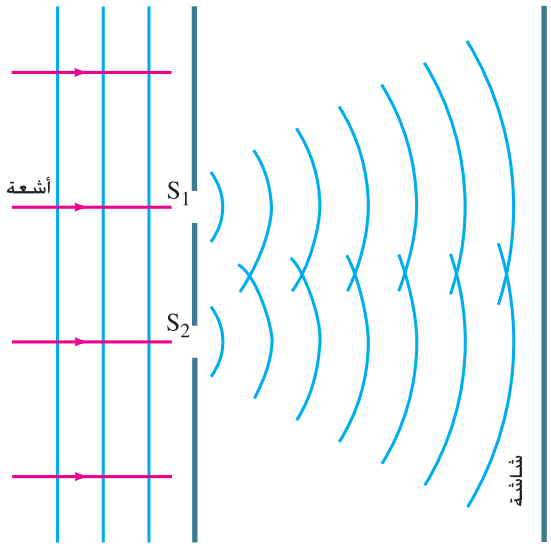
(أ)



(ب)

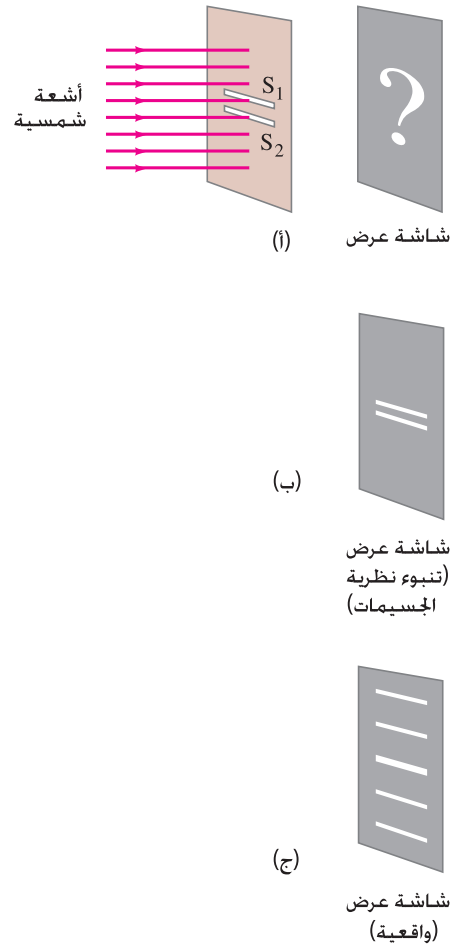
3-24 التّداخل – تجربة شقيّ يونغ

توصّل العالِم الإنجليزي توماس يونغ (1773 – 1829) في عام 1801 إلى دليل مقنع لطبيعة الضَّوء الموجيّة. واستطاع قياس الأطوال الموجيّة للضَّوء المرئيّ. يبين (الشّكل 24 – 5أ) رسمًا تخطيطيًّا لتجربة يونغ المشهورة "الشّقّ – المزدوج". الضَّوء القادم من مصدر واحد (استعمل يونغ الشّمس) يسقط على ستارة تحتوي شقين متجاورين هما S_1 و S_2. لو أنَّ الضَّوء مكوَّن من دقائق صغيرة، لتوقعنا مشاهدة خطين لامعين على شاشة موضوعة خلف الشّقّين كما في (ب). ولكن بدلا من ذلك، يلاحظ أنّ هناك سلسلة من الخطوط المضيئة، كما في (جـ). استطاع يونغ أن يفسر ذلك على أنّه نتيجة **تداخل الموجات**. ولرؤية ذلك: افترض موجات ضوء بطول موجي وحيد (مفرد) – تُسَمّى **وحيدة اللون** – تسقط على الشّقّين كما هو واضح في (الشّكل 24 – 6). وبسبب الحيود، فإنّ الموجات التي تغادر الشّقّين تنتشر كما هو مبين. إنّ هذا يكافئ نمط التّداخل النّاتج عند إلقاء حجرين في بحيرة (الشّكل 11 – 37). أو عندما يتداخل الصّوت الصادر من سماعتين (الشّكل 12 – 16). ارجع إلى (البند 11 – 12) الخاص بتداخل الموجات.



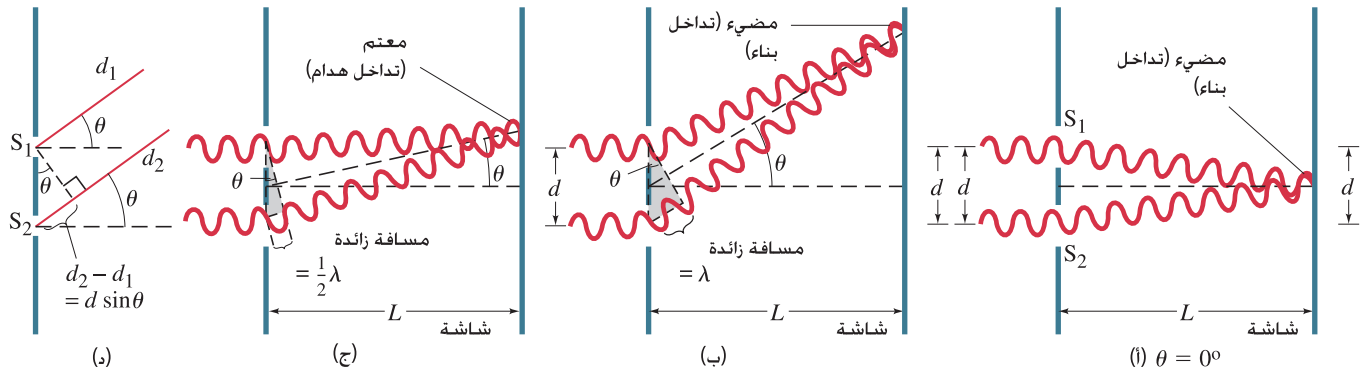
مقدمات الموجة

الشّكل 24 – 6. إذا كان الضَّوء موجيًا، فإنّ الضَّوء المار من أحد الشّقّين سوف يتداخل مع الضَّوء المار من الشّقّ الآخر.



الشّكل 24 – 5 (أ) تجربة شقي يونغ. (ب) لو أنَّ الضَّوء مكوَّن من جسيمات، لرأينا خطين لامعين على الشاشة خلفهما. (جـ) في الواقع نشاهد عددًا كبيرًا من الخطوط.

وسنرى الآن كيف ينتج نمط التّداخل على شاشة. ونستفيد من (الشّكل 24 – 7). موجات طولها λ تُرى داخلة الشّقّين S_1 و S_2 حيث البعد بينهما d. تنتشر الموجات في الاتجاهات كلّها بعد العبور خلال الشّقّين، لكنّها موضّحة فقط لثلاث زوايا θ مختلفة. في (الشّكل 24 – 7أ)، تبين الموجات التي تصل مركز الشاشة ($\theta = 0°$). الموجات القادمة من الشّقّين تقطع المسافة نفسها. لذا، تكون متفقة بالطور: قمة إحدى الموجتين تصل في وقت وصول قمة الموجة الأخرى. وبالتالي، تُضاف اتساعات الموجتين لتكوّن اتساعًا أكبر كما يبين (الشّكل 24 – 8أ). ويعدّ هذا تداخلا بنّاء، وهناك منطقة لامعة في منتصف الشاشة. يحدث التّداخل البناء كذلك عندما يختلف المساران بمقدار طول موجة واحدة (أو أيّ عدد صحيح من الأطوال الموجيّة)، كما يبين (الشّكل 24 – 7 ب)، وهنا كذلك سيكون لمعانًا على الشاشة. ولكن إذا سار أحد الشّعاعين مسافة أكبر بمقدار نصف طول موجة (أو $\frac{5}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda$، وهكذا)، فإنّ الموجتين تكونان مختلفتين في الطور تمامًا عند وصولهما الشاشة: تصل القمة لإحدى الموجتين في الوقت نفسه لوصول "القاع" للموجة الثانية. لذا، تضاف الموجتان للحصول على إزاحة تساوي صفرًا (الشّكل 24 – 8 ب). ويُسَمّى هذا **تداخلًا هدّامًا**، وتكون الشاشة معتمة. (الشّكل 24 – 7 جـ). ومن ثمَّ تتكوَّن سلسلة من الخطوط اللامعة والمعتمة (أي **هدب**) على الشاشة.



الشّكل 24 – 7 كيف تفسر النّظريّة الموجيّة نمط الخطوط الملاحظة في تجربة الشّقّ – المزدوج. عند (أ) مركز الشاشة تقطع الموجات مسافات متساوية. لذلك، تكون متفقة في الطور. (ب) عند هذه الزاوية θ، تسير الموجة من الشّقّ السفلي مسافة إضافية بمقدار طول موجة كاملة، وتكون الموجات متفقة في الطور، لاحظ من المثلث المظلل أنّ فرق المسير يساوي $d \sin\theta$. (جـ) لهذه الزاوية θ، تسير الموجة من الشّقّ السفلي مسافة إضافية تساوي نصف طول موجة. لذا، تصل الموجتان الشاشة وهما مختلفتان في الطور. (د) مخطط تفصيلي يبين هندسة الفرعين (ب) و (جـ).

لتحديد مكان وقوع الخطوط اللامعة بالضبط، لاحظ أولًا أنّ (الشّكل 24 – 7) مبالغ فيه؛ في المواقف الحقيقية، البعد d بين الشّقّين صغير جدًّا بالنسبة للمسافة L بين الشّقّين والشاشة. لذلك، تكون الأشعة من الشّقّين لكلّ زاوية θ هي الزاوية التي يحصرانها مع الأفق كما هو مبين في (الشّكلين 24 – 7 ب، و24 – 7 جـ). نرى أنّ المسافة الإضافية التي يقطعها الشّعاع السفلي هي $d \sin\theta$ (أكثر وضوحا في الشّكل 24 – 7 د) يحدث التّداخل البنّاء، وتظهر هدبة لامعة على الشاشة، إذا كان فرق المسير $d \sin\theta$، يساوي عددًا صحيحًا من الأطوال الموجيّة الكاملة:

$$d \sin\theta = m\lambda, \qquad m = 0, 1, 2, \cdots$$

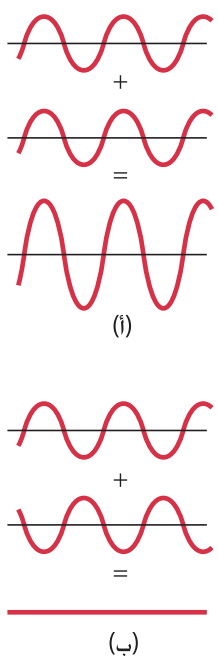
[تداخل بنّاء (لامع)] (24 – 2أ)

تسمى قيمة m" الرتبة " لأهداب التّداخل. الرتبة الأولى $(m = 1)$ مثلا، هي الهدبة الأولى على الجانبين من الهدبة المركزية (والتي تكون عند $\theta = 0, m = 0$). يحدث التّداخل الهدّام عندما يكون فرق المسير الضوئي $d \sin\theta$ مساويًا لـ $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda$ وهكذا:

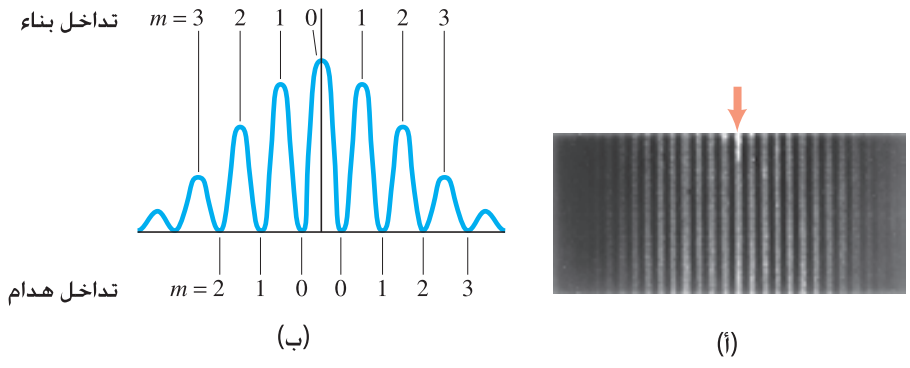
$$d \sin\theta = (m + \tfrac{1}{2})\lambda, \qquad m = 0, 1, 2, \cdots$$

[تداخل هدام (معتم)] (24 – 2ب)

إنّ الهدب اللامعة تكون قمة، أو شدة ضوئية عظمى، في حين تكون الهدب المعتمة شدة ضوئية دنيا. شدة الضّوء العظمى في الهدبة اللامعة المركزية $(m = 0)$ وتبدأ بالنقصان للرتب الأكبر، كما هو واضح في (الشّكل 24 – 9). ويعتمد مقدار تناقص الشدة مع زيادة الرتبة على عرض الشّقّين.



الشّكل 24 – 8. موجتان تشكّلان (أ) تداخلا بناءً (ب) تداخلا هدّاما. (انظر كذلك البند 11 – 12)



الشّكل 24 – 9 (أ) هدب التّداخل الناتجة في تجربة الشّقّ – المزدوج، وتم الكشف عنها بفيلم تصوير وضع على الشاشة. يشير السهم إلى الهدبة المركزية. (ب) رسم لشدة الضّوء في نمط التّداخل. وتبدو أيضًا قيم m (للمعادلة 24 – 2 أ) (التّداخل البناء) (وللمعادلة 24 – 2ب) (التّداخل الهدّام).

المثال 24-1 البعد بين خطوط التّداخل في الشّقّ المزدوج

تبعد ستارة 1.20 m عن شقين تفصلهما مسافة 0.100 mm. يسقط ضوء طول موجته $\lambda = 500\ \text{nm}$ على الشّقّين من مصدر بعيد. على نحو تقريبيّ، كم سيكون البعد بين كلّ هدبتين لامعتين متجاورتين على الستارة؟

النّهج: الموقع الزاوي للهدب اللامعة (التّداخل البناء) يمكن معرفته باستعمال (المعادلة 24 – 2أ). البعد بين أول هدبتين (مثلا) يحسب باستعمال المثلثين القائمين كما في (الشّكل 24 – 10).

الحلّ: بمعرفة أنّ $\lambda = 500 \times 10^{-9}\ \text{m}$, $d = 0.100\ \text{mm} = 1.00 \times 10^{-4}\ \text{m}$, و $L = 1.20\ \text{m}$، فالهدبة ذات الرتبة $(m = 1)$ تقع عن الزاوية θ حيث

$$\sin\theta_1 = \frac{m\lambda}{d} = \frac{(1)(500 \times 10^{-9}\ \text{m})}{1.00 \times 10^{-4}\ \text{m}} = 5.00 \times 10^{-3}$$

وهذه زاوية صغيرة جدًّا ويمكننا اعتبار $\sin\theta \approx \theta$، حيث θ بالزاوية النصف قطرية. الهدبة ذات الرتبة الأولى ستقع على بعد x_1 فوق مركز الستارة (انظر الشّكل 24 – 10) وتعطى بـ $x_1/L = \tan\theta_1 \approx \theta_1$، وهكذا

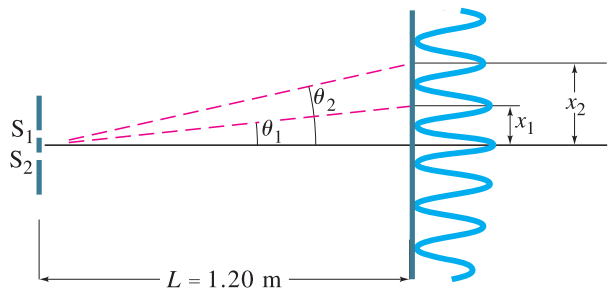
$$x_1 \approx L\theta_1 = (1.20\ \text{m})(5.00 \times 10^{-3}) = 6.00\ \text{mm}$$

أمّا الهدبة الثانية $(m = 2)$ فستكون عند

$$x_2 \approx L\theta_2 = L\frac{2\lambda}{d} = 12.0\ \text{mm}$$

فوق المركز. وهكذا، فالبعد بين كلّ هدبتين متجاورتين هو 6.00 mm.

تنويه:
استعمل التقريب $\theta \approx \sin\theta$ أو $\theta \approx \tan\theta$ فقط إذا كانت θ زاوية صغيرة وبالتقدير الدائري.



الشّكل 24 – 10 (المثالان 24 – 1، و 24 –2) للزوايا الصغيرة، تتكون هدب التّداخل عند $x = \theta L$ بعد فوق الهدبة المركزية $(m = 0)$؛ θ_1، و x_1 هي للهدبة ذات الرتبة الأولى $(m = 1)$، θ_2 هي للرتبة $m = 2$.

المثال المفاهيمي 24-2 تغيير الطّول الموجيّ

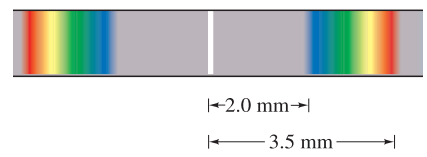
(أ) ماذا يحدث لنمط التّداخل المبين في (الشّكل 24 – 10)، (المثال 24 – 1)، عند استبدال الضّوء الساقط $\lambda = 500\ \text{nm}$ بضوء طول موجته 700 nm؟ (ب) ماذا يحدث لو بقي طول الموجة 500 mn ولكن بُعد الشّقّين أكثر؟

الجواب: (أ) عندما تزداد λ في (المعادلة 24 – 2 أ) في حين تبقى المسافة d ثابتة، فإنّ الزاوية θ للهدب اللامعة تزداد وينتشر نمط التّداخل (يتمدّد). (ب) زيادة البعد بين الشّقّين d تقلل θ لكلّ هدبة، وهكذا تقترب الهدب أكثر.

من (المعادلة 24 – 2) يمكننا إدراك أنّه، فيما عدا الهدبة ذات الرتبة صفر عند المركز، فإنّ موقع الهدب يعتمد على طول الموجة. وهكذا، عند سقوط ضوء أبيض على الشّقّين، وكما وجد يونغ في تجاربه، فإنّ الهدبة المركزية تكون بيضاء، ولكن الهدبة الأولى (والأعلى رتبة) تحتوي على طيف من الألوان كما في قوس المطر؛ حيث وجد أنّ θ تكون الأقل للضّوء البنفسجيّ، والأكبر للضّوء الأحمر (الشّكل 24 – 11). وبقياس مواقع هذه الهدب، كان يونغ أول من قاس الأطوال الموجيّة للضّوء المرئيّ (باستعمال المعادلة 24 – 2). وبعمله هذا، تبيّن يونغ أنّ ما يميّز الألوان المختلفة هو أطوالها الموجيّة (أو ترددها)، وهي الفكرة التي ذكرها غريمالدي عام 1665.

الطّول الموجيّ (أو التردد) يحدد اللون.

الشّكل 24 – 11 الهدب ذات الرتبة الأولى هي طيف كامل، كذلك (المثال 24 – 3).



المثال 24-3 حساب الأطوال الموجيّة من تداخل الشّقّ – المزدوج

يمرُّ ضوء أبيض عبر شقين البعد بينهما 0.50 mm، ويلاحظ نمط التّداخل على ستارة بعدها 2.5 m. تحاكي الهدبة الأولى قوس المطر حيث الضّوء البنفسجيّ والأحمر عند النهايتين. الضّوء البنفسجيّ عند 2.0 mm والأحمر عند 3.5 mm من المركز (الشّكل 24 – 11). خمّن الأطوال الموجيّة لكلّ من الضّوءين البنفسجيّ والأحمر.

النّهج: نجد الزاويتين لكلٍّ من الضّوء البنفسجيّ والأحمر من المسافات المعطاة و (الشّكل 24-10). ثمّ نستعمل (المعادلة 24 – 2أ) للحصول على الأطوال الموجيّة. لأنّ 3.5 mm أصغر بكثير من 2.5 m يمكننا استعمال تقريب الزوايا الصغيرة.

الحلّ: نستعمل (المعادلة 24 – 2أ) حيث $m = 1$. وبذلك، $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$. ثمّ للضّوء البنفسجيّ $x = 2.0\,\text{mm}$، كذلك (انظر الشّكل 24 – 10)

$$\lambda = \frac{d\sin\theta}{m} \approx \frac{d\theta}{m} \approx \frac{d}{m}\frac{x}{L} = \left(\frac{5.0\times10^{-4}\,\text{m}}{1}\right)\left(\frac{2.0\times10^{-3}\,\text{m}}{2.5\,\text{m}}\right) = 4.0\times10^{-7}\,\text{m}$$

أو 400 nm. وللضّوء الأحمر $x = 3.5\,\text{mm}$، أي

$$\lambda = \frac{d}{m}\frac{x}{L} = \left(\frac{5.0\times10^{-4}\,\text{m}}{1}\right)\left(\frac{3.5\times10^{-3}\,\text{m}}{2.5\,\text{m}}\right) = 7.0\times10^{-7}\,\text{m} = 700\,\text{nm}$$

التمرين A: للترتيب العملي في (المثال 24 – 3)، على أيّ بعد من الهدبة المركزية البيضاء تقع الهدبة ذات الرتبة الأولى للضّوء الأخضر ذي الطّول الموجيّ $\lambda = 500\,\text{nm}$؟

الضّوء المترابط.

الشّقّان في (الشّكل 24 – 7) يعملان كما لو كانا مصدرين للإشعاع. ويسميّان **مصدرين مترابطين**؛ لأنّ الموجتان الصادرتان عنهما لهما الطّول الموجيّ والتردّد نفساهما، ولهما كذلك الطور ذاته في الأوقات جميعها. ويحدث ذلك لأنّ الموجات تأتي من مصدر واحد إلى يسار الشّقّين في (الشّكل 24 – 7). يمكن ملاحظة نمط الخيود فقط إذا كان المصدران مترابطين. ولو تم وضع مصدرين (مصباحين) صغيرين في مكان الشّقّين فلن نرى نمط التّداخل؛ لأنّ الضّوء النّاتج من أحد المصباحين سيكون له طور عشوائيّ مع ضوء المصباح الثاني، وسوف تكون إضاءة الستارة إلى حدٍّ ما منتظمة. ويُسَمّى المصدران من هذا النوع حيث لا يوجد بين ضوءيهما علاقة طور ثابتة **مصدرين غير مترابطين**.

المصادر المترابطة وغير المترابطة.

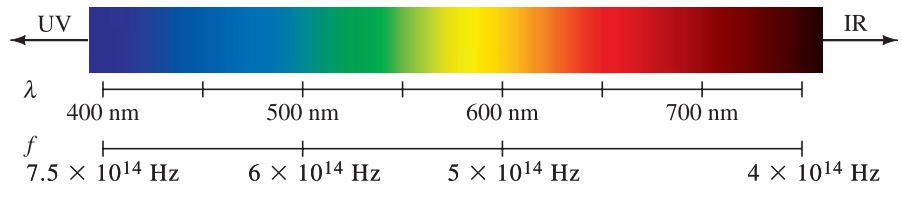
يحدث التّداخل فقط إذا كانت المصادر مترابطة (منسجمة ذاتيًا).

4-24 الطّيف المرئيّ والتّفريق اللوني

وهكذا، فإنّ أوضح خاصيتين من خصائص الضّوء يمكن وصفهما بدلالة النّظريّة الموجيّة للضّوء؛ أي شدة الضّوء أو لمعانه ولونه. إنّ **شدة الضّوء** هي الطّاقة التي تحملها الموجة لكلّ وحدة مساحة في وحدة الزمن، وترتبط بمربع اتساع الموجة، مثل أيّ نوع من الموجات (انظر البند 11 – 10، أو المعادلتين 22 – 7، و 22 – 8). ويرتبط **لون** الضّوء بتردده f أو بطول موجته λ. (نذكر أنّ $\lambda f = c = 3.0\times10^8\,\text{m/s}$، المعادلة 22 – 4). يتكون الضّوء المرئيّ –الذي تشاهده عيوننا – من ترددات تبدأ بـ $4\times10^{14}\,\text{Hz}$ إلى $7.5\times10^{14}\,\text{Hz}$ وتقابل أطوالًا موجيّة في الهواء من 400 nm إلى 750 nm.* وهذا ما يعرف **بالطّيف المرئيّ** الذي تقع ضمنه الألوان المختلفة من البنفسجيّ حتى الأحمر، كما يبين (الشّكل 24 – 12). يُسَمّى الضّوءُ ذو الطّول الموجيّ الأقلّ من 400 nm **الضّوءَ فوق البنفسجيّ** (UV) أما الضّوء ذو الطّول الموجيّ الأكبر من 750 nm فيدعى **الأشعةَ تحت الحمراء** (IR).** وعلى الرغم من أنّ عين الإنسان ليست حسّاسةً للأشعتين UV، و IR، إلاّ أنّ بعض أجهزة الكشف والأفلام الحسّاسة، تستجيب لهما.

* يستعمل أحيانًا الإنجستروم (Å) عند الحديث عن الضّوء: $1\,\text{Å} = 1\times10^{-10}\,\text{m}$. الضّوء المرئيّ في الهواء له أطوال موجية تتراوح بين 4000 Å، و 7500 Å .

** الطّيف الكهرومغناطيسيّ المرئيّ مبيّن في (الشّكل 22 – 8).

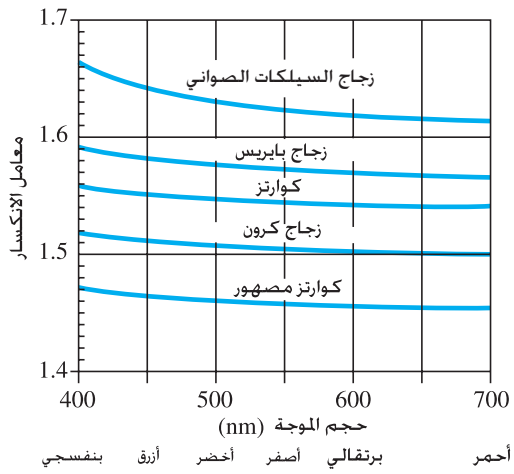


الشّكل 24 – 12. طيف الضّوء المرئيّ، مبينًا مدى التردد والطّول الموجيّ (في الهواء) للألوان المختلفة.

[تمّ قياس الأطوال الموجيّة للضَّوء المرئيّ في الهواء ووجدت أنّها تتراوح بين 400 nm إلى 750 nm. وهذا المدى هو ما نشير إليه عادة. لكن، وكما سنرى في (الفصل 25)، فإنّ داخل العين مملوء بسائل معامل انكساره $n \approx 1.4$ ولذلك، فإنّ الأطوال الموجيّة التي تصل إلى الشبكية في عيوننا ستكون أقلّ بهذا المعامل، المعادلة 24 – 1.]

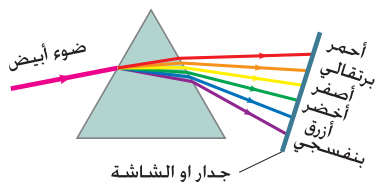
يفصل المنشور الضَّوء الأبيض إلى قوس المطر من الألوان، كما في (الشّكل 24 – 13). ويحدث ذلك لأنّ معامل الانكسار للمادة يعتمد على الطّول الموجيّ، كما هو واضح لكثير من المواد في (الشّكل 24 – 14). إنّ الضَّوء الأبيض مزيج من الأطوال الموجيّة المرئيّة كلّها، وعند سقوطه على المنشور، كما في (الشّكل 24 – 15)، فإنّ الأطوال الموجيّة المختلفة تنكسر بزوايا مختلفة. ولأنّ معامل الانكسار أكبر للأطوال الموجيّة الأصغر، فإنّ الضَّوء البنفسجيّ هو الأكثر انكسارًا والأحمر هو أقلّها. إنّ انتشار (تحليل) الضَّوء الأبيض هذا إلى الألوان المختلفة (الطّيف الكلّي) يدعى التّفريقَ اللونيَّ.

الشّكل 24 - 13. يتحلل الضَّوء الأبيض الساقط إلى ألوانه المختلفة.



الشّكل 24 – 14 معامل الانكسار كدالة بالطّول الموجيّ لمواد صلبة شفافة متعددة.

الشّكل 24 – 15. تحليل الضَّوء الأبيض في المنشور إلى الطّيف المرئيّ.

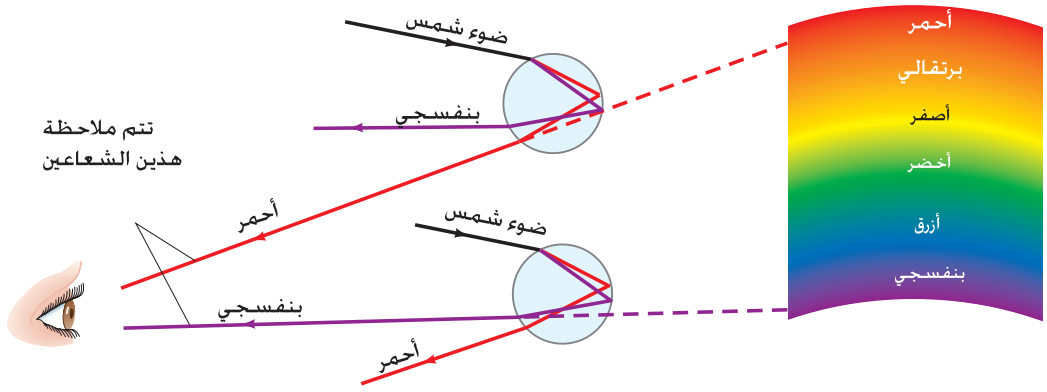


تطبيق الفيزياء
قوس المطر

ويُعَدُّ قوسُ المطر مثالًا حيًّا على التّفريق اللوني – بواسطة قطرات المطر. يمكنك مشاهدة قوس المطر عند النظر إلى رذاذ الماء الساقط ومن خلفه الشّمس. ويبين (الشّكل 24 – 16) كيفيّة انثناء الأشعة الحمراء والبنفسجيّة بواسطة قطرات الماء الكروية، وكيفيّة انعكاسها على السطح الخلفي للقطرة. ينثني الضَّوء الأحمر قليلا. ولذلك، يصل العين من القطرات العلوية في السماء، كما هو مبيّن في الشّكل. لذا، يكون أعلى القوس أحمر اللون.

الشّكل 24 – 16 (أ) رسم تخطيطي يبين كيفية تكوّن قوس المطر (ب)

(ب)



(أ)

الشّكل 24 – 17. الألماس.

يحقّق الألماس لمعانه (الشّكل 24 – 17) من خلال الجمع بين التّفريق اللوني والانعكاس الداخلي الكلّيّ. ولأنّ للألماس معامل انكسار كبيرًا، 2.4 تقريبًا، فإنّ الزاوية الحرجة للانعكاس الداخليّ الكلّيّ هي 25° تقريبًا. فالضَّوء المتفرق إلى طيف من الألوان داخل الألماس يقع على العديد من السطوح الداخلية قبل أن يصطدم بأحدها بزاوية أقل من 25° ويخرج. وبعد انعكاسات كثيرة، فإنّ الضَّوء يكون قد قطع مسافة كبيرة بحيث تنفصل الألوان بصورة كبيرة لتُرى لامعة بالعين بعد مغادرتها البلّورة.

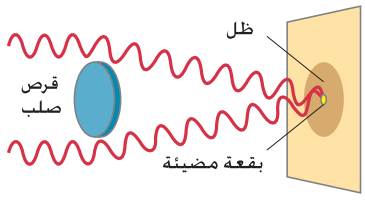
إنّ الطّيف المرئيّ (الشّكل 24 – 12) لا يُظهر الألوان التي نراها في الطّبيعة جميعها. فمثلًا، ليس هناك لونٌ بنيٌّ في (الشّكل 24 – 12). كثيرٌ من الألوان التي نراها هي مزيج من الأطوال الموجيّة. وللأغراض العملية، فإنّ معظم الألوان الطبيعية يمكن الحصول عليها باستعمال ثلاثة ألوان أساسيّة هي الأحمر، والأخضر، والأزرق، كما هو الحال في التلفزيون TV، وأجهزة الحاسوب. أمّا في حبر الطباعة، فالألوان الأساسية هي الأزرق الغامق، والأصفر، والأحمر الأرجواني (اللون المستعمل هنا لبيان الأشعة الضوئية).

5-24 حيود الشّقّ المنفرد أو القرص

لقد وضعت تجربة يونغ للشق المزدوج النّظريّة الموجيّة على أساسٍ قويٍّ. ولكن القبول الكامل لها أتى فقط مع دراسة الحيود (البند 24 – 1)، وقد رأينا أنها ترتبط بانتشار الموجات أو انحنائها حول الحواف. دعنا ننظر لذلك بتفاصيل أكثر.

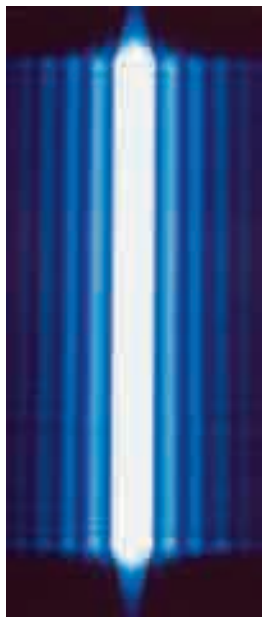
في عام 1819 قدم أغستين فرينل للأكاديمية الفرنسية نظرية موجية للضّوء استنتجت وفسّرت الآثار المختلفة في التّداخل والحيود. وفي غضون ذلك قدم سيمون بوصون (1781 – 1840) استدلالا مضادًا: فوفقا لنظرية فرينل الموجيّة، إذا سقط ضوء من مصدر نقطي على حواف قرص صلب، فإنّ جزءًا من الضّوء الساقط سيحيد عند الحافة، وسوف يتداخل تداخلا بناءً عند مركز الظل (الشّكل 24 – 18). وقد بدا هذا التنبؤ غير محتمل. ولكن عندما أجريت التجربة بالفعل على يد فرانكو اراغو، أمكن رؤية البقعة المضيئة عند مركز الظل تمامًا. (الشّكل 24 – 19أ). وقد كان هذا دليلا قويّا للنظرية الموجيّة.

(الشّكل 24 – 19أ) صورة للظلِّ النّاتج من قطعة نقود باستعمال (تقريبًا) مصدر نقطي للضّوء، ليزر في هذه الحالة. البقعة المضيئة موجودة بوضوح في المركز. لاحظ أيضًا الهدب المضيئة والمعتمة خارج الظل. إنّها تشبه هدب التّداخل لشق مزدوج. وبالفعل، إنها تعود لتداخل موجات الحيود حول القرص، ويدعى ذلك بنمط الحيود. يتكون نمط الحيود حول أي جسم حاد مضاء من مصدر نقطي، كما هو مبين في (الشّكلين 24 – 19 ب و جـ). لكننا لا ندرك ذلك دائمًا؛ لأنّ معظم مصادر الضّوء في الحياة اليومية ليست نقطية. لذلك، فإنّ الضّوء من الأجزاء المختلفة للمصدر تمحو نمط الحيود.



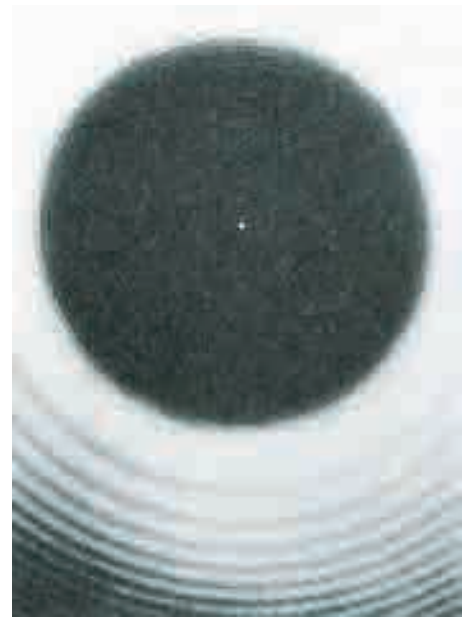
الشّكل 24 – 18 لو كان الضّوء موجة، فستظهر بقعة لامعة عند مركز الظل لقرص مضاء بواسطة مصدر نقطي وحيد اللون.

بقعة الحيود (غير) المتوقعة.



(ج)

(ب)

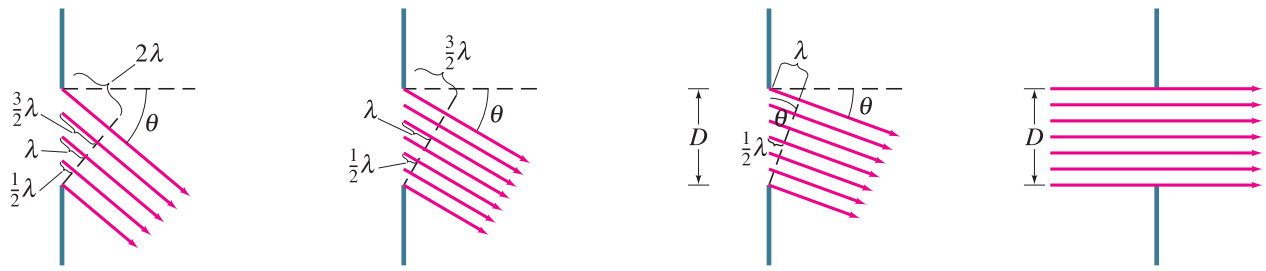


(أ)

الشّكل 24 – 19 نمط حيود (أ) قرص دائري (قطعة نقود) (ب) مقص (جـ) شق منفرد يُضاء بمصدر نقطي (تقريبًا) لضوء وحيد اللون.

لرؤية كيف ينشأ نمط الحيود؛ سنحلّل الحالة المهمّة لضوء وحيد اللون يمرّ خلال فتحة ضيقة. سوف نفرض أشعة متوازية (موجات مستوية) لضوء يسقط على شق عرضه D، ويمرّ إلى شاشة بعيدة جدًّا*. وكما نعرف من دراسة موجات الماء ومن مبدأ هويغنز، فإنّ الموجات التي تعبر الشّقّ تمتد لتنتشر في الاتجاهات جميعها. وسنختبر الآن كيف أنّ الموجات التي تعبر أجزاءً مختلفة من الفتحة تتداخل معًا.

إنّ الأشعة المتوازية لضوء وحيد اللون تمرّ خلال شق ضيق كما هو مبين في (الشّكل 24 – 20أ). يسقط الضّوء على شاشة بعيدة، لذلك فالأشعة المتجهة نحو أيّ نقطة على الشاشة ستكون متوازية تقريبًا قبل أن تلتقي. نعتبر أولا الأشعة التي تمر مباشرة كما في (الشّكل 24 – 20أ) أنها كلها في الطور نفسه. لذا، ستكون بقعة مضيئة عند منتصف الشاشة. في (الشّكل 24 – 20ب). نعتبر أشعة تنتقل بزاوية، بحيث يسير الشّعاع عند قمة الفتحة مسافة طول موجة أبعد من الشّعاع القادم من أسفل الفتحة للوصول إلى الشاشة. أمّا الشّعاع القادم من منتصف الفتحة فيسير بمقدار نصف طول موجة أبعد من الشّعاع القادم من أسفل هذه الفتحة. هذان الشّعاعان سوف يكونان مختلفين في الطور بصورة تامة عندما يتداخلان تداخلا هدّامًا عند الشاشة. وبصورة مماثلة، فإنّ شعاعًا فوق أسفل الفتحة قليلا سوف يلغي شعاعًا على البعد نفسه فوق الشّعاع عند المنتصف. وفي الواقع، فإنّ كلّ شعاع يمرّ خلال النصف السفلي للفتحة سوف يلغي الشّعاع المناظر الذي يمر خلال النصف العلويّ.



(أ) $\theta = 0$ (ب) $\sin\theta = \frac{\lambda}{D}$ (ج) $\sin\theta = \frac{3\lambda}{2D}$ (د) $\sin\theta = \frac{2\lambda}{D}$

الشّكل 24 – 20 تحليل نمط الحيود المتكوّن للضّوء المار خلال شق ضيق.

وهكذا، فالأشعة كلّها تتداخل تداخلاً هدّامًا بصورة زوجية. ولذلك، تكون شدة الضّوء صفرًا على الشاشة عند هذه الزاوية.

الزاوية θ التي يحصل عندها ذلك يمكن رؤيتها من (الشّكل 24 – 20 ب)، وتكون عند $\lambda = D\sin\theta$ أي أنّ

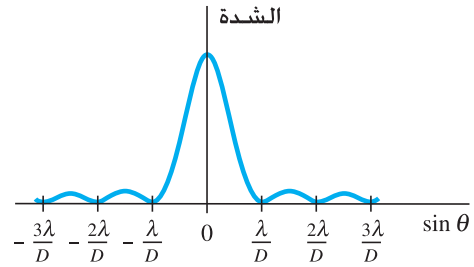
معادلة الحيود (نصف العرض الزاوي للنقطة المركزية)

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{D} \qquad \text{[أول شدة دنيا]} \qquad \textbf{(أ3 – 24)}$$

تكون شدة الضّوء عظمى عند $\theta = 0°$، وتقلّ إلى قيمة دنيا (شدة = صفرا) عند الزاوية التي تعطى بالعلاقة (أ3 – 24).

والآن، نأخذ زاوية θ أكبر بحيث ينتقل الشّعاع العلوي مسافة $\frac{3}{2}\lambda$، أكبر من مسافة الشّعاع السفلي، الشّكل (24 – 20 جـ) في هذه الحالة، الأشعة من الثلث السفلي سوف تلغى بصورة زوجية مع الأشعة من الثلث الأوسط؛ لأنّها ستكون مختلفة في الطور بمقدار $\lambda/2$. وعلى أيّ حال، فإنّ الضّوء من الثلث العلوي سوف يصل الشاشة. لذلك، ستكون هناك بقعة مضيئة عند $\theta \approx 3\lambda/2D$. ولكنها لا تكون بالإضاءة نفسها للبقعة عند $\theta = 0°$، ولزاوية θ أكبر بحيث يسير الشّعاع العلوي بمقدار $\lambda/2$ أكبر من الشّعاع السفلي، (الشّكل 4 – 20 د)، فإنّ الأشعة من الربع السفلي للفتحة سوف تلغي الأشعة من الربع المجاور؛ لأنّ فرق المسار الضّوئيّ سيختلف بـ $\lambda/2$. أمّا الأشعة من الربع الأعلى المجاور فسوف تلغي الأشعة من الربع الأول في الأعلى. وعند هذه الزاوية، ستكون الإضاءة أقلّ ما يمكن على الشاشة.

* إن لم تكن الشاشة بعيدة، فيمكن استعمال عدسات لتجعل الأشعة متوازية.



الشّكل 24 – 21. شدة الضّوء في نمط الحيود لشق منفرد كدالة مع $\sin\theta$ لاحظ أنّ الهدبة المركزية ليست أعلى بكثير من حيث شدة الضّوء، بل إنّ عرضها أيضًا ضعف $(2\lambda/D)$ عرض أيّ هدبة أخرى (فقط λ/D).

يوضح (الشكل 21-24) رسم شدة الضّوء كدالّة مع الزاوية. وهذا يتفق تمامًا مع الصورة في (الشّكل 24 – 19 جـ). لاحظ أنّ قيمًا دنيا (شدة الضوء تساوي صفرًا) تحدث عند

$$D\sin\theta = m\lambda, \qquad m = 1, 2, 3, \cdots, \qquad \text{[قيم دنيا]} \qquad \textbf{(24 – 3ب)}$$

قيم دنيا لحيود الشق الواحد.

وهناك بين القيم الدنيا قيمٌ عظمى تحدث عند $m \approx \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \cdots$ تقريبًا

لاحظ أنّ القيم الدنيا لنمط حيود (المعادلة 24 – 3 ب) تحقق شروطًا مشابهة لتلك التي للقيم العظمى (البقع المضيئة) للتداخل في الشّقّ المزدوج (المعادلة 24 – 2أ). لاحظ أيضًا أنّ D هو عرض شق منفرد. أمّا d في (المعادلة 24 – 2) فهي المسافة بين الشّقّين.

تنويه:
ميّز بين (المعادلة 24 – 2) للتداخل و (المعادلة 24 – 3) للحيود، لاحظ الفروق.

المثال 4-24 القيم العظمى لحيود الشّقّ – المنفرد

يمرّ ضوء طول موجته 750 nm عبر شق عرضه 1.0×10^{-3} mm. ما عرض الهدبة المركزية العظمى على شاشة تبعد 20 cm (أ) بالدرجات؟ (ب) بالسنتيمترات؟

النّهج: يبدأ عرض الهدبة من القيمة الدنيا في جانب إلى القيمة الدنيا في الجانب المقابل. نستعمل (المعادلة 24 – 3أ) لإيجاد الموقع الزاوي للقيمة الدنيا في حيود الشّقّ المنفرد.

الحلّ: (أ) تقع القيمة الدنيا الأولى عند

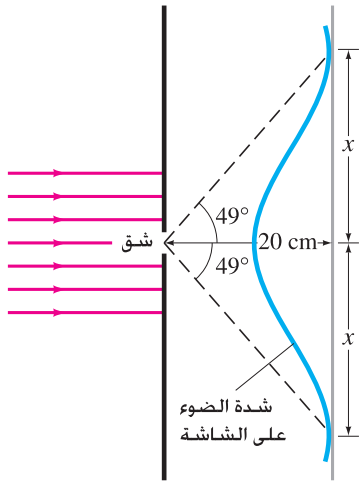
$$\sin\theta = \frac{\lambda}{D} = \frac{7.5 \times 10^{-7}\,\text{m}}{1 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 0.75$$

وهكذا، فإنّ $\theta = 49°$ وهذه هي الزاوية بين المركز والقيمة الدنيا الأولى، (الشّكل 24 – 22). إذن، الزاوية التي تقابل الهدبة المركزية كاملة الواقعة بين القيمة الدنيا أعلى المركز وتلك أسفله ، ضعف هذه القيمة، أي $98°$

(ب) عرض الهدبة المركزية العظمى هو $2x$، حيث $\tan\theta = x/20\,\text{cm}$

لذلك $2x = 2(20\,\text{cm})(\tan 49°) = 46\,\text{cm}$

ملحوظة: عرضٌ كبيرٌ من الشاشة سيكون مضاء، ولكنّه لا يكون لامعًا عادة؛ لأنّ الضّوء الذي يمرّ من فتحة ضيقة كهذه سيكون قليلا، ويتوزع على مساحة كبيرة. لاحظ أيضًا أنّنا لا نستطيع استعمال تقريب الزاوية هنا $(\theta \approx \sin\theta \approx \tan\theta)$؛ لأنّ θ كبيرة.



الشّكل 24 – 22. (المثال 4-24)

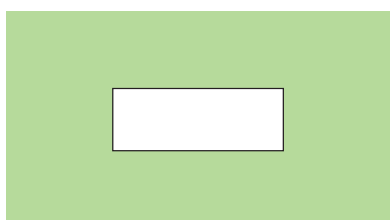
التمرين B: في (المثال 24 – 4)، استعمل الضّوء الأحمر $(\lambda = 750\,\text{nm})$، ولكن لو استعملنا الضّوء الأصفر $(\lambda = 550\,\text{nm})$ فهل ستكون الهدبة المركزية أكثر عرضا أم أقلّ؟

المثال المفاهيمي 5-24 امتداد الحيود

يسطع الضّوء عبر فتحة مستطيلة بصورة أضيق بالاتجاه العمودي عمّا هو عليه في الاتجاه الأفقي، (الشّكل 24 – 23). (أ) أي الاتجاهين تتوقع أن يمتد نمط الحيود به: العمودي أم الأفقي؟ (ب) هل يفضل أن تكون سماعة في ملعب ما مستطيلة وعالية وضيقة، أم عريضة ومنبسطة ؟

الجواب: (أ) من (المعادلة 24 – 3أ)، يمكننا أن نرى أنّه إذا جعلنا الشّقّ (عرض D) أضيق، فإنّ النمط يمتد أكثر. وهذا ينسجم مع دراستنا للموجات في (الفصل 11). الحيود خلال الفتحة المستطيلة سيكون أوسع عموديًا؛ لأنّ الفتحة أصغر في ذلك الاتجاه.

(ب) بالنسبة إلى السماعة، نمط الصّوت المطلوب هو الذي يمتد أفقيًّا. لذا، يفضل أن يكون طويلًا وضيقًا (أدر الشّكل 24 – 23 بمقدار $90°$).



الشّكل 24 – 23 (المثال 24-5).

6-24 محزّزة (شبكة) الحيود

تُعرّفُ المجموعةُ الكبيرة من الحزوز متساوية المسافات البينية بـ **محزوزة الحيود**. على الرغم من أنّ مصطلح "شبكة التّداخل" يمكن أن يكون ملائمًا أيضًا. يمكن عمل محززات الحيود بآلات دقيقة بخطوط رفيعة جدًّا على صفيحة من الزجاج. وتعمل المناطق غير الملموسة بين الخطوط كشقوق. وتخدم الشفافيات التصويرية للمحززات الأصلية كمحززات زهيدة الثمن. إنّ المحززات التي تحتوي 10،000 خط في السنتيمتر الواحد شائعة، ومفيدة جدًّا في قياس الأطوال الموجيّة بصورة دقيقة. وتُسَمّى محززةُ الحيود التي تحتوي على شقوق شبكةً منفذة. وهناك نوع آخر يُسَمّى **الشبكة الانعكاسية**، وهي تصنع بتخطيط الخطوط على سطح معدنيّ أو زجاجيّ، حيث ينعكس عنه الضّوء ليتم تحليله. التحليل هو نفسه كما في الشبكة المنفذة التي سنناقشها الآن.

إنّ تحليل محززة الحيود يشبه كثيرًا تحليل تجربة الشّقّ المزدوج ليونغ. نفرض أشعة متوازية تسقط على محززة كما هو مبين في (الشّكل 24 – 24). ونفرض كذلك أنّ الشّقّوق ضيقة لدرجة كافية بحيث ينشر كلّ شقّ الضّوء بزاوية واسعة على شاشة بعيدة عن هذه الحزوز كلّها. تتداخل الأشعةُ الضوئية التي تعبر كلّ شقّ دون انحراف $(\theta = 0°)$ تداخلا بناءً لينتج خطّ لامع في مركز الشاشة. وينتج كذلك تداخل بناء عند زاوية θ بحيث تسير الأشعة القادمة من فتحات متجاورة مسافة إضافية $\Delta l = m\lambda$، حيث m عدد صحيح. إذا كانت d المسافة بين كلّ فتحتين متجاورتين، فسنرى عندئذٍ من (الشّكل 24 – 24) أنّ $\Delta l = d \sin\theta$، و

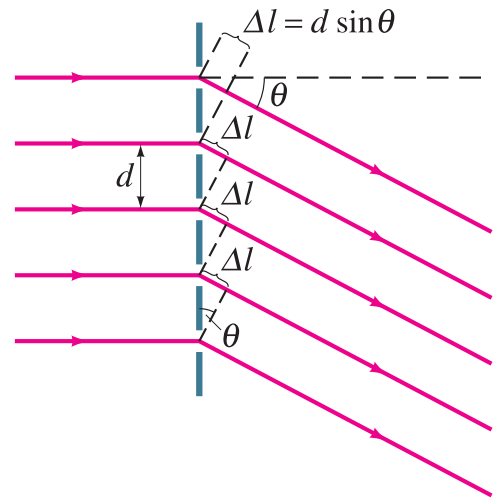
$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d}, \qquad m = 0, 1, 2, \cdots \qquad \textbf{(4 – 24)} \quad [\text{الهدب اللامعة الرئيسة}]$$

هو المعيار للحصول على هدبة لامعة. إنّ هذه المعادلة هي نفسها للشق المزدوج. كما أنّ m تسمى الرتبة في النمط.

ولكنّ هناك فرقًا مهمًّا بين الشّقّ المزدوج ونمط الحزوز المتعددة، وهو أنّ الهدب اللامعة في المحززة أكثر حدّة وأضيق. لماذا؟

نفرض أنّنا زدنا قيمة الزاوية θ قليلًا خارج ما هو مطلوب للحصول على الهدبة اللامعة. في حالة وجود شقين فقط، فإنّ الموجتين ستكونان مختلفتين في الطور بصورة قليلة، ولذلك يحدث تداخل بناء بصورة تقريبية. وهذا يعني أنّ الهدب اللامعة ستكون أعرض (انظر الشّكل 24 – 10). وفي المحززة، فإنّ الموجات من شقّ معين، والشّقّ المجاور له لا تكون مختلفة الطور بصورة جوهرية. ولكن الموجات من شقّ معين وتلك التي من شقّ آخر على بعد عدد قليل من مئات الحزوز، يمكن أن تكون مختلفة الطور تمامًا، والضّوء كلّه أو قريبًا من ذلك يحذف بصورة زوجية بهذه الطريقة. مثلا، افرض أنّ الزاوية θ تختلف قليلًا عن قيمتها عند الرتبة الأولى، بحيث إنّ الزيادة في طول المسار الضوئي لزوج من الفتحات المتجاورة لا يساوي λ بالضبط، بل 1.0010λ. الموجة من خلال فتحة، والموجة من فتحة أخرى على بعد 500 فتحة منها سيكون بينهما فرق في المسار الضوئي يساوي $(500)(0.001\lambda) = 1.5000\lambda$؛ أي $1\lambda +$ $1\frac{1}{2}$ طول الموجة. لذا، سوف تفنى الموجتان. كما أنّ زوجا من الفتحات تحت كلّ واحدة من الزوج السابق سوف يفنى أيضا؛ أي أنّ الضّوء من الفتحة 1 والفتحة 501 سوف يفنى، كما سيفنى الضّوء من الفتحة 2 والفتحة 502 ، وهكذا. وحتى لزاوية صغيرة جدًّا* تقابل فرقا في المسار الضوئي $\frac{1}{1000}\lambda$ سيكون هناك فناء كذلك. وبالتالي، ستكون الهدب اللامعة ضيقة جدًّا. وكلما كان عدد الحزوز أكبر في المحززة، تكون قمم الهدب أكثر دقة (انظر الشّكل 24 – 25). ولأنّ المحززة تنتج هدبًا أكثر حدّة ولمعانًا أكثر من الشّقّ المزدوج، لذلك فهي أداة أكثر دقة لقياس الأطوال الموجيّة.

افرض أنّ الضّوء الساقط على المحززة ليس وحيد اللون، بل يتكون من موجتين أو أكثر محددة الأطوال الموجيّة. عندها، لكلّ رتبة ما عدا $m = 0$، تنتج كلّ موجة هدبًا لامعة عند زوايا مختلفة (الشّكل 24 – 26أ)، تمامًا كما في الشّقّ المزدوج. وإذا سقط على المحززة ضوء أبيض، فالهدبة المركزية $(m = 0)$ ستكون هدبة لامعة بيضاء حادة.



الشّكل 24 – 24 محززة الحيود.

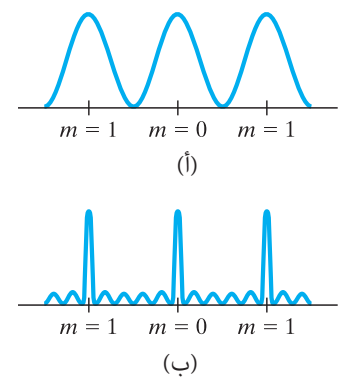
الهدب اللامعة في محززة الحيود (m = الرتبة).

تنويه:

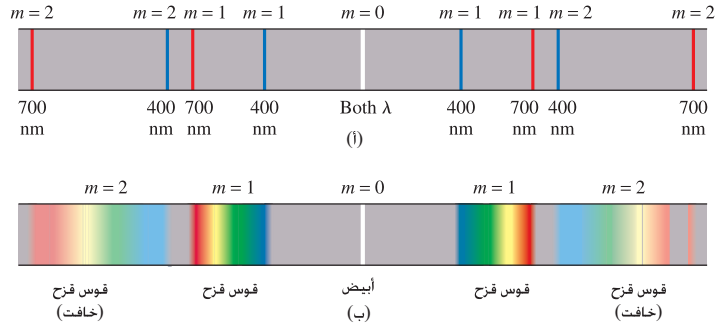
تحلل محززة الحيود باستعمال صيغ التّداخل وليس صيغ الحيود.

لماذا تنتج الشقوق الكثيرة قمم أكثر وضوح.

الشّكل 24 – 25 شدة الضّوء كدالة بزاوية النظر θ (أو الموقع على الشاشة) لـ (أ) شقّ مزدوج. (ب) ست فتحات. لمحززة الحيود، عدد الحزوز كبير جدًّا $(\approx 10^4)$ وتكون الهدب أكثر حدة.



* بالاعتماد على العدد الكلّي للحزوز، قد يكون هناك فناء تام أو غير تام عند هذه الزاوية. لذا، ستكون هناك قمم (هدب) صغيرة بين الهدب الرئيسة (انظر الشّكل 24 – 25 ب). ولكنها تكون ضعيفة، وصعبة الرؤية.



الشّكل 24 – 26 أطياف ناتجة بواسطة محززة: (أ) موجتان طولاهما 400 nm، و 700 nm؛ (ب) ضوء أبيض. الرتبة الثانية ستكون أكثر خفوتا من الرتبة الأولى. (الرتب الأعلى ليست مبينة). إذا كانت الأبعاد بين الحزوز صغيرة بما يكفي، فإنّ الرتب الثانية والأعلى ستكون مفقودة.

أمّا للرتب الأخرى فسيكون هناك طيفٌ محدّدٌ للألوان ينتشر على زوايا ذات عرض معين. (الشّكل 24 – 26ب). ولأنّ محززة الحيود تباعد الضَّوء إلى مركباته الموجيّة. فإنّ النمط الناتج يسمى **الطّيفَ**.

المثال 6-24 محززة الحيود: خطوط

حدّد المواقع الزاوية للهدب اللامعة للرتبتين الأولى والثانية للأطوال الموجيّة 400 nm، و 700 nm الساقطة على المحززة التي تحتوي 10,000 خط / cm.

النّهج: نجد أولا المسافة d بين الشّقّوق؛ إذا كان في المحززة عددٌ من الخطوط N في 1 m. فإنّ المسافة بين كلّ خطين متجاورين $d = 1/N$ m. ثم نستعمل (المعادلة 24 – 4) لحساب الزوايا للموجتين للرتبة $m = 1$ و$m = 2$.

الحلّ: تحتوي المحززة على $1.00 \times 10^4 \text{ lines/cm} = 1.00 \times 10^6 \text{ lines/m}$، وهذا يعني أنّ

$$d = (1/1.00 \times 10^6)\,\text{m} = 1.00 \times 10^{-6}\,\text{m} = 1.00\,\mu\text{m}$$

في الرتبة الأولى ($m = 1$) تكون الزوايا

$$\sin\theta_{400} = \frac{m\lambda}{d} = \frac{(1)(4.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{1.00 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 0.400$$

$$\sin\theta_{700} = \frac{(1)(7.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{1.00 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 0.700$$

لذلك $\theta_{400} = 23.6°$ و $\theta_{700} = 44.4°$. وفي الرتبة الثانية.

$$\sin\theta_{400} = \frac{2\lambda}{d} = \frac{(2)(4.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{1.00 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 0.800$$

$$\sin\theta_{700} = \frac{(2)(7.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{1.00 \times 10^{-6}\,\text{m}} = 1.40$$

وهكذا، فإنّ $\theta_{400} = 53.1°$. ولكن الرتبة الثانية لـ $\lambda = 700$ nm ليست موجودة؛لأنّ جيب الزاوية يجب ألا يزيد على 1. ولن تظهر رتب أعلى.

المثال 7-24 تطابق (تراكب) الأطياف

يحتوي ضوء أبيض على الموجات بأطوال من 400 nm إلى 750 nm. ويسقط على محززة حيود تحتوي على 4000 lines/cm برهن أنّ الضَّوء الأزرق بطول موجة $\lambda = 450$ nm في الرتبة الثالثة يتطابق (يتراكب) مع الضَّوء الأحمر بطول موجة 700 nm في الرتبة الثانية.

النّهج: باستعمال (المعادلة 24-4). احسب الاوضاع الزاوية للقيمة العظمى للضوء الأزرق عند $m = 2, m = 3$ من الوضع الاحمر.

الحل: ثابت المحززة $d = (1/4000)\,\text{cm} = 2.50 \times 10^{-6}\,\text{m}$.

ينتج الضَّوء الأزرق ذو الرتبة الثالثة عند الزاوية

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d} = \frac{(3)(4.50 \times 10^{-7}\,\text{m})}{(2.50 \times 10^{-6}\,\text{m})} = 0.540$$

في حين ينتج الضَّوء الأحمر في الرتبة الثانية عند الزاوية

$$\sin\theta = \frac{(2)(7.00 \times 10^{-7}\,\text{m})}{(2.50 \times 10^{-6}\,\text{m})} = 0.560$$

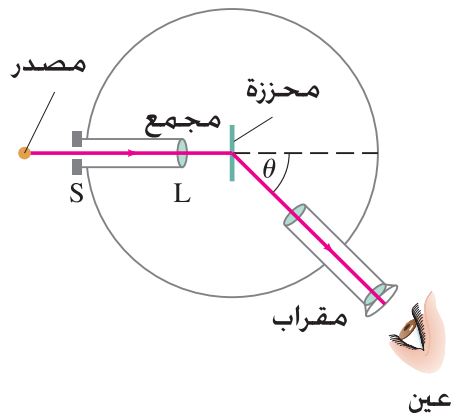
وهي زاوية أكبر. لذا، يتطابق الضَّوء ذو الرتبة الثانية على بداية الضَّوء ذي الرتبة الثالثة.

التمرين C: كم خطًّا في كلّ سنتيمتر تكون في محزّزة الحيود التي تنتج الرتبة الأولى للموجة 633 nm عند 18°؟

التمرين D: إنّك تشاهد الطّيفين الناتجين للضّوء الأحمر الذي يشع على محززتين مختلفتين. تكون الخطوط من الطّيف A متباعدة أكثر من الخطوط في الطّيف B. أيّ من المحززتين فيها خطوط أكثر لكلّ سم؟

7-24 * مقياس الطّيف والتحليل الطّيفي (المطيافية)

مقياس الطّيف أو المطياف. الشّكل (24 – 27)، هو جهاز لقياس الأطوال الموجيّة باستعمال محززة الحيود (أو المنشور) لفصل الأطوال الموجيّة المختلفة للضّوء. يمرّ الضّوء من المصدر عبر شقّ ضيق S في "المجمّع". يكون الشّقّ في البؤرة للعدسة L. ولهذا، يسقط ضوء متوازٍ على "المحززة". ويعمل التلسكوب المتحرّك على تجميع هذه الأشعة.



الشّكل 24 – 27 مقياس الطّيف أو المطياف.

لا يرى شيء في التلسكوب (المنظار) حتى يوضع عند زاوية θ تتفق مع قمّة الحيود (تستعمل عادة الرتبة الأولى) لطول موجة صادرة عن المصدر الضوئي. يمكن قياس الزاوية θ بدقة عالية. ولذلك، يمكن تحديد طول الموجة بدقة متناهية باستعمال (المعادلة 24 – 4):

$$\lambda = \frac{d}{m}\sin\theta$$

حيث m عدد صحيح يمثل الرتبة، أمّا d فهي المسافة بين حزوز الشبكة. الخط الذي تلاحظه في التلسكوب (المنظار) هو في الواقع خيال للفتحة S. وكلما كانت الفتحة أضيق، كان الخط أضيق – ولكن أكثر خفوتًا –. واستطعنا قياس موقعه الزاوي بدقة أكبر أيضا. وإذا احتوى الضّوء مدى متصلا من الموجات، عندها نرى طيفًا متصلا في التلسكوب.

في كثير من مقاييس الطّيف، تستعمل محززة عاكسة، وأحيانًا منشور يعمل بسبب التّفريق اللوني (البند 24 – 4)، حيث ينحرف الضّوء ذو الأطوال الموجيّة المختلفة بزوايا مختلفة. (المنشور ليس أداة خطية. ولذلك يحتاج إلى معايرة).

وهناك استعمال مهم للمطياف يتمثّل في التّعرف إلى الذرات والجزئيات.

الأطياف الخطية

عند تسخين غاز، أو تمرير تيار كهربائيّ فيه، يشع الغاز طيفًا خطيًّا خاصًّا به. أي تصدر أطوال موجية محددة فقط. وهذه تختلف لمختلف العناصر والمركبات*.يبين (الشّكل 24 – 28) الأطياف الخطية لعدد من العناصر في الحالة الغازية. تحدث الأطياف الخطية فقط للغازات عند درجة حرارة مرتفعة، وضغط وكثافة قليلين. ينتج الضّوءُ من الأجسام الصلبة المسخنة، مثل فتيل المصباح الكهربائي وحتى من جسم غازي عالي الكثافة، كالشّمس، **طيفًا متصلا** متضمنًا مدى واسعًا من الأطوال الموجيّة.

كما يبين (الشّكل 24 – 28) أيضًا طيف الشّمس المتصل "الذي يحتوي عددًا من الخطوط المعتمة (فقط أكثرها شهرة هي المبينة)، والتي تسمى **خطوط الامتصاص**. تستطيع الذرات والجزيئات امتصاص الضّوء عند الأطوال الموجيّة التي تشعها عادة. إنّ خطوط امتصاص طيف الشّمس تعود لامتصاص الذرات والجزئيات في المحيط الخارجي الأبرد من الشّمس، وكذلك من ذرات غلاف الأرض الجويّ وجزيئاته. إنّ التحليل الدقيق لهذه الآلاف من الخطوط يدلّ على أنّ ثلثي العناصر على الأقلّ موجودة في الغلاف الجوي الشّمسيّ. ويمكن تحديد وجود العناصر في الغلاف الجوي لكواكب أخرى في الفضاء النجمي والنجوم أيضًا بالتحليل الطّيفي.

* لقد كان السببُ في أنّ الذرات والجزيئات تشع أطيافًا خطية سرًّا غامضًا لسنوات كثيرة، وقد قام بدور في تطوير نظرية الكم الحديثة، كما سنرى في (الفصل 27).

الشّكل 24 – 28 الأطياف الخطية للعناصر المذكورة، وطيف من الشّمس يبين خطوط الامتصاص.

إنّ التحليل الطّيفي مفيد في تحديد وجود أنواع معينة من الجزيئات في عينات المختبر. حيث قد يكون التحليل الكيميائيّ صعبًا. فمثلاً، يمتصّ المركب الحيوي DNA وأنواع مختلفة من البروتينات الضَّوء في مناطق معينة من الطّيف (على سبيل المثال في المنطقة فوق البنفسجيّة UV). وفي العادة، تكون المادة المراد اختبارها في هيئة محلول، وتوضع في طريق حزمة ضوئية وحيدة اللون يتم اختيار طول موجتها بواسطة محززة حيود أو منشور. إنّ مقدار الامتصاص مقارنة مع محلول عياري (دون وجود العينة)، يمكن أن يدل ليس فقط على وجود نوعٍ من الجزيئات، بل على تركيزه أيضًا.

إنّ إشعاع الضَّوء وامتصاصه يحصل كذلك خارج منطقة الضَّوء المرئيّ في الطّيف، مثل منطقتي UV، و IR. يمتص الزجاج الضَّوء في هذه المناطق. لذا، تستخدم المحززات العاكسة والمرايا بدلًا من العدسات. وتستخدم للكشف أيضًا أفلام وكواشف خاصة.

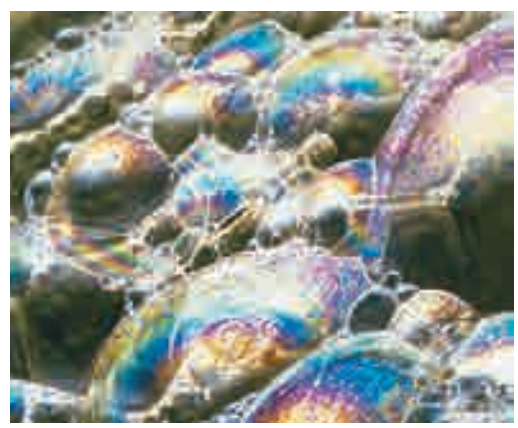
تطبيق الفيزياء

تحليل كيميائيّ وحيويّ بواسطة التحليل الطّيفيّ.

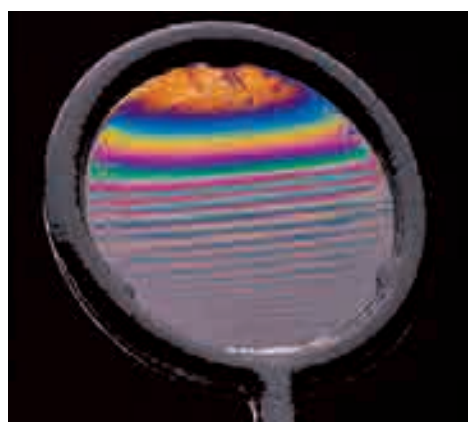
8-24 التّداخل في الأغشية الرقيقة

يعطي تداخل الضَّوء ظواهر كثيرة في الحياة اليومية مثل الألوان اللامعة المنعكسة عن فقاعات الصابون، وأغشية الزيت الرقيقة فوق سطح الماء. (الشّكل 24 – 29). في هذه الحالات وأخرى غيرها، تتكوّن الألوان نتيجة تداخل بنّاء بين الضَّوء المنعكس من سطحي الغشاء الرقيق. ويكون هذا الأثر موجودًا فقط إذا كان سمك الغشاء في حدود الطّول الموجيّ للضَّوء. أمّا إذا كان سمك الغشاء أكبر من عددٍ قليلٍ من الطّول الموجيّ، فإنّ هذا الأثر يتلاشى.

الشّكل 24 – 29 أنماط تداخل في غشاء رقيق كما تبدو في (أ) فقاعات صابون. (ب) غشاء رقيق من ماء صابوني. (جـ) طبقة رقيقة من الزيت فوق سطح ماء بركة في الطريق.



(أ)



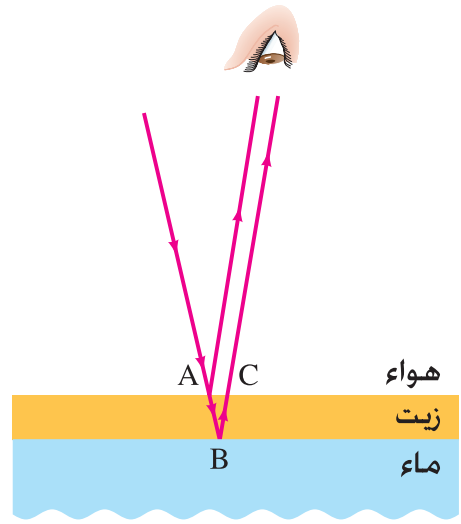
(ب)

(جـ)

إذا رغبت في معرفة كيفية حدوث **تداخل الغشاء الرقيق** هذا: تأمّل سطحًا منبسطًا من الماء تعلوه طبقة رقيقة منتظمة من مادة أخرى، مثلًا زيت معامل انكساره أقلّ من معامل انكسار الماء (سنرى سبب هذا الافتراض بعد قليل)؛ انظر (الشّكل 24 – 30). افرض للحظة أنّ الضّوء الساقط ذا طول موجة واحد. إنّ جزءًا من الضّوء الساقط سينعكس عند A على السطح العلوي، وجزءٌ من الضّوء النافذ ينعكس عند B على السطح السفلي. إنّ الضّوء المنعكس على السطح السفلي يجب أن يسير مسافة إضافية ABC. وإذا كان هذا الفرق في المسار الضوئيّ ABC يساوي عددًا صحيحًا من الطّول الموجيّ في الغشاء (λ_n)، فسوف تصل الموجتان إلى العين متفقتين في الطور وتتداخلان تداخلا بنّاءً. ولكن إذا كان ABC مساويًا لـ λ_n ، $\frac{3}{2}\lambda_n$ ، $\frac{1}{2}\lambda_n$ ، وهكذا، فإنّ الموجتين تكونان مختلفتين في الطور بصورة تامة، ويحدث تداخل هدّام؛ أي أنّ المساحة AC على سطح السّائل تكون معتمة. طول الموجة λ_n هو طول الموجة في الغشاء: $\lambda_n = \lambda/n$، حيث n هو معامل انكسار الغشاء، و λ هو طول الموجة في الفراغ. انظر (المعادلة 24 – 1).

عند سقوط الضّوء على مثل هذا الغشاء، فإنّ فرق المسار الضوئيّ ABC سوف يساوي λ_n (أو $m\lambda_n$، حيث m عدد صحيح) فقط لطول موجة واحدة عند زاوية نظر واحدة. إنّ اللون الخاص بـ λ (λ في الهواء) سوف يبدو لامعًا. وللضوء عند زاوية مختلفة قليلاً، سوف يكون فرق المسار الضوئي ABC أطول أو أقصر، ولون آخر سوف يتداخل تداخلا بناءً. وهكذا بالنسبة لمصدر ممتد (غير نقطي) يصدر ضوءًا أبيض، فإنّ سلسلة من الألوان البراقة سوف تظهر الواحد تلو الآخر. كما أنّ التغيرات في سمك الغشاء سوف تغير فرق المسار الضوئي ABC. وهكذا تؤثر في اللون الذي ينعكس بقوة.

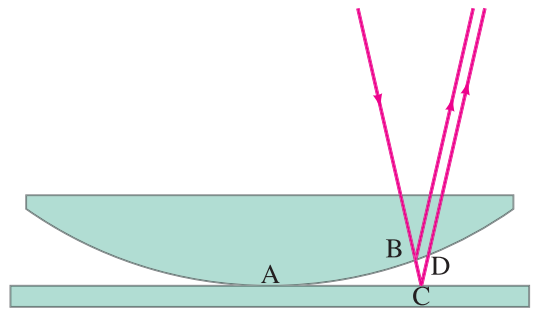
وعند وضع سطح زجاجي منحنٍ في حالة تماس مع سطح منبسط من الزجاج، (الشّكل 24 – 31)، فإنّ سلسلة من الحلّقات متحدة المركز تبدو عند سقوط ضوء وحيد اللون من الأعلى.



الشّكل 24 – 30 الضّوء المنعكس من السّطحين العلوي والسفلي لغشاء رقيق من الزيت فوق سطح الماء. يبين هذا التحليل أنّ الضّوء يسقط عموديًا تقريبًا على السطح، ولكن هنا يبدو مزاحًا بزاوية لنتمكن من عرض كلّ شعاع.

الشّكل 24 – 31 حلقات نيوتن

(ب)



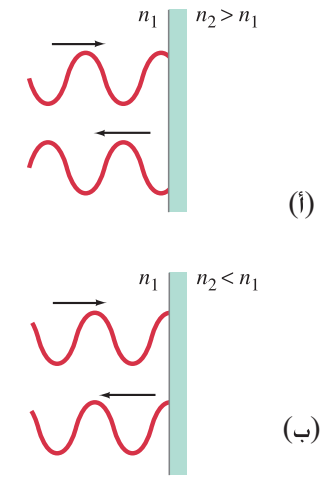
(أ)

تُسَمّى هذه "**حلقات نيوتن***" وتعود إلى التّداخل بين الأشعة المنعكسة عن السطحين العلوي والسفلي لفجوة الهواء الرقيقة بين قطعتي الزجاج. وبسبب أنّ هذه الفجوة (التي تكافئ غشاء رقيقًا) تزداد في السمك من نقطة التماس المركزية نحو الحواف، فإنّ الفرق في طول المسار الضوئي (BCD) يتغير؛ حيث يساوي $0, \frac{1}{2}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, 2\lambda$ وهكذا، وهو يعود إلى التّداخلين البّناء والهدّام، وهذا يؤدي إلى ظهور سلسلة الحلقات المضيئة والمعتمة المبينة في (الشّكل 24 – 31 ب).

تكون نقطةُ التماس لسطحي الزجاج (A في الشّكل 24 – 31أ) معتمةً في (الشّكل 24 – 31 ب). وبما أنّ فرق المسار الضوئي يساوي صفرًا هنا، فإنّ تحليلنا السابق يقترح أنّ الشّعاعين يجب أن يكونا في الطور نفسه، وأنّ هذه النّقطة المركزية تكون مضيئة، ولكنها معتمة. وهذا يدلُّ على أنّ شيئًا آخر يحدث هنا، وهو أن يكون الشّعاعان مختلفين في الطور. وهذا يحدث فقط لأنّ الموجات عند الانعكاس تُقلب رأسا على عقب – القمة تصبح قاعا – انظر (الشّكل 24 – 32). ونرى أنّ الموجة قد خضعت لتغير في الطور مقداره 180°، أو بنصف طول موجة. وفي الواقع، فإنّ هذه التجربة وتجارب أخرى تدلّ على ذلك. *عند السقوط العمودي، يتغيّر طور الشّعاع الضوئيّ المنعكس من مادة معامل انكسارها أكبر من المادة التي يسير فيها بـ* 180°، *أو* $\frac{1}{2}$ *دورة*. انظر (الشّكل 24 – 32). إنّ هذا التغير في الطور يقابل تغيّرًا في المسار مقداره $\frac{1}{2}$. إذا كان معامل الانكسار أقلّ من الوسط الذي يسير فيه الضّوء فلا يحدث تغيّر.

حلقات نيوتن

الشّكل 24 – 32 (أ) يغير الشّعاع المنعكس طوره 180° أو $\frac{1}{2}$ دورة إذا كان $n_2 > n_1$، لكن (ب) لا يحدث ذلك إذا كان $n_2 > n_1$.



* على الرغم من أنّ نيوتن وصف هذه الحلقات، ألا أنّ مشاهدتها الأولى وتفسيرها كان على يد معاصِره روبرت هوك.

وهكذا، فالشّعاع المنعكس بواسطة السّطح المنحني فوق الفجوة الهوائية في (الشّكل 24 – 31أ) لا يتغير طوره. أمّا الشّعاع المنعكس على السطح السفلي، حيث الشّعاع في الهواء يصطدم بالزجاج فيعاني تغييرا في الطور مقداره $\frac{1}{2}$ دورة. وهذا يكافئ نصف طول موجة تغير في المسار الضوئي. وعليه، فإنّ الشّعاعين المنعكسين عند نقطة التماس A لسطحي الزجاج (حيث سمك فجوة الهواء تقترب من الصفر) سيكونان مختلفين في الطور بمقدار نصف دورة (180°)، وبهذا تتشكل بقعة معتمة. وهنا أحزمة معتمة سوف تتكوَّن عندما يساوي فرقُ المسار BCD في (الشّكل 24 – 31أ)، عددًا صحيحًا من الأطوال الموجيّة. في حين تتكون الأحزمة المضيئة عندما يكون فرق المسار مساويًا $\frac{3}{2}\lambda, \frac{1}{2}\lambda$، وهكذا، لأنّ التغير في الطور عند أحد السطحين يضيف فرقًا في المسار .(دورة $\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\lambda$).

ونعود على عَجَلٍ إلى (الشّكل 24 – 30). الضّوء المنعكس على السطحين الفاصلين هواء – زيت، وزيت – ماء قد تغيرا في الطور 180° وهذا يكافئ تغيّرًا في المسار الضوئي $\frac{1}{2}\lambda$، لأنّنا فرضنا أنّ $n_{\text{ماء}} > n_{\text{زيت}} > n_{\text{هواء}}$؛ وبما أنّ التغيرين متساويان، فإنّ هذا لا يؤثر في تحليلنا.

المثال 24-8 غشاء رقيق من الهواء، إسفينيّ الشّكل

وُضِعَ سلك رفيع جدًّا قطره $7.35 \times 10^{-3}\,\text{mm}$ بين صفيحتين مستويتين كما في (الشّكل 24 – 33أ). يسقط ضوء طول موجته في الهواء 600 nm (كما هو مبين) عموديًا على الصفيحتين، وترى سلسلة من الحزم المضيئة والمعتمة. (الشّكل 24 – 33). ما عدد الهدُب المضيئة والمعتمة في هذه الحالة؟ هل المساحة المجاورة للسلك مضيئة أم معتمة؟

النّهج: نحتاج إلى اعتبار أثرين: أ- فروق المسارات بين الأشعة الضوئية المنعكسة من السطحين القريبين (إسفين الهواء بين صفيحتي الزجاج). ب- $\frac{1}{2}$ الدورة في الطور النّاتج من الانعكاس على السطح السفلي (النّقطة E في الشّكل 24 – 33أ). حيث الأشعة في الهواء تدخل الزجاج. وبسبب التغير في الطور على السطح السفلي، فإنّ هناك هدبة معتمة ستكون عند فرق المسار $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$ وهكذا. وبما أنّ الأشعة عمودية على الصفيحتين، فإنّ فرق المسار هو $2t$، حيث t هو سمك فجوة الهواء عند أيّ نقطة.

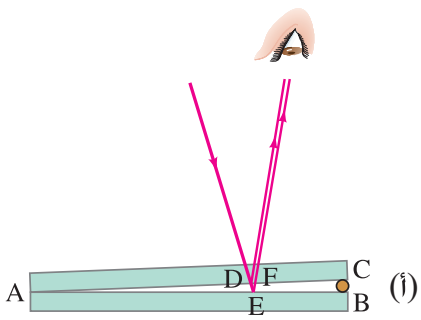
الحلّ: تتكون الهُدْبُ المعتمة عندما

$$2t = m\lambda, \qquad m = 0, 1, 2, \cdots.$$

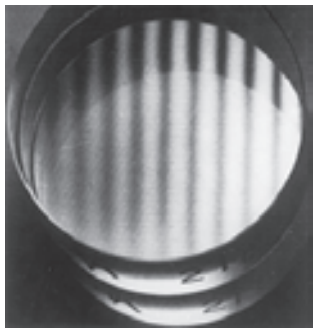
أمّا الهدب المضيئة فتتكون عندما $2t = (m + \frac{1}{2})\lambda$، حيث m عدد صحيح. عند موضع السلك يكون $t = 7.35 \times 10^{-6}\,\text{m}$. وعندهذه النّقطة ستكون $2t/\lambda = (2)(7.35 \times 10^{-6}\,\text{m})/(6.00 \times 10^{-7}\,\text{m}) = 24.5$ وتساوي 24.5 طول موجة. وبما أنّ هذا نصف عدد صحيح، فالمساحة المحاذية لمكان السلك ستكون مضيئة. سيكون هناك 25 هدبة معتمة، تقابل فرقًا في المسار $0\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \cdots, 24\lambda$ بما في ذلك الهدبة عند خط التماس A $(m = 0)$ وبينها سيكون 24 خطًا مضيئًا إضافة لآخر واحدة عند النهاية، أي 25.

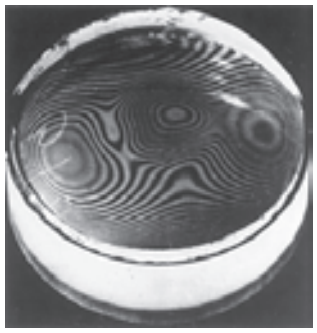
ملحوظة: الهُدْبُ المضيئة والمعتمة ستكون خطوطًا مستقيمة فقط إذا كانت الصفيحتان الزّجاجيتان مستويتين تمامًا. وإنْ لم تكونا كذلك، فإنّ نمط التّداخل سيكون مختلفًا. (الشّكل 24 – 33 جـ). لذلك، نرى وسيلة دقيقة جدًّا لاختبار استواء السّطوح الزّجاجية. إنّ سطوح العدسات الكروية تختبر بوضعها فوق سطوح مستوية واختبار تكوُّن حلقات نيوتن الدائرية (الشّكل 24 – 31ب).

الشّكل 24 – 33 (أ) الضّوء المنعكس من السطحين العلوي والسفلي لغشاء من الهواء بشكل إسفين، يتداخل مكونا أهدابا لامعة ومعتمة. (ب) النمط المشاهد عندما تكون صفيحتا الزجاج مستويتين (جـ) النمط عندما لا تكون الصفيحتان مستويتين، انظر (المثال 24 – 8).



(أ)


(ب)


(ج)

إذا ملئ الإسفين بين السّطحين الزّجاجيين في (المثال 24 – 8) بمادة شفافة عدا الهواء كالماء مثلا، فإنّ نمط الحيود يُزاح لأنّ طول موجة الضّوء يختلف في الماء. وفي مادة معامل انكسارها n ، فإنّ طول الموجة هو $\lambda_n = \lambda/n$، حيث λ طول الموجة في الفراغ (انظر المثال 24 – 1). مثلاً، لو ملئ الإسفين و (المثال 24 – 8) بالماء، فإنّ $\lambda_n = 600\,\text{nm}/1.33 = 450\,\text{nm}$، وبدلاً من 25 هدبة، سنرى 33.

وإذا أسقط ضوء أبيض (بدلا من الضّوء وحيد اللون) على غشاء بشكل إسفين من الهواء، (الشّكلان 24 – 31أ، و 24 – 33أ) فسنرى سلسلة من الهدب الملونة. ويعود السبب في هذا إلى أنّ تداخلاً بنّاءً يحدث لمختلف الأطوال الموجيّة في الضّوء المنعكس عند سمك مختلف على امتداد الإسفين.

تطبيق الفيزياء
اختبار استواء سطوح الزّجاج

فقاعةُ الصابون قشرةٌ كروية رقيقة (أو غشاء) والهواء داخلها. إنّ اختلاف سمك غشاء فقاعة الصابون يؤدّي إلى ظهور الألوان اللامعة المنعكسة عنها. (هناك هواء على جانبي غشاء الفقاعة). تنتج اختلافات السمك المشابهة في الغشاء الألوان اللامعة والتي تشاهد منعكسة من طبقة رقيقة من الزيت أو الكاز على سطح بركة أو بحيرة (الشّكل 24 – 29). أي أنّ الألوان التي تبدو أكثر إضاءة تعتمد على زاوية الرؤية.

المثال 24-9 **سمك غشاء فقاعة الصابون.**

تبدو فقاعة صابون خضراء ($\lambda = 540\ \text{nm}$) عند نقطة على سطحها الأمامي الأقرب للناظر. ما أقلّ سمك لغشاء هذا الفقاعة ؟ افرض $n = 1.35$.

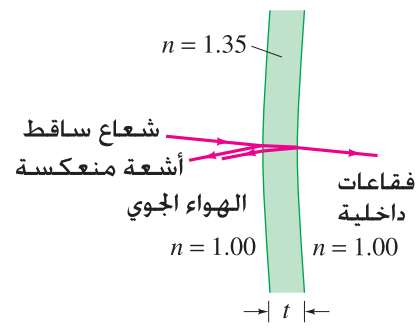
النّهج: افرض أنّ الضّوء ينعكس عموديّا من النّقطة على السطح الكروي القريب من الناظر. (الشّكل 24 – 34). ينعكس الضّوء كذلك من السطح الداخلي لغشاء فقاعة الصابون كما هو مبين. فرق المسار الضوئي بين هذين الشّعاعين المنعكسين هو $2t$، حيث t هو سمك غشاء الفقاعة. يتغير الضّوء المنعكس على السطح الأول (الخارجي) طوره $180°$ (معامل انكسار الصابون أكبر من معامل انكسار الهواء) أمّا الانعكاس على السطح الثاني (الداخلي) فلا يتغير طوره. ولتحديد السمك t للحصول على تداخل بناء؛ يجب أن نستعمل طول الموجة في الصابون ($n = 1.35$).

الحلّ: تغير الطور $180°$ على أحد السطحين فقط يكافئ $\frac{1}{2}\lambda$ تغيرًا في المسار. لذلك، يكون الضّوء الأخضر لامعًا عندما يكون أقلّ مسار ضوئيّ هو $\frac{1}{2}\lambda_n$. وهكذا $2t = \lambda/2n$. أي

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{(540\ \text{nm})}{(4)(1.35)} = 100\ \text{nm}$$

وهذا هو أقلّ سمك.

ملحوظة: سوف يبدو السّطح الأماميّ أخضر اللون إذا كانت $2t = 3\lambda/2n$ أيضًا. وبشكل عام إذا كانت $2t = (2m + 1)\lambda/2n$. حيث m عدد صحيح. لاحظ أنّ الأخضر يبدو في الهواء. لذا، $\lambda = 540\ \text{nm}$ (وليس λ/n)



الشّكل 24 – 34 (المثال 24 – 9). الأشعة السّاقطة والمنعكسة يفترض أنها عمودية على سطح الفقاعة. وهي مبينة عند زاوية صغيرة بحيث يمكن تمييزها.

تنويه:
العلاقة الرياضية غير كافية، يجب أن تختبر تغيرات الطور عند السّطوح.

تطبيق الفيزياء
طلاء العدسات

هناك تطبيقٌ مهمٌّ لتداخل الأغشية الرقيقة هو طلاء الزجاج ليكون "غير عاكس" خاصة في العدسات. يعكس سطح الزجاج نحو 4% من الضّوء الساقط عليه. وقد تحتوي آلات التصوير الحديثة، والمجاهر، والأجهزة الضوئية الأخرى ست إلى عشر عدسات رقيقة. إنّ الانعكاس عن كلّ هذه السّطوح قد يقلّل الضّوء لصورة ملموسة، كما أنّ الانعكاسات المتعددة تنتج خلفية ضبابية تقلل من نوعية الصورة. وعند تقليل الانعكاس يزداد النفاذ. كما أنّ طلاءً رقيقًا جدًّا على سطوح العدسات يمكن أن يقلل الانعكاس بصورة ملموسة؛ يختار سمك الغشاء بحيث يتداخل الضّوء (على الأقل طول موجة معينة) المنعكس على السطحين الأمامي والخلفي تداخلًا هدّامًا. ويعتمد مقدار الانعكاس على السطح الفاصل على الفرق في معاملات الانكسار بين المادتين. وبصورة مثالية، يكون معامل الانكسار لمادة الطلاء مساويًا لـ $(= \sqrt{n_1 n_2})$ المتوسط الهندسي لمعامل الهواء والزجاج، بحيث يكون مقدارُ الانعكاس على كلّ من السطحين متساويًا. عندها يحصل التّداخل الهدّام بصورة كاملة تقريبًا لطول موجة واحدة اعتمادًا على سمك الطلاء. إنّ الموجات القريبة سوف تتداخل تداخلا هدّامًا بصورة جزئية. لكن طلاء واحدًا لا يمكن أن يحذف الانعكاسات كلّها للموجات جميعا. إلا أنّ طبقة واحدة يمكن أن تقلل الانعكاس من 4% إلى 1% للضّوء الساقط. ويصمم الطلاء عادة بحيث يحذف منتصف الطّيف المنعكس (نحو 550 nm). وأطراف الطّيف – الأحمر والبنفسجيّ – سوف لا تقل كثيرًا. وبما أنّ مزيج الأحمر والبنفسجيّ يعطي الضّوء الأرجواني، لذلك يكون الضّوء المنعكس عن هذه العدسات أرجوانيّا (الشّكل 24 – 35).

العدسات التي تحتوي نوعين أو ثلاثة من الطلاء المنفصل يمكن أن تقلل مدى واسعًا من الأطوال الموجيّة المنعكسة بصورة فاعلة.

الشّكل 24 – 35. عدسة مطلية. لاحظ لون الضّوء المنعكس من سطحها الأمامي.

طريقة حلّ الأسئلة: التّداخل

1. تعتمد آثار التّداخل على الوصول المتزامن لموجتين أو أكثر عند النّقطة نفسها في الفراغ.

2. يحدث التّداخل البنّاء عندما تصل الموجات المتفقة في الطور مع بعضها: تصل قمة إحدى الموجات في الوقت نفسه الذي تصل فيه قمة موجة ثانية. تضاف عندها الاتساعات ليكون هناك اتساع أكبر. يحدث التّداخل البناء أيضًا عندما يكون الفرق في المسار مساويًا بالضبط لطول موجة تماما، وأيّ عدد صحيح من مضاعفات طول الموجة: $1\lambda, 2\lambda, 3\lambda$

3. ينتج التّداخل الهدّام عندما تصل قمة إحدى الموجتين لحظة وصول قاع الموجة الثانية. تضاف الاتساعات، لكنها ذات إشارات مختلفة ولذلك ينقص الاتساع الكلّي إلى الصفر إذا كان الاتساعان متساويين. ينتج التّداخل الهدام دائمًا عندما يكون فرق الطّول نصف دورة، أو فرق المسار نصف عدد صحيح من الأطوال الموجيّة. وهكذا يكون الاتساع الكلّي صفرًا، إذا وصلت موجتان متماثلتان بينهما فرق في الطور مقداره نصف طول موجة، أو $(m + \frac{1}{2})\lambda$، حيث m عدد صحيح.

4. للتداخل في الغشاء – الرقيق، هناك نصف طول موجة فرق إضافي في المسار ينتج عندما ينعكس الضّوء من وسط أكثف ضوئيًّا (ينتقل الضّوء من وسط معامل انكساره أقلّ إلى وسط معامل انكساره أكبر).

المثال 24-10 طلاء غير عاكس

ما سمك طلاء ضوئيّ مكوَّن من MgF_2 والذي معامل انكساره $n = 1.50$، ويصمم لحذف الضّوء المنعكس لطول موجيّ (في الهواء) نحو 550 nm عندما يسقط عموديًا على الزجاج $n = 1.50$؟

النّهج: نتبع بدقة الطريقة المتبعة في إرشادات حلّ المسائل المذكورة آنفا.

الحلّ:

(1) آثار التّداخل: نأخذ شعاعين ينعكسان من السطحين الأمامي والخلفي لطلاء العدسة كما في (الشّكل 24 – 36). ونرسم الشّعاعين بصورة غير كروية على العدسة كي نرى كلا منهما. سوف يتداخل هذان الشّعاعان معًا.

(2) التّداخل البنّاء: نريد حذف الضّوء المنعكس. لذا، لا نأخذ التّداخل البناء في الحسبان.

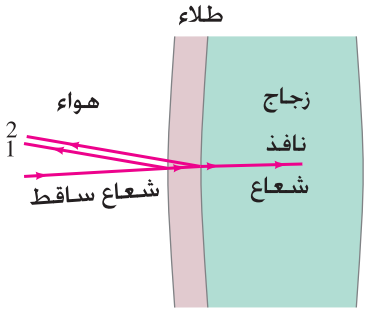
(3) التّداخل الهدّام: لحذف الانعكاس: نريد الشّعاعين 1، و 2 ليختلفا في الطور بنصف دورة بحيث يتداخلان تداخلًا هدّامًا. فرق الطور يعزى إلى فرق المسار $2t$ الذي ينتقله الشّعاع 2 بالإضافة لأيّ تغير في الطور في أيّ من الشّعاعين بسبب الانعكاس.

(4) تغير الطور بسبب الانعكاس: يتغير طور الشّعاعين 1، و 2 بمقدار $\frac{1}{2}$ دورة عند انعكاسهما عن السّطحين الأمامي والخلفي للطلاء على الترتيب (يزداد معامل الانكسار عند كلا السّطحين). لذا، ليس هناك تغير حاصل للطور بسبب الانعكاسات. وسيكون فرق الطور الحاصل بسبب المسار الإضافي $2t$ الذي يتخذه الشعاع 2 من خلال الطلاء حيث $n = 1.38$. ولكننا نرغب في أن تكون قيمة 2t مساوية لـ $\frac{1}{2}\lambda_n$ حتى يحدث التداخل الهدام، حين تكون $\lambda_n = \lambda/n$ هي طول الموجة في الطلاء. وعندما تصبح $2t = \lambda_n/2 = \lambda/2n$ عندئذٍ

$$t = \frac{\lambda_n}{4} = \frac{\lambda}{4n} = \frac{(550\text{ nm})}{(4)(1.38)} = 99.6\text{ nm}$$

ملحوظة: يمكننا وضع $2t = (m + \frac{1}{2})\lambda_n$، حيث m عدد صحيح. أقلّ سمك $(m = 0)$ يختار عادة لأنّ التّداخل الهدّام سوف ينتج عند الزاوية الأوسع.

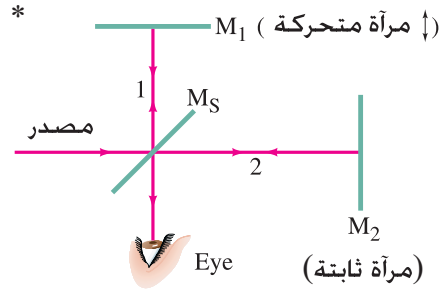
ملحوظة: ينتج التّداخل الهدّام بصورة كاملة فقط لطول موجة الضّوء المعطاة، أمّا الموجات الأطول والأقصر فستحذف بصورة جزئيّة.



الشّكل 24 – 36 (المثال 24 – 10). الشّعاع الساقط ينعكس جزئيًّا على السّطح الأماميّ لطلاء العدسة (الشعاع 1) وينعكس جزئيًّا مرة أخرى على السّطح الخلفيّ للطلاء (الشعاع 2)، مع معظم الطّاقة المنتقلة مع الشّعاع النافذ إلى الزجاج.

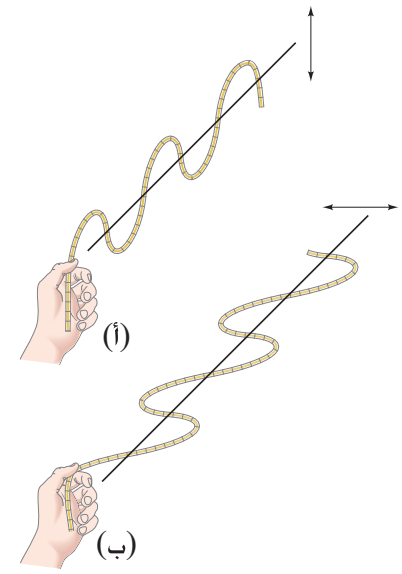
9-24 مقياس تداخل ميكلسون *

هناك جهازٌ مفيدٌ يتضمّن تداخل الموجات، هو مقياس تداخل ميكلسون (الشّكل 24 – 37)* الذي اخترعه الأمريكي ألبرت ميكلسون (البند 22 – 4). ضوء وحيد اللون من نقطة منفردة على مصدر ممتد يبدو ساقطًا على مرآة نصف مفضضة M_S، **مُقسِّم الحزمة الضوئية** هذا، المرآة M_S، عليها طبقة رقيقة من الفضة تعكس نصف الضَّوء الذي يسقط عليه، وبهذا، ينفذ نصفُ الحزمة الضوئية إلى مرآة ثابتة M_2، حيث ينعكس نحو الخلف. أمّا النصف الثاني فينعكس بواسطة M_S باتجاه المرآة M_1 القابلة للحركة (بواسطة برغيّ مسنّن بدقة)، حيث ينعكس أيضًا نحو الخلف. وفي أثناء عودته، يمرّ جزء من الشّعاع 1 خلال M_S ليصل إلى العين؛ في حين ينعكس جزء من الشّعاع 2، عند عودته، بواسطة M_S إلى العين. إذا كان المساران الضوئيان متماثلين، فالشّعاعان المترابطان يدخلان العين ليتداخلا تداخلاً بنّاءً، مع ظهور هدب لامعة. إذا حركت المرآة المتحركة مسافة $\lambda/4$، فإنّ أحد الشّعاعين سيسير مسافة أكثر من الآخر بمقدار $\lambda/2$ (لأنّه يسير مسافة $\lambda/4$ ذهابًا وإيابًا). في هذه الحالة، سوف تتداخل الموجتان تداخلا هدّامًا، وسوف تبدو الهدبة معتمة. وعند إزاحة المرآة M_1 أكثر، سوف نحصل على إضاءة مرة أخرى (إذا كان فرق المسار λ)، ثم عتمة، وهكذا.



الشّكل 24 – 37 جهاز تداخل ميكلسون.

وباستخدام هذه الجهاز، يمكن إجراء أقيسة للطول بصورة دقيقة. إنّ تحريك المرآة M_1 بمسافة $\frac{1}{4}\lambda$ يعطي اختلافًا واضحًا بين الضَّوء والعتمة. إذا كانت $\lambda = 400\ \text{nm}$، فهذا يعني دقة مقدارها 100 nm، أو 10^{-4} mm. وإذا أميلت المرآة M_1 قليلا، فإنّ الهدب تبدو سلسلة من الخطوط المضيئة والمعتمة أو "الهدب". وبتحديد عدد الهدب أو أجزائها، نستطيع إجراء أقيسة دقيقة جدًّا للطول.



الشّكل 24 – 38، الموجات العرضية في حبل مستقطبة (أ) في مستوى عموديّ (ب) في مستوى أفقيّ.

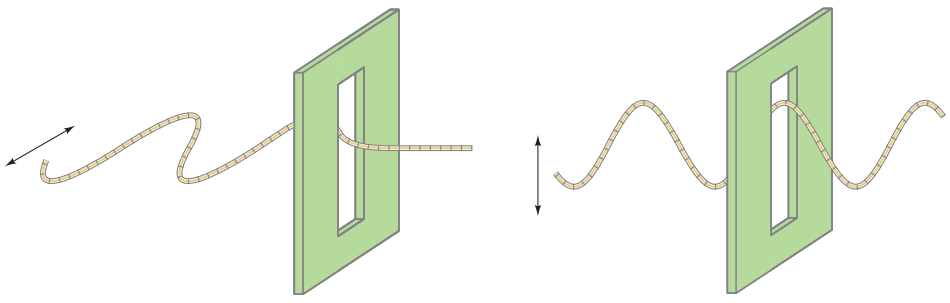
10-24 الاستقطاب

إنّ إحدى خصائص الضَّوء المهمة والمفيدة أنّه قابلٌ للاستقطاب. فماذا يعني ذلك؟ دعنا نتفحص الموجات المنتقلة في حبل. يمكن أن نجعل الحبل يهتز في مستوى عموديّ كما في (الشّكل 24 – 38أ)، أو في مستوى أفقيّ كما في (الشّكل 24 – 38 ب).

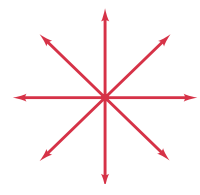
في أيّ من الحالتين، فإنّ الموجة تُسَمّى، **مستقطبة خطيًّا**، أو **مستقطبة في مستوى**؛ أي أنّ الاهتزازات تكون في مستوى.

والآن، إذا وضعنا حاجزًا يحتوي فتحة عمودية في طريق الموجة، (الشّكل 24 – 39)، فإنّ موجة مستقطبة عموديًا تمر خلال الفتحة العمودية، في حين لا تمرّ موجة مستقطبة أفقيًّا. إذا استعملنا شقًّا أفقيًّا، فستتوقف الموجة المستقطبة عموديًا. وإذا استعملنا نوعيّ الفتحتين، فستتوقّف كلتا الموجتين بفتحة أو بأخرى.لاحظ أنّ الاستقطاب موجود فقط في الموجات العرضية، وليس في الموجات الطّولية كالصّوت؛ فالأخيرة تهتز على امتداد اتجاه الحركة، ولن يوقفها أيّ وضع للشّقّ.

الشّكل 24 – 39. يمرّ الضَّوء المستقطب عموديًا خلال فتحة عمودية، أمّا الموجة المستقطبة أفقيًا فلن تمرّ.



الشّكل 24 – 40 اهتزاز المجال الكهربائيّ في موجة غير مستقطبة. ينتقل الضَّوء إلى داخل الصفحة أو خارجها.



استنتجت نظرية مكسويل في الضَّوء كموجات كهرومغناطيسيّة (EM) أنّ الضَّوء يمكن أن يستقطب لأنّ الموجة (EM) عرضية. إنّ اتجاه الاستقطاب في موجة EM مستوية مستقطبة يؤخذ باتجاه المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$. وليس من الضروريّ أن يكون الضَّوء مستقطبًا، فقد يكون غير مستقطب، وهذا يعني أنّ المصدر لديه اهتزازات في مستويات كثيرة في اللحظة نفسها، كما هو مبين في (الشّكل 24 – 40). إنّ المصباح الكهربائي العادي يشع ضوءًا غير مستقطب كما هو حال الشّمس.†

* هنالك أنواعٌ أخرى من مقاييس التداخل، ولكن يبقى مقياس سيكون أفضل نوع معروف.

يمكن إنتاج ضوء مستوى الاستقطاب من ضوء غير مستقطب باستعمال بلّورات معَّينة كالتّورمالين. أو، كما هو شائع اليوم، يمكننا استعمال **صفائح مستقطبة**. (المواد المستقطبة تم اختراعها عام 1927 على يد إدوين لاند.) تتكون الصفيحة المستقطبة من جزيئات طويلة معقدة مرتبة لتكون متوازية. تتصرف مثل هذه المستقطبة كسلسلة من الشّقوق المتوازية لتسمح لنوع واحد من الاستقطاب بالمرور خلالها دون أن يضعف. يعرف هذا الاتجاه **بمحور النفاذ** للمستقطبة. أمّا الاستقطاب العموديّ فيمتصُّ كليًّا تقريبًا بواسطة المستقطبة.

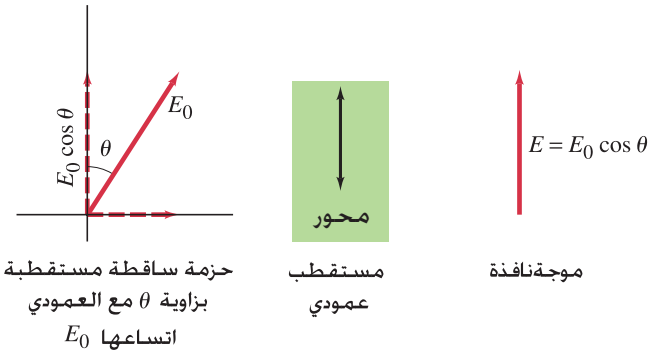
[الامتصاص في المستقطبة يمكن تفسيره على المستوى الجزيئيّ. مجال كهربائي $\vec{\mathbf{E}}$ يهتزُّ موازيًا للجُزيء الطويل يجعل الإلكترونات تبدأ بالحركة على امتداد الجزيئات، وهكذا يعمل شغلًا عليها وتنقل الطّاقة. وبالتالي، إذا كان $\vec{\mathbf{E}}$ موازيًا للجزيئات فإنّه يُمتص. ولكن المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$ العموديّ على الجزيئات الطويلة ليس له هذه الإمكانية لعمل شغل ونقل طاقته. ولذلك، يمرّ بحرية. وعندما نتحدث عن محور النفاذ للمستقطبة، فإنّنا نعني اتجاه المجال $\vec{\mathbf{B}}$ الذي يعبر. لذا، فإنّ محور المستقطبة يكون **عموديًّا** على الجزيئات الطويلة. وإذا أردنا التفكير بوجود شقوق بين الجزيئات الطويلة وِفْقَ (الشّكل 24 – 39)، فإنّ هذا الشّكل ينطبق على المجال في الموجة الكهرومغناطيسيّة (EM)، وليس المجال $\vec{\mathbf{E}}$].

إذا سقطت حزمة من ضوء مستوى الاستقطاب على مستقطبة محور نفاذها يصنع زاوية θ مع اتجاه الاستقطاب للضَّوء الساقط، فإنّ الحزمة ستنفذ مستقطبة خطيًّا باتجاه يوازي محور نفاذ المستقطبة، وسيقلّ اتساع E ليصبح $E\cos\theta$، (الشّكل 24 – 41). أي أنّ المستقطبة تمرر فقط مركبة الاستقطاب (يتجه المجال الكهربائي، $\vec{\mathbf{E}}$) الموازية لمحور نفاذها. ولأنّ شدة الضَّوء تتناسب طرديًّا مع مربّع الاتساع (البندان 11 – 10، و 22 – 5)، فإنّ شدة الضَّوء المستقطب في مستوى النافذ من مستقطبة هي

$$I = I_0 \cos^2\theta \qquad \textbf{(5-24)}$$

حيث I_0 هي شدّة الحزمة الساقطة، والزاوية θ هي الزاوية بين محور نفاذ المستقطبة ومستوى الاستقطاب للموجة القادمة*.

شدة موجة مستقطبة خطيًا تنقص بواسطة مستقطبة.



الشّكل 24– 41 المستقطبة العمودية تنفذ فقط المركبة العمودية للموجة (المجال الكهربائيّ) الساقطة عليها.

يمكن أن تستعمل **المستقطبة** للحصول على ضوء مستوى الاستقطاب من ضوء غير مستقطب؛ لأنّ مركبة الضَّوء الموازية للمحور فقط تمرّ عبرها. كما يمكن استعمال المستقطبة **كمحلّلة** لتحديد: (1) ما إذا كان الضَّوء مستقطبًا. (2) مستوى الاستقطاب. إنّ المستقطبة التي تعمل محلّلة سوف تمرر المقدار نفسه للضَّوء دون الاعتماد على وضع محورها إذا كان الضَّوء غير مستقطب؛ جرّب أن تدير عدسة من نظارات شمسية مستقطبة عند النظر إلى مصباح كهربائيّ. إذا كان الضَّوء مستقطبًا، فعند إدارة المستقطبة، فإنّ الضَّوء المار سيكون أكبر ما يمكن عندما يكون مستوى الاستقطاب موازيًا لمحور المستقطبة، ولكنه يكون أقلّ ما يمكن عندما يكون عموديًا عليه. إذا قمت بذلك عند النظر إلى السماء، ويفضل عموديًا على اتجاه الشّمس، فسترى أنّ ضوء السماء مستقطب.

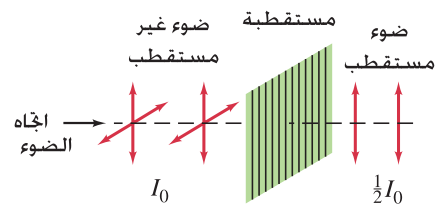
(إنّ ضوء الشّمس المباشر غير مستقطب، ولكن لا تنظر مباشرة إلى الشّمس حتى من خلال المستقطبة، خوفا من أذى سيلحق بها).

إذا نقص الضَّوء النافذ من محلّلة إلى الصفر في وضع معين، فسيكون الضَّوء مستقطبًا خطيًّا بنسبة 100%. أمّا إذا وصل إلى قيمة دنيا فقط، فإنّ الضَّوء **مستقطب جزئيًّا**.

* تُسَمّى (المعادلة 24 – 5) عادة **قانون مالوس**، نسبة إلى أتينا مالوس، المعاصر لفرنل.

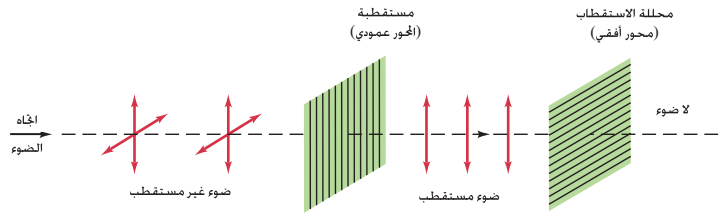
يتكون الضَّوء غير المستقطب من ضوء ذي اتجاهات عشوائية للاستقطاب. كلّ اتجاه من هذه الاستقطابات يمكن تحليله إلى مركبتين متعامدتين في الاتجاه. وبالمتوسط، فإنّ الحزمة غير المستقطبة يمكن اعتبارها مكونة من حزمتين مستويتي الاستقطاب لهما المقدار نفسه ومتعامدتين.

وعند مرور ضوء غير مستقطب في مستقطبة، فإنّ إحدى المركبتين تحذف. لذلك، تنقص شدة الضَّوء النافذ إلى النصف، لأنّ نصف الضَّوء يحذف: $I = \frac{1}{2} I_0$ (الشّكل 24 – 42).



الشّكل 24 – 42 الضَّوء غير المستقطب له مركبتان متساويتا الشدة؛ عمودية وأفقية.بعد المرور بمستقطبة إحدى هاتين المركبتين تحذف. تنقص شدة الضَّوء إلى النصف.

وعندما **تتعامد** مستقطبتان، أي أنّ محوري استقطابهما متعامدان، فإنّ الضَّوء غير المستقطب يتمّ إيقافه بصورةٍ كاملة. كما هو مبيّن في (الشّكل 24 – 43). ويحوّل الضَّوء غير المستقطب إلى ضوء مستقطب خطيًّا بواسطة المستقطبة الأولى.



الشّكل 24 – 43 المستقطبتان المتعامدتان توقفان الضَّوء كليًّا.

المستقطبة الثانية، المحلّلة، تحجب هذه المركبة؛ لأنّ محور نفاذها عمودي على الأول. يمكنك تجريب ذلك بعدسات نظارة شمسية مستقطبة (الشّكل 24 – 44). لاحظ أنّ النظارات الشّمسيّة المستقطبة تحجب 50% من الضَّوء غير المستقطب بسبب خاصية الاستقطاب، إنها تمتص أكثر من ذلك لأنّها ملوّنة.

الشّكل 24 – 44. مستقطبات متعامدة. عندما توضع عدستا نظارات شمسية فوق بعضهما، ومحوراهما متعامدان، فلن يمرّ أيّ ضوء تقريبا.

المثال 24-11 مستقطبتان بزاوية 60°

يمرّ ضوء غير مستقطب خلال مستقطبتين؛ محور إحداهما عموديّ، ومحور الأخرى عند 60° مع العموديّ. صف كلّا من اتجاه الاستقطاب وشدة الضَّوء النافذ.

النّهج: نصف الضَّوء الساقط يمتصّ في المستقطبة الأولى، ويخرج مستقطبًا خطيًّا. وعند مرور الضَّوء في المستقطبة الأخرى، فإنّ الشدة تنقص أكثر وفْقًا (للمعادلة 24 – 5)، ويصبح مستوى الاستقطاب على امتداد محور المستقطبة الثانية.

الحلّ: تحجب المستقطبة الأولى نصف الضَّوء. لذا، تقلّ الشدة إلى النصف:

$$I_1 = \tfrac{1}{2} I_0$$

الضَّوء الذي يصل المستقطبة الثانية يكون مستقطبًا عموديّا. وبذلك تقلّ شدته وفقا (للمعادلة 24 – 5) إلى

$$I_2 = I_1(\cos 60°)^2 = \tfrac{1}{4} I_1$$

وبذلك $I_2 = \frac{1}{8} I_0$. إنّ الضَّوء النافذ ذو شدّة تعادل ثُمن الشدة الأصلية، وهو مستقطب خطيًّا بزاوية 60° مع العمودي.

المثال المفاهيمي 24-12 ثلاث مستقطبات

رأينا في (الشّكل 24 – 43) أنّه عندما يسقط ضوءٌ غير مُستقطب على مستقطبتين متعامدتين (المحاور بينهما 90°)، فإنّ الضَّوء لا يمر خلالهما. ماذا يحدث لو وضعنا بينهما مستقطبة ثالثة بحيث يصنع محورها زاوية 45° مع كلّ من محوري المستقطبتين الأصليتين. (الشّكل 24 – 45أ)؟

الجواب: نبدأ تمامًا كما في (المثال 24 – 11). ونتذكر أنّ الضَّوء المار من كلّ مستقطبة يكون مستقطبًا باتجاه محور نفاذها. وهكذا، فالزاوية في (المعادلة 24 – 5) هي الزاوية بين محوري النفاذ لكلّ زوج من المستقطبات تؤخذ على الترتيب. إنّ المستقطبة الأولى تحوّل الضَّوء إلى مستقطب خطيًّا، وتقلّل شدته من I_0 إلى $I_1 = \frac{1}{2} I_0$. في حين تقلّل المستقطبة الثانية الشدة بـ $(\cos 45°)^2$، (المعادلة 24 – 5):

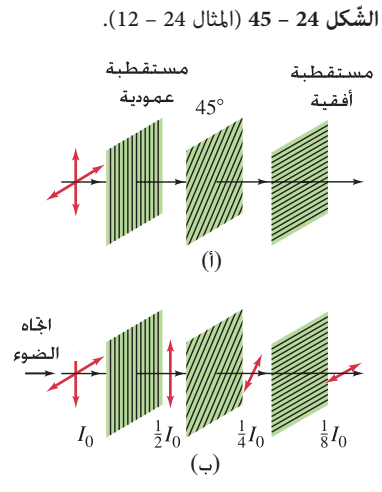
$$I_2 = I_1(\cos 45°)^2 = \tfrac{1}{2} I_1 = \tfrac{1}{4} I_0$$

يكون الضَّوء النافذ من الثانية مستقطبًا خطيًّا بزاوية 45° (الشّكل 24 – 45 ب) أمّا المستقطبة الثالثة، فتقلل الشدة إلى

$$I_3 = I_2(\cos 45°)^2 = \tfrac{1}{2} I_2$$

إذن، ينفذ ثُمنُ الشدة الأصلية.

ملحوظة: لو لم ندخل المستقطبة الثالثة بزاوية 45°، فإنّ شدة تساوي صفرًا سوف تنتج (الشّكل 24 – 43).



الشّكل 24 – 45 (المثال 24 – 12).

التمرين E: كم من الضَّوء سوف يمر لو لم توضع المستقطبة ذات 45° (المثال 24 – 12) بين المستقطبتين، بل (أ) قبل الأولى (العمودية). (ب) بعد المستقطبة الأفقية؟

الاستقطاب بالانعكاس

وهناك طريقةٌ أخرى للحصول على ضوء مستقطب من ضوء غير مستقطب هي الانعكاس. عندما يصطدم الضَّوء بسطح غير فلزي عند أيّ زاوية غير العموديّة، فإنّ الضَّوء المنعكس يكون مستقطبًا في مستوى موازٍ للسطح غالبًا. (الشّكل 24 – 46). أي أنّ المركبة ذات الاستقطاب العموديّ على السطح تنفذ غالبًا أو تمتصّ. ويمكنك اختبار ذلك بإدارة النظارة الشّمسيّة المستقطبة عند النظر من خلالها على سطح مستوٍ لبحيرة أو طريق. وبما أنّ معظم الطرق أفقيّة، فإنّ عدسات النظارات الشّمسية تصنع بحيث يكون محورها عموديًّا لتحجب المركبة الأفقية المنعكسة، وبذلك تقلل الوهج. الناس الذين يذهبون لصيد السمك يضعون النظارات المستقطبة للتخلّص من الوهج المنعكس من سطح البحيرة، أو تيار الماء، وبذلك يرون ما تحت سطح الماء بوضوح أكبر (الشّكل 24 – 47).

الشّكل 24 – 46. الضَّوء المنعكس عن سطح غير فلزي، كسطح الماء المنبسط، يكون مستقطبًا جزئيًّا باتجاه موازٍ للسطح.

(أ) (ب)

الشّكل 24 – 47. صور نهر (أ) يسمح للضَّوء كلّه بدخول عدسة الكاميرا. (ب) باستعمال مستقطبة. تضغط المستقطبة بحيث تمتصّ معظم الضَّوء (المستقطبة) المنعكس عن سطح الماء، ليسمح للضَّوء الخافت من قعر النهر، وأيّ سمكة هناك، لترى بوضوح أكثر.

يعتمد مقدار الاستقطاب في الحزمة المنعكسة على الزاوية، حيث يتغيّر من عدم الاستقطاب للسقوط العموديّ إلى 100% استقطاب عند زاوية تعرف **بزاوية الاستقطاب**.* θ_p. ترتبط هذه الزاوية بمعامل الانكسار للمادتين على جانبي الحدّ الفاصل بالمعادلة

$$\tan\theta_p = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textbf{(24 – 6أ)}$$

حيث n_1 معامل انكسار المادة التي يسير فيها الضَّوء، و n_2 هو معامل انكسار المادة خلف الحدّ الفاصل العاكس. إذا كان الضَّوء يسير في الهواء، $n_1 = 1$، فتصبح المعادلة

$$\tan\theta_p = n \qquad \textbf{(24 – 6ب)}$$

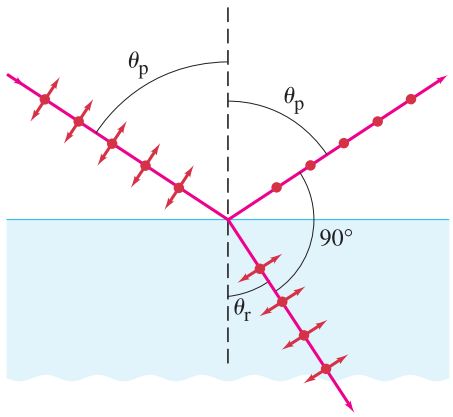
تُسَمّى زاويةُ الاستقطاب θ_p أيضًا **زاويةَ بروستر**، و (المعادلة 24 – 6) بمعادلة بروستر، نسبة للفيزيائي الاسكتلندي دافيد بروستر (1781 – 1868)، الذي استنتجها عمليًّا في عام 1812. ويمكن اشتقاق هذه المعادلة من نظرية الموجات الكهرومغناطيسية للضَّوء. ومن المهم أنه عند زاوية بروستر، فإنّ الضَّوءان المنعكس والنافذ (المنكسر) يصفان زاوية 90° بينهما؛ أي أنّ $\theta_p + \theta_r = 90°$، حيث الزاوية θ_r هي زاوية الانكسار. (الشّكل 24 – 48). ويمكن رؤية ذلك إذا عوّضنا (المعادلة 24 – 6أ)

$$n_2 = n_1 \tan\theta_p = n_1 \sin\theta_p/\cos\theta_p$$

في قانون سنيل

$$n_1 \sin\theta_p = n_2 \sin\theta_r$$

لنحصل على $\cos\theta_p = \sin\theta_r$ والذي ينطبق فقط إذا كانت $\theta_p = 90° - \theta_r$



الشّكل 24 – 48. عند θ_p يكون الضَّوء المنعكس مستقطبًا باتجاه موازٍ للسطح، وتكون $\theta_p + \theta_r = 90°$، حيث θ_r هي زاوية الانكسار. (النقاط الكبيرة تمثل الاهتزازات العمودية على الصفحة).

المثال 24-13 زاوية الاستقطاب

(أ) عند أيّ زاوية سقوط ينعكس ضوء الشّمس من سطح بحيرة مستقطبًا؟ (ب) ماذا تساوي زاوية الانكسار؟

النّهج: زاوية الاستقطاب على السطح هي زاوية بروستر. (المعادلة 24 – 6 ب). ونجد زاوية الانكسار من قانون سنيل.

الحلّ: (أ) نستعمل (المعادلة 24 – 6 ب) علمًا أنّ $n = 1.33$. لذلك $\tan\theta_p = 1.33$ تعطينا $\theta_p = 53.1°$.
(ب) من قانون سنيل، $\sin\theta_r = \sin\theta_p/n = \sin 53.1°/1.33 = 0.601$ لتعطي $\theta_r = 36.9°$

ملحوظة: $\theta_p + \theta_r = 53.1° + 36.9° = 90.0°$، كما هو متوقع.

* هناك جزء فقط من الضَّوء الساقط ينعكس على سطح المادة الشفافة رغم أنّ هذا الضَّوء مستقطب 100% (إذا كانت $\theta = \theta_p$). أمّا باقي الضَّوء، والذي ينفذ إلى الوسط الجديد فيكون مستقطبًا جزئيًّا فقط.

11-24 شاشات عرض البلّورات السّائلة (LCD) *

استعمال رائع للاستقطاب هو **شاشات عرض البلورات السّائلة** (LCD). تستعمل LCD شاشة عرض في الحاسبات اليدوية، وساعات المِعْصَم (اليد) الرقمية، والهواتف المحمولة، وفي الشاشات الملونة في الحاسوب وشاشات التلفزيون.

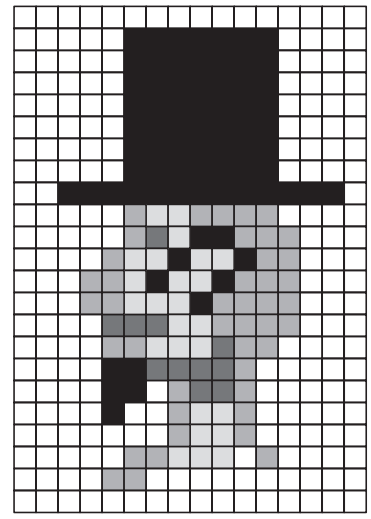
إنّ شاشةَ عرض البلورة السائلة مصنوعةٌ من عددٍ كبيرٍ من المستطيلات الصغيرة المسماة "عناصر الصورة" بيكسل. تعتمد الصورة التي تراها على أيّ هذه العناصر معتمة أو مضيئة، وبأيّ لون. كما هو مقترح في (الشّكل 24 – 49) لصورة بسيطة بالأسود والأبيض.

البلورات السائلة هي مواد عضوية تكون عند درجة حرارة الغرفة في طور ليس بالصلب التام ولا بالسائل التام. إنّها نوع من الهلام وجزيئاتها تظهر عشوائية في التوزيع، وهي خاصية في السوائل. كما ناقشنا في (البند 13 – 1)، و(الشّكل 13 – 2). كما أنها تعطي خاصية الاصطفاف كبلورة صلبة (الشّكل 13 – 2أ). ولكن في بعد واحد. إنّ البلورات السائلة التي نجدها مفيدة مكونة من جزيئات صلبة تشبه القضبان، تتفاعل مع بعضها بصورة ضعيفة، وتترتب موازية لبعضها، كما في (الشّكل 24 – 50).

في شاشة البلورات السائلة (LCD) البسيطة، يحتوي كلُّ عنصر صورةً بلورةً سائلةً بين صفيحتين زجاجيتين سطوحها الداخلية تفرك لتكوين خدوش متوازية عرضها في نطاق النانومتر. وتترتّب جزيئات البلورة السائلة الشبيهة بالقضبان والمتصلة بالخدوش على امتداد هذه الخدوش. الصفيحتان عادة تحتويان على خدوش بينها زاوية 90°، والقوى الضعيفة بين هذه الجزيئات تؤدي للحفاظ عليها ممتدة مع أقرب جيرانها، لتنتج ذلك النمط الملتوي والمبين في (الشّكل 24 – 51أ).

تحتوي كلّ من السّطوح الخارجية للصفائح الزجاجية على غشاء رقيق مستقطب، وهي كذلك مرتبة لتصنع 90° مع بعضها. ويصبح الضَّوء غير المستقطب الساقط من اليسار مستقطبًا خطيًّا، وتحافظ جزيئات البلورة السائلة على هذا الاستقطاب على امتداد شكل القضبان. أي أنّ مستوى استقطاب الضَّوء يدور مع الجزيئات عند مرور الضَّوء خلال البلورة السائلة. وهكذا يخرج الضَّوء ومستوى استقطابه، وقد دار بزاوية 90°، وتمر من المستقطب الثاني بسهولة. وهنا عنصر الصورة الدقيقة (LCD) يظهر مضيئًا (لامعًا).

والآن، افرض أنّ جهدًا تم التأثير به في الأقطاب الشفافة على كلّ صفيحة من عنصر الصورة. الجزيئات شبيهة القضبان مقطعة (أو يمكن أن تكتسب فصلًا داخليًّا للشحنات بتأثير المجال الكهربائي المؤثر). يعمل الجهد المؤثر على ترتيب الجزيئات، وبذلك لا تتبع النمط الملتوي المبين في (الشّكل 24 – 51أ)، بحيث تمتد الجزيئات النهائية دائمًا في مستوى موازٍ للصّفائح الزّجاجية. يؤدي المجال الكهربائي المؤثر إلى ترتيب الجزيئات منبسطة، يسار – يمين (عمودية على الصفائح الزجاجية)، ولا تؤثر في استقطاب الضَّوء بصورة قويّة. إنّ الضَّوء الداخل والمستقطب خطيًّا لا يتم إدارة مستوى استقطابه عند المرور، ولا ينفذ الضَّوء من المستقطب الثاني (الأفقي). وهكذا، يبدو عنصر الصورة معتمًا بوجود الجهد المؤثر*.

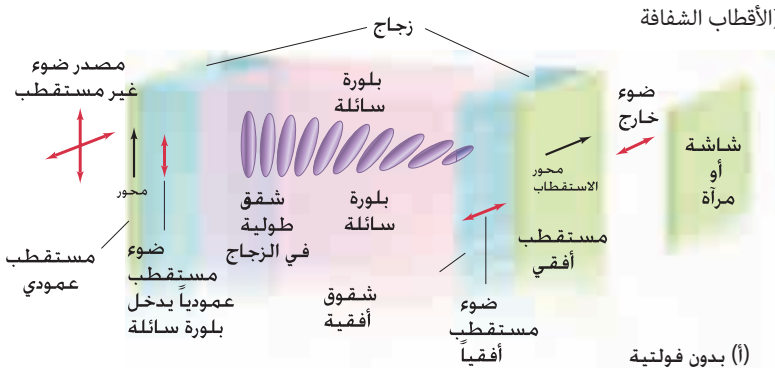


الشّكل 24 – 49. مثال على خيال مكوّن من عدد كبير من المربعات الصغيرة أو البيكسل (عناصر الصورة). قوة التّفريق في هذا الصورة ضعيفة.

الشّكل 24 – 50. تترتب جزيئات البلورة السائلة في بعد واحد (متوازية) ولكن لها مواقع عشوائية (يمين – يسار، أعلى – أسفل.)

الشّكل 24 – 51 (أ) الشّكل "الملتوي" للبلورات السائلة. يدور مستوى استقطاب الضَّوء 90°. هناك خطٌ واحد من الجزيئات واضح. (ب) جزيئات اتجاهاتها مشوهة نتيجة المجال الكهربائيّ. مستوى الاستقطاب لا يتغير، لذلك لا يمر الضَّوء خلال المستقطب الأفقيّ. (الأقطاب الشفافة ليست مبينة).

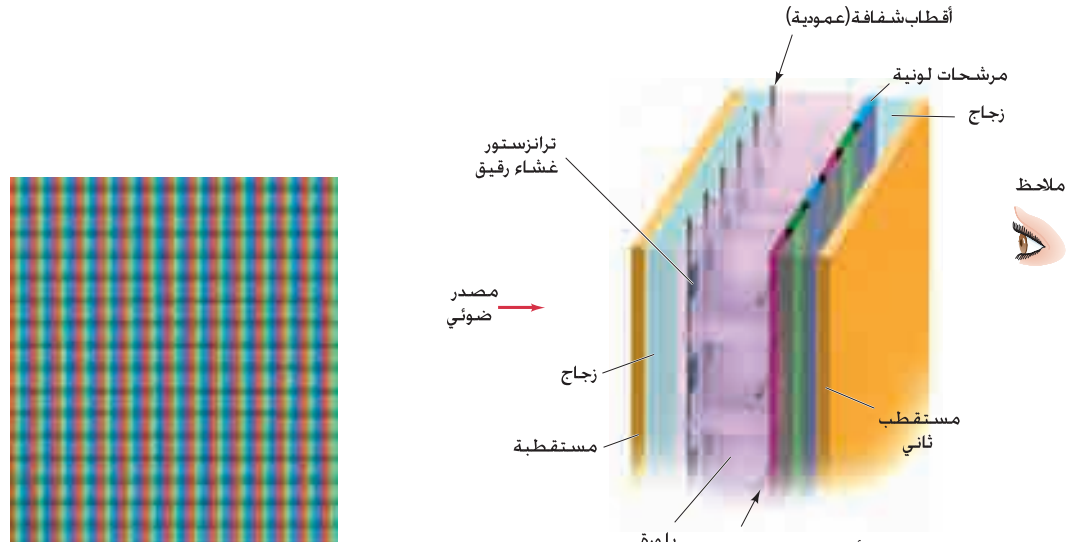
* في بعض شاشات العرض، تكون المستقطبات متوازية (تبقى الخدوش متعامدة لتبقي على اللّي أو الثني). عندها، وفي غياب الجهد ينتج عتمة (لا ضوء) وبوجود الجهد ينتج ضوء لامع.



تُستعمل شاشاتُ العرض البسيطة للساعات والحاسبات الضَّوءَ المتاح كمصدر (لا تستطيع أن ترى العرض في الليل). وهناك مرآة خلف LCD تعكس الضَّوء نحو الخلف. كما أنّ هناك عددًا قليلًا من عناصر الصورة، تعود إلى الأجزاء الممتدة التي يحتاج إليها لتشكّل الأعداد من 0 إلى 9 (وأحيانًا الحروف في بعض الشاشات)، كما هو مبين في (الشّكل 24 – 52). أيّ عناصر صورة تؤثر عليها بالجهد تبدو داكنة، وتشكل جزءًا من العدد. ودون هذا الجهد، تقوم العناصر بتحرير الضَّوء خلال المستقطبات إلى المرآة ونحو الخلف، والتي تشكل خلفية إلى الأرقام على الشاشة.

التلفزيون الملون وشاشات الحاسوب معقدة أكثر. يتكوّن عنصر الصورة من ثلاث خلايا، أو دون العنصر، كلّ منها مغطى بمرشح ضوئيّ أحمر، أو أخضر، أو أزرق. إنّ تغيير لمعان هذه الألوان الثلاثة الأساسية يمكن أن ينتج أيّ لون طبيعيّ. تتكوّن الشاشةُ ذات النوعية الجيدة من مليون عنصر صورة أو أكثر، مثل سطح أنبوب أشعة المهبط الملون (CRT) (الشّكل 17 – 20). وخلف هذا الترتيب من عناصر الصورة مصدرٌ ضوئيٌّ، هي أنابيب وميضة رفيعة عادة مثل قطر القشة. يمر الضَّوء خلال عناصر الصورة كما في (الشّكلين24 – 51أ، و ب). انظر (الشّكل 24 – 53).

الشّكل 24 – 52. شاشة حاسبة LCD الأجزاء السوداء أو عناصر الصورة يؤثر فيها جهد. لاحظ أنّ رقم 8 يستخدم العناصر السبعة كلّها. أمّا الأرقام الأخرى فتستخدم أقلّ من ذلك.



الشّكل 24 – 53 التركيب الأساسي لـشاشة LCD حاسب أو تلفزيون. كلّ عنصر صورة يستخدم ثلاث خلايا (دون عنصر صورة)، كلّ منها مزود بمرشح أحمر، أو أخضر، أو أزرق. شاشة عرض فاعلة لها ترانزستورات أغشية رقيقة بل وأكثر تعقيدًا.

في شاشة عرض LCD **غير فاعلة المصفوفة**، هناك مجموعة من الأقطاب العمودية والأفقية تحمل إشارات كهربائية إلى عناصر الصورة: سلكان، واحد من كلّ مجموعة، "يتقاطعان" عند كلّ "دون العنصر". وتوقيت إلكتروني دقيق (يدعى "عنونة")، وتحوّل الجهد هناك تشغيل – إطفاء (on - off). يمكن أن تؤثر الإشارات في دون العناصر القريبة لتقلل التباين ونوعية الصورة. ويمكن الحصول على صور أفضل **بمصفوفة فاعلة** من LCD والتي لها ترانزستور الغشاء الرقيق (TFT) عند كلّ دون عنصر للتحكم بإضاءتها بدقة.

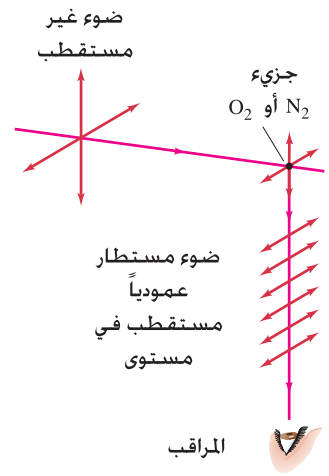
وللحصول على مدى رماديّ أو مدى من وضوح اللون، لا يستطيع كلُّ دون عنصر أن يتحول ببساطة من تشغيل إلى إطفاء كما في (الشّكل 24 – 51). وتستعمل عدة تقنيات تعتمد على تركيب الـ LCD. إذا كان الجهد في (الشّكل 24 – 51 ب) صغيرًا بصورة كافية، فإنّ عدم ترتيب الجزيئات يكون صغيرًا، بما يسمح بدوران متجه الاستقطاب، وهذا يسمح لبعض الضَّوء بالمرور، فالمقدار الحقيقي يعتمد على الجهد. تبادليًّا، كلُّ دون عنصر يمكن إعطاؤه نبضة – طول الوقت الذي تكون فيه تشغيل (*on*) يؤثر في السّطوع الناتج. ويمكن الحصول على أثر شدة السّطوع أو ضعفه بواسطة عدد دون العناصر المجاورة ذات اللون نفسه، والتي تكون في حالة تشغيل أو إطفاء؛ هذا النوع يسمح للعين "أخذ المتوسط" لكثير من دون العنصر، ولكن هذا يقلل الحدّة، أو قدرة التّفريق للصورة.

12-24 تشتت الضَّوء بواسطة الجو *

إنّ احمرار الغروب، وزرقة السماء، واستطارة الضَّوء في السماء (جزئيًّا على الأقل) ظواهر يمكن تفسيرها على أساس استطارة الضَّوء بواسطة جزيئات الغلاف الجوّيّ. في (الشّكل 24 – 54) نرى الضَّوء غير المستقطب من الشّمس يسقط على جزيءٍ من الغلاف الجوّيّ الأرضي. المجال الكهربائي في الموجة الكهرومغناطيسية (EM) تجعل الشحنات الكهربائية في الجزيء تبدأ بالحركة، ويمتص الجزيء بعض طاقة الإشعاع الساقط. لكنّه يعيد إشعاع هذا الضَّوء لأنّ الشحنات في حالة اهتزاز. وكما ناقشنا في (البند 22 – 2)، فإنّ الشحنات المهتزة تنتج موجات كهرومغناطيسية. وتكون الشدة عظمى على امتداد خطّ عمودي على الاهتزاز، وتنخفض إلى الصفر على امتداد خط الاهتزاز (البند 22 – 2). في (الشّكل 24 – 54)، تحلل حركة الشحنات إلى مركبتين. إنّ المشاهد باتجاه عمودي على اتجاه ضوء الشّمس، كما هو مبين، سوف يرى ضوءًا مستقطبًا خطيًّا؛ بسبب عدم وجود ضوء يُشَعُّ على امتداد الخطّ للمركبة الثانية للاهتزاز. (عند النظر على امتداد خط الاهتزاز، لا ترى ذلك الاهتزاز، ولذلك لا ترى الموجات التي يولدها.) وعند زوايا نظر أخرى، ستكون المركبتان موجودتين؛ إلا أن إحداهما ستكون أقوى على أيّ حال. لذا، فإنّ الضَّوء يبدو مستقطبًا جزئيًّا. وهكذا، فعملية الاستطارة تفسر استقطاب ضوء السماء.

إنّ استطارة الضَّوء بواسطة جو الأرض يعتمد على λ. وبالنسبة إلى جُسيماتٍ أصغر بكثيرٍ من طول موجة الضَّوء (كجزيئات الهواء)، سوف تشكّل هذه الجُسيمات حواجز أقلّ بالنسبة إلى الأمواج الطويلة منها في الأمواج القصيرة. تقلّ الاستطارة، في الحقيقة، مع $1/\lambda^4$. وهكذا، فإنّ الضَّوءين الأزرق والبنفسجيّ يستطيران أكبر بكثير من الأحمر والبرتقالي، ولذلك تبدو السماء زرقاء. وعند الغروب، تقطع أشعة الشّمس مسارًا أكبر عبر الجوّ. ولهذا، فإنّ كثيرًا من الضَّوء الأزرق يكون قد فقد بسبب الاستطارة. فالضَّوء الذي يصل سطح الأرض وينعكس عن الغيوم والضباب يفتقر للضَّوء الأزرق. ولهذا يبدو الغروب محمرًّا.

ينطبق اعتماد الاستطارة على $1/\lambda^4$ فقط إذا كانت الأجسام المسببة للاستطارة أصغر بكثير من طول موجة الضَّوء. وهذا ينطبق على جزيئات الأكسجين والنيتروجين والتي أقطارها نحو 0.2 nm. أمّا الغيوم فتحتوي على رذاذ الماء أو البلورات، وهي أكبر بكثير من λ. فهي تعمل على استطارة ترددات الضَّوء كلّها بالنسبة ذاتها تقريبًا. لذا، تبدو الغيوم بيضاء (أو رمادية، إذا وقعت في الظل).



ينفذ ضوء الشمس غير المستقطب من جزيئات الهواء، ويرى المراقب من زاوية قائمة أن الضوء المستقطب في المستوى لا يكون له مركبة اهتزاز على امتداد خط الاهتزاز.

تطبيق الفيزياء

لماذا يكون لون السماء أزرق.
لماذا يكون لون الغروب أحمر.

ملخص

لقد دعمت المشاهدات بقوّة أنّ الضَّوء يظهر **التّداخل والحيود**؛ النّظريّة الموجيّة للضَّوء. وتفسّر النّظريّة الموجيّة كذلك الانكسار وحقيقة أنَّ الضَّوء يسير ببطء في المواد الصلبة الشفافة والسائلة ممّا هو عليه في الهواء.

ولقد ساعد **مبدأ هويغنز** على التنبؤ بالنّظريّة الموجيّة، وهذا المبدأ ينصّ على أنّ كلّ نقطة على مقدمة الموجة يمكن اعتبارها مصدرًا للمويجات التي تنتشر نحو الأمام بسرعة الموجة نفسها.

إنّ طول موجة الضَّوء في وسط معامل انكساره n هو

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \qquad (1 - 24)$$

حيث λ طول الموجة في الفراغ، أمّا التردد فلا يتغير.

لقد عرضت تجربة شقي يانغ بوضوح تداخل الضَّوء. كما تمّ تفسير الهدب المضيئة على أساس التّداخل البناء بين حزمتين قادمتين من الشّقّين، حيث فرق المسار الضوئي هو عدد صحيح من الطّول الموجيّ. وأنّ المناطق المعتمة بينها تعزى إلى التداخل الهدام حيث يختلف المسار الضوئي بـ $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda$ وهكذا.

الزوايا θ التي يحدث عندها **التّداخل البناء** تعطى بـ

$$\sin\theta = m\frac{\lambda}{d} \qquad (2 - 24أ)$$

حيث λ طول موجة الضَّوء، وd البعد بين الشّقّين، أما m فهو عدد صحيح $(0, 1, 2, \cdots)$. **التّداخل الهدام** ينتج عند زوايا θ حيث

$$\sin\theta = \left(m + \tfrac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{d} \qquad (2 - 24ب)$$

حيث m عدد صحيح $(0, 1, 2, \cdots)$.

مصدران ضوئيان يكونان مترابطين تمامًا إذا كانت الموجات الصادرة عنهما لها التردد نفسه، وتبقيان على الطور ذاته بينهما في الأوقات جميعها. وإذا كان للموجات الصادرة عنهما علاقة طور عشوائية طوال الوقت (كما في مصباحين ضوئيين متوهجين) فإنّ المصدرين يكونان **غير مترابطين**.

تردد أو طول موجة الضَّوء يحدد لونه. يمتد **الطّيف المرئيّ** من نحو 400 nm (بنفسجي) إلى نحو 750 nm (أحمر).

تحلل المناشير الزجاجية الضَّوء الأبيض إلى مركباته اللونية؛ لأنّ معامل الانكسار يتغير مع طول الموجة، وهذه الظاهرة تعرف **بالتّفريق اللوني**، والذي له عدة تطبيقات عملية، كطلاء العدسات وحلقات نيوتن.

وتنطبق الصيغة الرياضية $\sin\theta = m\lambda/d$ للتداخل البناء أيضًا على **محززة الحيود** التي تتكون من شقوق كثيرة متوازية، يفصل بينها مسافة d. وتكون قمم التّداخل البناء أكثر لمعانًا وحدَّة في محززة الحيود مما هي عليه في تجربة شقّيّ يانغ.

تستعمل محززة الحيود (أو المنشور) في **جهاز التحليل الطّيفي** لفصل الألوان المختلفة، أو لملاحظة **الأطياف الخطية**؛ ولرتبة معينة m، فإنّ θ تعتمد على λ. إنّ التحديد الدقيق لطول الموجة يمكن إجراؤه بجهاز التحليل الطّيفي بقياس الزاوية θ بدقة كبيرة.

يعود **الحيود** لحقيقة أنّ الضَّوء، كباقي الموجات، ينحني حول الأجسام التي يمرّ بها، وينتشر بعد مروره في الشّقّوق الضيقة. هذا الانحناء يعطي نمط الحيود الذي يعود إلى التّداخل بين الأشعة الضوئية التي تسير مسافات مختلفة.

إنّ الضَّوء الذي يمر خلال فتحة ضيقة عرضها D (في حدود طول الموجة) سوف ينتج نمطًا بمركز لامع نصف عرضه θ يعطي بالعلاقة

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{D} \qquad \textbf{(24 – 13)}$$

ويحاط بخطوط خافتة على الجانبين.

الضَّوء المنعكس من السطحين الأمامي والخلفي لغشاء رقيق من مادة شفافة يمكن أن يتداخل. وينتج الاختلاف في الطور بـ $180°\ (\frac{1}{2}\lambda)$ عندما ينعكس الضَّوء على سطح حيث يزداد معامل الانكسار. تداخل الغشاء الرقيق في **الضَّوء غير المستقطب**، تهتز متجهة المجال الكهربائيّ في الاتجاهات العرضية جميعها. إذا اهتز المجال الكهربائيّ فقط في مستوى معين، فيقال إنّ الضَّوء **مستوي الاستقطاب**. كما يمكن أن يكون الضَّوء أيضًا جزئيّ الاستقطاب.

عندما يمرّ شعاع من ضوء غير مستقطب خلال صفيحة **مستقطبة**، يكون الضَّوء الخارج مستقطبًا خطيًّا. وعندما تكون حزمة ضوئية مستقْطَبة، وتمر خلال مستقطِبة فإنّ شدة الضَّوء تتغير عند إدارة المستقطِبة. وهكذا تتصرف الصفيحة **كمستقطِبة أو محلّلة**.

إنّ شدة ضوء حزمة مستقطَبة خطيًا تسقط على مستقطِبة تقل بالمعامل

$$I = I_0 \cos^2\theta \qquad \textbf{(5-24)}$$

حيث θ هي الزاوية بين محور المستقطبة ومستوى الاستقطاب الابتدائي.

يمكن أن يكون الاستقطاب كليًّا أو جزئيًّا **بواسطة الانعكاس**. إذا انعكس الضَّوء الذي ينتقل في الهواء، عن سطح معامل انكسار مادته n، فسيكون الضَّوء المنعكس مستقطبًا كليًّا إذا كانت زاوية السقوط تعطي بالعلاقة

$$\tan\theta_p = n \qquad \textbf{(24 – 6أ)}$$

وحقيقة أنّ الضَّوء يمكن استقطابه، تبيّن أنّ الضَّوءَ موجةٌ عرضية.

أسئلـــة

1. هل ينطبق مبدأ هويغنز على موجات كلّ من الصّوت والماء؟ فسّر ذلك.

2. ما الدليل على أنّ الضَّوءَ نوعٌ من الطّاقة؟

3. لماذا يوصف الضَّوء أحيانًا بأنّه أشعة، وأحيانًا أخرى بأنّه موجات؟

4. نستطيع سماع الأصوات حول الزوايا، لكننا لا نرى حول الزوايا؛ رغم أنّ كلا من الصّوت والضَّوء موجات. فسّر الفرق بينهما.

5. لو غمرت تجربة شقي يانغ في الماء، فكيف سيتغير نمط الهدب؟

6. أُسقط ضوء أحمر وحيد اللون على شقين، ولوحظ نمط التّداخل على شاشة على بعد معين. فسّر كيف سيتغير نمط التّداخل لو استبدل مصدر أزرق للضَّوء بدلا من المصدر الأحمر.

7. شعاعان ضوئيان من المصدر نفسه يتداخلان تداخلا هدامًا إذا اختلف مسارهما، ما مقدار هذا الاختلاف؟

8. لماذا كانت مشاهدة تداخل الشّقّين دليلا على النّظريّة الموجيّة للضَّوء أكثر من مشاهدة الحيود؟

9. قارن بين تجربة الشّقّين لموجات كلّ من الصّوت الضَّوء. ناقش أوجه الشبه والاختلاف.

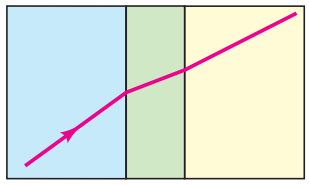
10. لماذا لا ينتج الضَّوء من مصباحي السيارة نمط تداخل؟

11. افرض أنّ ضوءًا أبيض يسقط على الشّقّين في (الشّكل 24 – 7)، لكن إحدى الفتحتين تغطى بمرشح أحمر (700 nm) والأخرى بمرشح أزرق (450 nm). صف النمط على الشاشة.

12. عند مرور ضوء أبيض في صفحة زجاج النافذة، فإنّه لا يتوزع إلى ألوان كما في المنشور. فسّر السبب.

13. لنوعي العدسات المفرقة والمجمعة، ناقش كيف يختلف البعد البؤري للضَّوء الأحمر عنه للضَّوء البنفسجيّ.

14. شعاع ضوئيّ ينكسر خلال ثلاث مواد مختلفة (الشّكل 24 – 55). رتّب هذه المواد حسب معامل انكسارها، من الأقل إلى الأكثر.



الشّكل 24 – 55. (السؤال 14)

15. ضع يدك أمام عينيك، وركز على مصدر ضوئي بعيد خلال فتحة ضيقة بين إصبعين. (اضبط إصبعيك للحصول على أفضل نمط) صف النمط الذي تشاهده.

16. ماذا يحدث لنمط الحيود لشق منفرد إذا غُمر الجهازُ كلُّه: (أ) في الماء؟ (ب) في الفراغ بدلا من الهواء؟

17. للحيود في شق منفرد، ما أثر زيادة: (أ) عرض الشّق؟ (ب) طول الموجة؟

18. ما الفرق بين نمطي التّداخل الناتجين من: (أ) فتحتين البعد بينهما 10^{-4} cm (ب) محززة حيود تحتوي على 10^4 lines/cm ؟

19. في محززة الحيود، ما فائدة: (أ) الشّقوق الكثيرة؟ (ب) الحزوز المتقاربة؟

20. يسقط ضوء أبيض على (أ) محززة حيود. (ب) منشور. يتكون قوس المطر على جدار مباشرة تحت الشّعاع الأفقي الساقط في كلّ حالة. ما لون أعلى القوس في كلّ حالة؟ فسّر ذلك.

21. يتكون ضوء من أطوال موجية بين 400 nm، و 700 nm، يسقط عموديًّا على محززة حيود، لأيّ الرتب سيكون هناك (إذا وجد) تطابق في الطّيف المنظور؟

22. لماذا تشاهد هدب التّداخل فقط في غشاء رقيق مثل فقاعة الصابون، وليس لقطعة سميكة من الزجاج، مثلاً؟

23. إذا أمسكنا بقرص مُدمَج (CD) بزاوية في الضَّوء الأبيض، فإنّ الضَّوء المنعكس يكون طيفًا كاملا (الشّكل 24 – 56). فسّر ذلك. ماذا تتوقع أن ترى لو أنّ ضوءًا وحيد اللون استعمل بدلا من ذلك؟

الشّكل 24 – 56 (السؤال 23)

24. لماذا تكون حلقات نيوتن (الشّكل 24 – 31) متراصّةً أكثر كلّما ابتعدنا عن المركز؟

25. تبدو بعض العدسات المطليَّة صفراء مخضرّةً عندما نراها بالضَّوء المنعكس. ما الأطوال الموجيّة التي تتوقع أنّ الطّلاء مصمّمٌ لينفذها بصورةٍ تامة؟

26. تبدو بقعة زيت على بركة مضيئة عند الحواف، حيث سمكها أقلّ بكثيرٍ من طول موجات الضَّوء المرئيّ. ماذا يمكنك القول عن معامل انكسار الزيت؟

27. ماذا يخبرنا استقطاب الضَّوء عن طبيعته؟

28. فسّر ميزة النظارات الشّمسية المستقطبة مقارنة مع النظارات المطليَّة بالقصدير العادية؟

29. متى تقول إنّ النظارات مستقطبة أو غير مستقطبة؟

30. صفيحتان مستقطبتان بينهما زاوية 90° لا تسمحان لمرور ضوء خلالهما. لكن ثلاث صفائح مستقطبة بين كلّ منها زاوية 45° سوف تسمح ببعض الضَّوء. ماذا سيحدث لضوء غير مستقطب لو رتبت أربع صفائح كلّ منها تختلف بزاوية 30° عن التي أمامها؟

***31.** ماذا سيكون لون السماء لو كانت الأرض دون غلاف جوّيّ؟

***32.** لو كانت كثافة الغلاف الجويّ للأرض أكثر بـ 50 مرة مما هي عليه، فهل سيبقى ضوء الشّمس أبيض؟ أم هل سيكون له لون آخر؟

مسائـل

24 – 3 تداخل الشّقّين

1. (I) يسقط ضوء وحيد اللون على شقين البعد بينهما 0.016 mm. وينتج الهدبة الخامسة عند زاوية 8.8°. ما طول موجة الضَّوء المستعمل؟

2. (I) لوحظ أنّ الهدبة الثالثة لضوء 610 nm عند زاوية 18° عند سقوط الضَّوء على شقين ضيقين. ما البعد بين الشّقّين؟

3. (II) ضوء وحيد اللون يسقط على شقين ضيقين البعد بينهما 0.048 mm الهدب المتتابعة على شاشة تبعد 5.00 m تبعد عن بعضها 6.5 cm قرب مركز النمط. جد طول الموجة والتردد للضَّوء المستعمل.

4. (II) ضوء متواز من He – Ne ليزر، طول موجته 656 nm، يسقط على شقين ضيقين جدًّا، البعد بينهما 0.060 mm. كم تتباعد الهدب عند مركز النمط على شاشة تبعد 3.6 m من الشّقّين؟

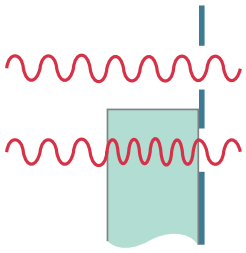
5. (II) يسقط ضوء طول موجته 680 nm على شقين، وينتج نمط تداخل فيه الهدبة ذات الرتبة الرابعة تبعد 38 mm من الهدبة المركزية على شاشة تبعد 2.0 m. فما البعد بين الشّقّين؟

6. (II) تعبر الموجتان 720 nm، و 660 nm من شقين البعد بينهما 0.58 mm، ما البعد بين الهدب ذات الرتبة الثانية لكلّ من الموجتين على شاشة تبعد 1.0 m عن الشّقّين؟

7. (II) في تجربة الشّقّين، وجد أنّ الضَّوء الأزرق ذا طول الموجة 460 nm يعطي هدبة لامعة ذات الرتبة الثانية عند مكان معين على الشاشة. ما طول موجة الضَّوء المرئيّ الذي سيكون له هدبة معتمة في المكان نفسه؟

8. (II) موجتا ماء، قمتاهما متوازيتان، وتبعدان 2.5 cm تمران خلال فتحتين البعد بينهما 5.0 cm في لوحة عند نقطة على بعد 2.0 m من اللوحة، عند أيّ زاوية بالنسبة لخط مستقيم خلال الفتحة ستكون هناك حركة موجية ضعيفة أو انعدام للحركة الموجيّة؟

9. (II) افرض أنّ قطعة رقيقة من الزجاج وضعت أمام الفتحة السفلية في (الشّكل 24 – 7) بحيث إنّ الموجتين تدخلان الشّقّين بفارق في الطور مقداره 180° (الشّكل 24 – 57). صف بالتفصيل نمط التّداخل على الشاشة.



الشّكل 24 – 57 (سؤال 9)

10. (II) في تجربة الشّقّين، الهدبة اللامعة الثالثة لضوء طول موجته 500 nm تقع على بعد 12 mm من الهدبة المركزية اللامعة على شاشة تبعد 1.6 m من الشّقّين. فإذا أسقط ضوء طول موجته 650 nm بعد ذلك على الشّقّين، فعلى أيّ بُعد من الهدبة المركزية ستقع الهدبة المضيئة الثانية؟

11. (II) شقان ضيقان البُعد بينهما 1.0 mm أسقط عليهما ضوء طول موجته 544 nm. جد المسافة بين الهدب المتجاورة على شاشة تبعد 5.0 m من الشّقّين.

12. (III) ضوء طول موجته 480 nm في الهواء يسقط على شقين البعد بينهم 6.00×10^{-2} mm. غمر الشّقّان في الماء، إضافة لشاشة عرض تبعد 40.0 cm. ما المسافة بين الهدب على الشاشة؟

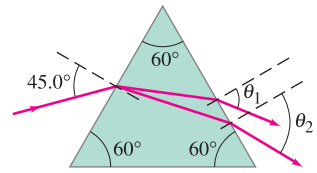
13. (III). صفيحة رقيقة جدًّا من البلاستيك ($n = 1.60$) تغطي إحدى الشّقّين في تجربة الشّقّ المزدوج، وأضيئت بضوء طول موجته 640 nm. وكانت النّقطة المركزية على الشاشة معتمة بدل أن تكون لامعة. ما أقلّ سمك للبلاستك؟

24 – 4 التّفريق اللونيّ

14. (I) بأيّ نسبة مئوية، تزيد سرعة الضَّوء الأحمر (700 nm) على سرعة الضَّوء البنفسجيّ (400 nm) في زجاج الفلنت (حجر القدّاحة) أو الصَّوان؟ (انظر الشّكل 24 – 14)؟

15. (II) شعاع ضوئي يسقط على قطعة زجاج بزاوية سقوط 60.00° يحتوي الموجتين 450.0 nm، و 700.0 nm اللتين معامل انكسار الزجاج لهما 1.4820، و 1.4742 على الترتيب. ما الزاوية بين الشّعاعين المنكسرين؟

16. (III) حزمةٌ ضوئيّةٌ متوازيةٌ تحتوي الموجتين $\lambda_1 = 450\ \text{nm}$ و $\lambda_2 = 650\ \text{nm}$، تدخل زجاج الفلنت (حجر القدّاحة) الصوّان أو لمنشور متساوي الأضلاع مبيّن في (الشّكل 24 – 58). عند أيّ زاوية يخرج كلّ شعاع من المنشور؟ (اعط قيمة الزاوية بالنسبة للعمودي على وجه المنشور).



الشّكل 24 – 58
(المسألتان 16، و 87)

24 – 5 حيود الشّقّ المنفرد

17. (I) إذا سقط ضوء طول موجته 580 nm على شق عرضه 0.0440 mm، فما العرض الزاوي الكامل للهدبة المركزية للحيود؟

18. (I) ضوء وحيد اللون يسقط على شق عرضه $2.60 \times 10^{-3}\ \text{mm}$. إذا كانت الزاوية بين الهدبتين المعتمتين من الرتبة الأولى على جانبي الهدبة المركزية هي 35.0° (من الهدبة المعتمة للهدبة المعتمة). فما طول موجة الضّوء المستعمل؟

19. (II) ضوء طول موجته 520 nm، يسقط على شق منفرد عرضه $3.20 \times 10^{-3}\ \text{mm}$. احسب بُعد أوّل هدبة حيود لامعة عن الهدبة المركزية إذا كان بعد الشاشة 10.0 m.

20. (II) شقٌّ منفردٌ عرضُهُ 1.0 mm، أضيء بضوء طول موجته 450 nm. ما عرض الهدبة المركزية (بـ cm) في نمط الحيود على شاشة تبعد 5.0 m؟

21. (II) ضوء وحيد اللون طول موجته 653 nm يسقط على شق منفرد. إذا كانت الزاوية بين أول هدبتين لامعتين على جانبي الهدبة المركزية هو 32°، فاحسب عرض الشّقّ؟

22. (II) ما عرض الهدبة المركزية للحيود على شاشة تبعد 2.30 m خلف شقٍّ منفرد عرضه 0.0348 mm ويضاء بموجة 589 nm؟

23. (II) عندما يسقط ضوء أزرق طول موجته 440 nm على شقٍّ منفرد، فإنّ أوّلَ هدبتين معتمتين على جانبي الهدبة المركزية تبعدان بزاوية 55.0° عن بعضهما. حدّد عرض الفتحة.

24. (II) عندما يسقط ضوء بنفسجي طول موجته 415 nm على شق منفرد، فإنّه ينتج هدبة مركزية من الحيود عرضها 9.20 cm على شاشة بعدها 2.55 m. فما عرض الفتحة؟

25. (II) شقّ ضيق ينتج حيودًا لضوء طول موجته 650 nm بحيث إنّ هدبة الحيود المركزية عرضها 4.0 cm على شاشة تبعد 1.50 m. ماذا سيكون عرض الهدبة المركزية لضوء طول موجته 420 nm؟

26. (II). لطول موجة λ، ما أكبر عرض لفتحة بحيث لا يكون هناك هدب حيود معتمة؟

24 – 6 و 24 – 7 محززات الحيود

27. (I) عند أيّ زاوية سوف تظهر هدبة لامعة لضوء 560 nm في رتبة الطّيف الثانية عندما تسقط على محززة حيود شقوقها تبعد $1.45 \times 10^{-3}\ \text{cm}$ عن بعضها؟

28. (I) شبكة حيود تحتوي 3500 line/cm، تنتج هدبة في رتبة الطّيف الثالثة عند زاوية 28.0°. ما طول موجة الضّوء المستعمل؟

29. (II) كم عدد الخطوط في كلّ سنتيمتر تحتوي محززة حيود إن أنتجت الرتبة الثالثة عند 18.0° لضوء طول موجته 630 nm؟

30. (II). شبكة حيود تحتوي 8300 lines/cm. كم عدد الرتب الطّيفية الكاملة التي يمكن رؤيتها (400 nm إلى 700 nm) عندما تضاء بضوء أبيض؟

31. (II) الرتبة الأولى لخط من ضوء طول موجته 589 nm يسقط على محززة حيود يشاهد عند زاوية 15.5°. ما المسافة بين الخطوط؟ عند أيّ زاوية سوف تشاهد الرتبة الثالثة؟

32. (II) محزّزة حيود فيها $6.0 \times 10^5\ \text{lines/m}$. جد المدى الزاويّ في الرتبة الثانية بين الضّوء الأحمر (طول موجته $7.0 \times 10^{-7}\ \text{m}$) والضّوء الأزرق (طول موجته $4.5 \times 10^{-7}\text{m}$).

33. (II) يسقط ضوء عموديًّا على محزّزة حيود تحتوي 9700 line/cm، وتبين أنّه يحتوي ثلاثًا في طيف الرتبة الأولى عند الزاوية 31.2°، و36.4°، و 47.5°. ما هي هذه الأطوال الموجيّة؟

34. (II) ما أكبر رتبة طيف يمكن رؤيتها إذا تمّ إضاءة محزّزة حيود تحتوي 6000 lines / cm بضوء ليزر 633 nm؟ افرض أنّ السقوط عموديّ.

35. (II) يمكن رؤية رتبتين فقط من رتب الطّيف في كلّ جانب من الهدبة المركزية عند إسقاط ضوء أبيض على محززة حيود. ما أكبر عدد حزوز لكلّ سم لهذه المحزّزة؟

36. (II) ضوء أبيض يحتوي أطوالا موجية من 410 nm إلى 750 nm يسقط على محزّزة تحتوي 8500 lines/cm. فما عرض الطّيف ذي الرتبة الأولى على شاشة تبعد 2.30 m؟

37. (II) استعمل ليزر He – Ne لإنتاج ضوء وحيد اللون طول موجته $\lambda = 6.328 \times 10^{-7}\ \text{m}$ لمعايرة محززة حيود انعكاسية في جهاز تحليل الطّيف. أول خط حيود وجد عند زاوية 21.5° بالنسبة للشعاع الساقط. ما عدد الحزوز لكلّ سم على هذه المحززة؟

38. (II) خطان طيفيان في الرتبة الأولى للطيف. قيس الخطان لمحززة تحتوي 9500 line/cm عند الزوايا بالنسبة للمركز على الجانبين. $+41°08'$، $+26°38'$ و$-41°19'$، $-26°48'$. ما هي الأطوال الموجيّة؟

24 – 8 تداخل الغشاء الرقيق

39. (I) إذا كان سمك فقاعة صابون 120 nm، فما طول موجة الضّوء الذي ينعكس بقوة عند مركز السطح الخارجي عندما يُضاء بلون أبيض بشكل عموديّ؟ افرض أنّ $n = 1.34$.

40. (I) كم البعد بين الهدب المعتمة في (المثال 24 – 8) إذا كانت الصفائح الزجاجية بطول 26.5 cm؟

41. (II) ما أقلّ سمك لغشاء صابون $(n = 1.42)$ بحيث يبدو أسود عند إضاءته بضوء 480 nm؟ افرض أنّ هناك هواء على جانبي الغشاء.

42. (II) تبدو عدسة صفراء مخضرّة ($\lambda = 570\ \text{nm}$ الأقوى) عندما ينعكس ضوء أبيض عنها. ما أقلّ سمك للطلاء $(n = 1.25)$ الذي تعتقد أنّه استعمل على هكذا زجاج $(n = 1.52)$، ولماذا؟

43. (II) شوهدت 31 هدبة مضيئة، و31 هدبة معتمة (دون عدّ البقعة المعتمة المركزية) عندما يسقط ضوء 550 nm عموديًا على عدسة مستوية محدبة موضوعة على سطح زجاج منبسط. (الشّكل 24 – 31). كم هو المركز أكثر سمكًا بالنسبة للحواف؟

44. (II) صفيحة فلزية رقيقة تفصل نهاية قطعتين مستويتين ضوئيًّا من الزجاج، كما في (الشّكل 24 – 33). عندما يسقط ضوء طول موجته 670 nm عموديًا، نستطيع مشاهدة 28 خطا معتما (واحد عند كلّ نهاية). ما سمك الصفيحة؟

45. (I) ما أقلّ سمك لطبقة هواء بين صفيحتين زجاجيتين إذا أريد للزجاج أن يبدو لامعًا عند سقوط ضوء 450 nm عموديًا عليه؟ ما السمك إذا ظهر الزجاج معتمًا؟

46. (II) قطعة من مادة يعتقد أنها ماس مسروق $(n = 2.42)$ غمرت في زيت $(n = 1.43)$ وتمّ إضاءتها بضوء غير مستقطب. وجد أنّ الضّوء المنعكس يكون مستقطبًا كليًّا عند زاوية 59°. فهل هي من الماس حقيقة؟

47. (III) غشاء رقيق من الكحول $(n = 1.36)$ فوق صفيحة زجاجة مستوية $(n = 1.51)$. عندما يسقط ضوء وحيد اللون، يمكن تغيير طول موجة، عموديًا، فإنّ الضّوء المنعكس يكون أقلّ ما يمكن لطول الموجة $\lambda = 512\ \text{nm}$ وأكبر ما يمكن لطول الموجة $\lambda = 640\ \text{nm}$. ما أقلّ سمك لهذا الغشاء؟

48. (III) عند غَمْرِ جهاز حلقات نيوتن والشّكل (24 – 31) في سائل، يقلّ قطر الحلقة الثامنة المعتمة من 2.92 cm إلى 2.48 cm. فما معامل انكسار السائل؟

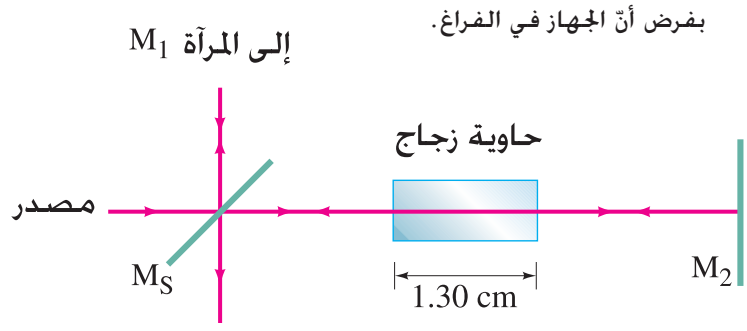
*24 – 9 جهاز تداخل ميكلسون

***49.** (II) ما طول موجة الضَّوء الذي يدخل جهاز ميكلسون إذا أمكن عدّ 644 هدبة مضيئة عندما تتحرك المرآة القابلة للحركة 0.225 mm؟

***50.** (II) يتصل ميكروميتر بالمرآة المتحركة لجهاز التّداخل. عندما يحكم إغلاق الميكروميتر على صفيحة فلزية رقيقة، عدد الهدب المضيئة التي نعدها بالمقارنة بالميكروميتر المفرغ، هو 272. ما سمك الصفيحة؟ طول موجة الضَّوء المستخدم 589 nm؟

***51.** (II) ما المسافة التي يجب أن تتحركها المرآة M_1 في جهاز تداخل ميكلسون إذا كان على 850 هدبة أن تعبر خط المرجع لضوء طول موجة 589 nm؟

***52.** (III) أحد شعاعي جهاز تداخل (الشّكل 24 – 59) يمر عبر وعاء زجاجي يحتوي فجوة عمقها 1.30 cm. وعندما يسمح لغاز أن يملأ الوعاء تدريجيًّا، نعدّ 236 هدبة معتمة تعبر الخط المرجعي. الضَّوء المستعمل طول موجة 610 nm. احسب معامل الانكسار للغاز بفرض أنّ الجهاز في الفراغ.



الشّكل 24 – 59 (مسألة 52)

24 – 10 الاستقطاب

53. (I) مستقطبتان موضوعتان والزاوية بينهما 65°. يسقط عليهما ضوء غير مستقطب. ما نسبة الضَّوء النافذ؟

54. (I) ما هي زاوية بروستر لسطح يفصل بين هواء – زجاج ($n = 1.52$)؟

55. (II) ما هي زاوية بروستر للماس المغمور في الماء إذا سقط الضَّوء على الماس ($n = 2.42$) في أثناء انتقاله في الماء؟

56. (II) رتبت مستقطبتان بحيث يكون الضَّوء الذي يمرّ خلالهما أكبر ما يمكن. عند أيّ زاوية توضع إحداهما بحيث تهبط الشدة بمقدار النصف؟

57. (II) عند أيّ زاوية يجب وضع محاور مستقطبتين لتقليل شدة الضَّوء غير المستقطب الساقط إلى (أ) $\frac{1}{3}$؟ (ب) $\frac{1}{10}$؟

58. (II) مستقطبتان وضعتا بزاوية 40° بينهما، وأُسقط عليهما ضوءٌ مستقطب خطيًّا. إذا نفذ من خلالهما 15% من الضَّوء فقط، فماذا كان الاتجاه الأصلي لاستقطاب الضَّوء الساقط؟

59. (II) مستقطبتان وضعتا بزاوية 38.0° بينهما. ضوء مستقطب بـ 19.0° بالنسبة لكلٍّ منهما يمرّ خلالهما. ما نسبة انخفاض الشدة؟

60. (II) ماذا ستكون زاوية بروستر على سطح الماء لضوءٍ قادمٍ من تحت سطح الماء؟ قارن بزاوية الانعكاس الكلّي الداخلي وبزاوية بروستر من السطح العلوي.

61. (II) يمرّ ضوء غير مستقطب من خمس صفائح بولاروید، محور كلّ منها يصنع زاوية 45° مع سابقته. فما شدة الضَّوء النافذ؟

مسائل عامة

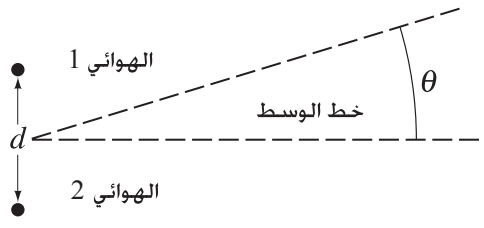
62. ضوءٌ طول موجته 5.0×10^{-7} m يمرّ خلال شقين متوازيين ويسقط على شاشة تبعد 4.0 m. الهدب المضيئة المتجاورة تبعد 2.0 cm. (أ) جد البعد بين الشّقّين. (ب) الشّقّان نفساهما تمَّت إضاءتهما لاحقًا بضوء ذي طول موجة مختلفة، والهدبة الخامسة معتمة لهذا الضَّوء تقع في مكان الهدبة الرابعة المعتمة نفسها للضَّوء السابق. ما طول موجة الضَّوء الثاني؟

63. موجات التلفزيون والمذياع المنعكسة عن الجبال والطائرات يمكن أن تتداخل مع الإشارات المباشرة من المحطة. (أ) ما نوع التّداخل الذي سوف يحدث عندما تصل موجات تلفزيون 75 MHz إلى المستقبل مباشرة من محطة بعيدة، وتنعكس من طائرة قريبة على ارتفاع 118 m فوق المستقبل؟ افرض تغير $\frac{1}{2}\lambda$ في طور الإشارة عند الانعكاس. (ب) أيّ نوع من التّداخل سوف يحصل إذا كانت الطائرة أقرب بـ 22 m إلى المستقبل؟

64. ضوء أحمر من ثلاثة مصادر مختلفة يعبر خلال محززة حيود تحتوي 3.00×10^5 lines/m. الأطوال الموجيّة للخطوط الثلاث هي: 6.56×10^{-7} m (هيدروجين)، و 6.50×10^{-7} m (نيوتن)، و 6.97×10^{-7} m (أرغون). احسب زاوية الحيود ذات الرتبة الأولى لخطوط هذه المصادر.

65. ضوء طول موجته 590 nm يمرّ خلال شقين ضيقين البعد بينهما 0.60 mm. الشاشة على بعد 1.70 m. وهناك مصدر ضوئيّ آخر (مجهول طول الموجة) ينتج هُدبة من الرتبة الثانية 1.33 mm أقرب إلى الهدبة المركزية من تلك للضَّوء 590 nm. ما طول موجة الضَّوء المجهول؟

66. محطة مذياع تبث على 102.1 MHz من هوائيين متشابهين على الارتفاع نفسه، ولكن يفصلهما مسافة 8.0 m أفقية (d). (الشّكل 24 – 60). وجدت إشارة ذات شدة قصوى على خط الوسط وتمتد أفقيًّا في الاتجاهين. إذا اعتبرنا خط الوسط عند الزاوية 0°، فعند أيّ زاوية (أو زوايا) θ نكشف شدة قصوى؟ إشارة ذات شدّة دنيا؟ افرض أنّ الأفيسة كلّها أخذت عند مسافات أكثر بكثير من 8.0 m من أبراج الهوائيات.



الشّكل 24 – 60 (مسألة 66)

67. يقف معلّمٌ بعيدًا خلف باب عرضه 0.88 m، وينفخ في صفارة ترددها 750 Hz. مع إهمال الانعكاسات، احسب عند أيّ زاوية (أو زوايا) لا يمكن سماع الصفارة بوضوح على أرض الملعب خارج الباب.

68. إذا سقط ضوء على شقّ ضيق عرضه D بزاوية 30° مع العمودي، فصف نمط الحيود.

69. أجنحة نوع من الخنافس لها سلسلة من الخطوط عبرها. عندما يسقط ضوء 460 nm عموديًا لينعكس عن الجناح، يبدو الجناح مضيئًا عند النظر إليه بزاوية 51°. ما البعد بين هذه الخطوط؟

70. ما عدد الحزوز لكلّ سنتيمتر في محززة حيود إذا أريد أن لا تكون هناك رتبة طيف ثانية لأيّ طول موجة مرئيّ؟

71. بيّن أنّ الرتبتين الثانية والثالثة للضّوء الأبيض تتطابقان دائمًا في محززة الحيود. ما الأطوال الموجيّة التي تتطابق تمامًا؟

72. عند سقوط ضوء الصوديوم الأصفر $\lambda = 589\text{ nm}$ على محززة حيود، فإنّ الرتبة الأولى على شاشة تبعد 60.0 cm تقع على بعد 3.32 cm من الهدبة المركزية. مصدر آخر يعطي خطًّا على بعد 3.71 cm من المركز. ما طول موجة المصدر الجديد؟ كم عدد الخطوط لكلّ سنتيمتر في محززة الحيود؟

73. يسقط ضوء على محزّزة حيود تحتوي 8600 lines/cm، ويشاهد النمط على شاشة على بعد 2.5 m من المحززة. يتكون الضّوء الساقط من موجتين: $\lambda_1 = 4.6 \times 10^{-7}\text{ m}$ و $\lambda_2 = 6.8 \times 10^{-7}\text{ m}$. احسب المسافة الخطية بين خطّي هاتين الموجتين في الرتبة الأولى على الشاشة.

74. ما معامل الانكسار لمادة شفافة إذا لزم على الأقلّ سمك 150 nm، عندما توضع على الزجاج لتخفيض الانعكاس إلى الصفر تقريبًا عند سقوط ضوء 600 nm عموديًا عليه؟ هل هناك جواب آخر؟

75. ضوء وحيد اللون متغير، طول الموجة يسقط عموديًّا على غشاء رقيق من البلاستيك في الهواء. الضّوء المنعكس أقلّ ما يمكن فقط لطول الموجة $\lambda = 512\text{ nm}$، و $\lambda = 640\text{ nm}$ في الطّيف المرئيّ. ما سمك الغشاء $(n = 1.58)$؟ [مساعدة: افرض قيمًا متتابعة لـ m].

76. قارن أقلّ سمك مطلوب لطلاء غير عاكس $(n = 1.38)$ لعدسة زجاجية بحيث نحذف: (أ) الضّوء الأزرق (450 nm) أو (ب) الضّوء الأحمر (700 nm) عند السقوط العمودي.

77. ما أقلّ سمك (عدا الصفر) لطبقة الهواء بين سطحين زجاجيين مستويين بحيث يبدو الزجاج داكنا عن سقوط ضوء 640 nm عموديًا عليه؟ ماذا لو كان الزجاج يبدو مضيئًا؟

78. افرض أنّك شاهدت الضّوء **النافذ** من طبقة رقيقة على صفيحة زجاجية مستوية. ارسم مخطّطًا يشبه (الشّكل 24–30 أو 24 – 36). وصف الشروط اللازمة للحصول على لمعان أو تعتيم. اعتبر القيم الممكنة كلّها لمعامل الانكسار. قارن القيم النسبية للقيم الدنيا مع القيم العظمى والصفر.

79. عند أيّ زاوية فوق الأفق تكون الشّمس عندما يكون الضّوء المنعكس عن بحيرة مستقطبًا بصورة عظمى؟

80. عند أيّ زاوية يجب وضع مستقطبتين لتقليل شدة الضّوء غير المستقطب الساقط بمعامل إضافي (بعد أن يحذف المستقطب الأول نصف الشدة) قدره (أ) 4؟ (ب) 10؟ (جـ) 100؟

81. يسقط ضوء غير مستقطب على صفيحتين مستقطبتين، محورا نفاذهما متعامدان. وضعت مستقطبة ثالثة بينهما بحيث يصنع محورها زاوية 62° مع محور الأولى. (أ) ما نسبة شدة الضّوء النافذ إلى الشدة الأصلية؟ (ب) ماذا يحدث لو وضعت المستقطبة الثالثة قبلهما؟

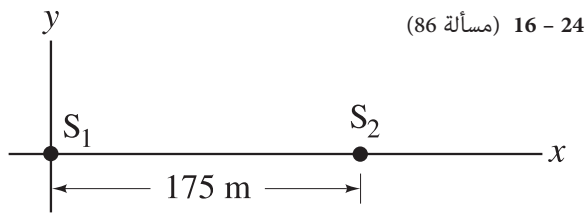
82. وضعت أربع مستقطبات على الترتيب بحيث تكون محاورها عمودية، عند 30° مع العمود، وعند 60° مع العمود، وعند 90° مع العمود. (أ) احسب النسبة من شدة الضّوء غير المستقطب والتي ستنفذ من المستقطبات الأربع. (ب) هل يمكن **تقليل** الضّوء النافذ بإزالة إحدى المستقطبات؟ إذا كان كذلك، فأيّها؟ (جـ) هل يمكن أن تكون شدة الضّوء النافذ معدومة بإزالة مستقطبات؟ إذا كان كذلك فأيّها؟

83. يمر شعاع ليزر عبر شق عرضه 1.0 cm ويوجه نحو القمر الذي يبعد نحو 380,000 km من الأرض. افرض أنّ الليزر يصدر موجات بطول 630 nm (الضّوء الأحمر ليزر He – Ne). احسب عرض الشّعاع عند وصوله القمر.

84. سلسلة من المستقطبات توضع بحيث يختلف محور كلّ منها 10° عن سابقته. أُسقط ضوء غير مستقطب على هذه السلسلة. كم مستقطبة تخترق الضّوء قبل أن تنخفض شدته إلى $\frac{1}{4}$ شدته الأصلية؟

85. غشاءٌ رقيقٌ من الصابون $(n = 1.34)$ يغطّي قطعةً من الزجاج $(n = 1.52)$. ما سمك الغشاء الذي يعكس الضّوء الأحمر 643 nm بقوّةٍ عندما يُضاء عموديًّا بضوء أبيض؟

86. افرض هوائيين يصدران موجات مذياع بتردد 6.0 MHz متفقين في الطور. المصدران موضوعان عند S_1 و S_2 تفصلهما مسافة $d = 175\text{ m}$، (الشّكل 24 – 61). ما أول ثلاث نقاط على محور y حيث تكون الإشارتان من المصدرين مختلفتين في الطور (قمة إحداهما تقابل أسفل الأخرى)؟



الشّكل 24 – 16 (مسألة 86)

87. حزمةٌ ضوئيّةٌ متوازيةٌ تحتوي موجتين: 420 nm و 650 nm، تدخل زجاج الفلنت (حجر القدّاحة) الصوّان أو لمنشور متساوي الأضلاع، (الشّكل 24 – 58). (أ) ما قيمة الزاوية بين الشّعاعين عند مغادرة المنشور؟ (ب) أعد الجزء (أ) لمحززة حيود تحتوي 6200 lines/cm.

***88.** عدسة ليوسيت مستوية محدّبة أحد سطحيها مستوٍ والآخر له $R = 18.4\text{ cm}$، تستعمل لرؤية جسم يبعد 66.0 cm والذي هو مزيج من الأحمر والأصفر. معامل انكسار ليوسيت 1.5106 للضّوء الأحمر و 1.5226 للضّوء الأصفر. ما موقع الصورتين الأحمر والأصفر كما تكونهما العدسة؟ [مساعدة: انظر البند 23 – 10].

إجابات التمارين

أ. 2.5 mm

ب. أضيق

ج. 4900 lines/cm

د. A

هـ. صفر لكلّ من (أ) و (ب)؛ لأنّ المستقطبين المتتابعين والزاوية بينهما 90° يلغيان الضّوء المستقطب كلّه بزاوية 45°، ويجب إدخاله بين المستقطبين الآخرين إذا أردنا للضّوء أن ينفذ.