سلطنة عمان
وزارة التربية والتعليم

رؤية عمان 2040
نتقدم بثقة
Moving Forward with Confidence

الفيزياء

الصف الثاني عشر

كتاب الطالب

الفصل الدراسي الثاني

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

الطبعة التجريبية
1445 هـ - 2023 م

سلطنة عمان
وزارة التربية والتعليم

الفيزياء

الصف الثاني عشر

كتاب الطالب

الفصل الدراسي الثاني

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

الطبعة التجريبية 1445 هـ - 2023 م

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

مطبعة جامعة كامبريدج، الرمز البريدي CB2 8BS، المملكة المتحدة.

تشكل مطبعة جامعة كامبريدج جزءًا من الجامعة.
وللمطبعة دور في تعزيز رسالة الجامعة من خلال نشر المعرفة، سعيًا وراء
تحقيق التعليم والتعلم وتوفير أدوات البحث على أعلى مستويات التميز العالمية.

© مطبعة جامعة كامبريدج ووزارة التربية والتعليم في سلطنة عُمان.

يخضع هذا الكتاب لقانون حقوق الطباعة والنشر، ويخضع للاستثناء التشريعي
المسموح به قانونًا ولأحكام التراخيص ذات الصلة.
لا يجوز نسخ أي جزء من هذا الكتاب من دون الحصول على الإذن المكتوب من
مطبعة جامعة كامبريدج ومن وزارة التربية والتعليم في سلطنة عُمان.

الطبعة التجريبية ٢٠٢٣ م، طُبعت في سلطنة عُمان

هذه نسخة تمَّت مواءمتها من كتاب الطالب – الفيزياء للصف الثاني عشر – من سلسلة كامبريدج للفيزياء
لمستوى الدبلوم العام والمستوى المتقدم AS & A Level للمؤلفين دايفيد سانغ، وغراهام جونز، وغوريندر تشادا،
وريتشارد وودسيد.

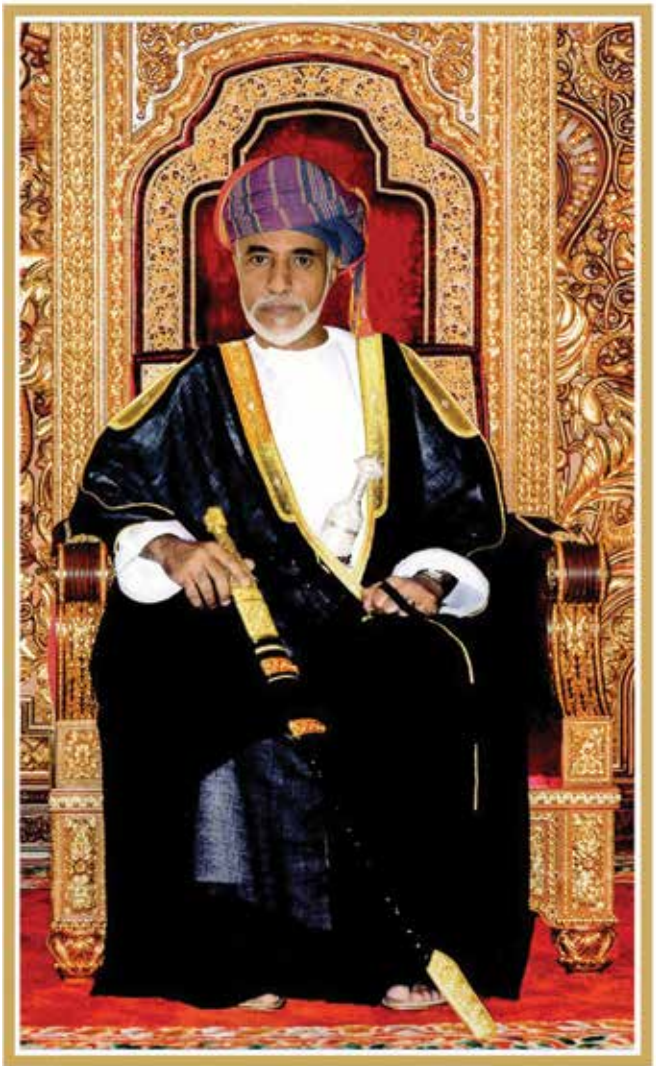
تمت مواءمة هذا الكتاب بناءً على العقد الموقع بين وزارة التربية والتعليم ومطبعة
جامعة كامبريدج.
لا تتحمل مطبعة جامعة كامبريدج المسؤولية تجاه المواقع الإلكترونية
المستخدمة في هذا الكتاب أو دقّتها، ولا تؤكد أن المحتوى الوارد على تلك المواقع دقيق
وملائم، أو أنه سيبقى كذلك.

تمت مواءمة الكتاب

بموجب القرار الوزاري رقم ٢٠٢٣/٣٦ واللجان المنبثقة عنه

جميع حقوق الطبع والتأليف والنشر محفوظة لوزارة التربية والتعليم

**ولا يجوز طبع الكتاب أو تصويره أو إعادة نسخه كاملًا أو مجزّأ أو ترجمته
أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات بهدف تجاري بأي شكل من الأشكال
إلّا بإذن كتابي مسبق من الوزارة، وفي حال الاقتباس القصير يجب ذكر المصدر.**



المغفور له

السلطان قابوس بن سعيد

-طيّب اللّه ثراه-

حضرة صاحب الجلالة

السلطان هيثم بن طارق المعظم

-حفظه اللّه ورعاه-

سلطنـــــة عُمـــــان

(المحافظات والولايات)

النَّشيدُ الْوَطَنِيُّ

يـا رَبَّنـا احْفَـظْ لنـا جَـلالَـةَ الـسُّـلْـطـان
وَالشَّعْـبَ فـي الأَوْطـان بِـالْـعِـزِّ والأَمـان
وَلْـيَـدُمْ مـؤَيَّـدًا عـاهِـلاً مُـمَـجَّـدًا
بِالنُّفـوسِ يُفْتَـدى

يا عُمانُ نَحْنُ مِنْ عَهْدِ النَّبي أَوْفِياءُ مِنْ كِرامِ الْعَرَبِ
فـارْتَقـي هـامَ السَّمـاء وَامْلَئي الْكَـوْنَ ضيـاء
وَاسْعَدي وَانْعَمي بِالرَّخـاء

تقديم

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على خير المرسلين، سيّدنا مُحمَّد، وعلى آله وصحبه أجمعين. وبعد:

فقد حرصت وزارة التربية والتعليم على تطوير المنظومة التعليمية في جوانبها ومجالاتها المختلفة كافة؛ لتُلبّي مُتطلّبات المجتمع الحالية، وتطلُّعاته المستقبلية، ولتتواكب مع المُستجدّات العالمية في اقتصاد المعرفة، والعلوم الحياتية المختلفة؛ بما يؤدّي إلى تمكين المخرجات التعليمية من المشاركة في مجالات التنمية الشاملة للسلطنة.

وقد حظيت المناهج الدراسية، باعتبارها مكوِّنًا أساسيًا من مكوِّنات المنظومة التعليمية، بمراجعة مستمرة وتطوير شامل في نواحيها المختلفة؛ بدءًا من المقرّرات الدراسية، وطرائق التدريس، وأساليب التقويم وغيرها؛ وذلك لتتناسب مع الرؤية المستقبلية للتعليم في السلطنة، ولتتوافق مع فلسفته وأهدافه.

وقد أولت الوزارة مجال تدريس العلوم والرياضيات اهتمامًا كبيرًا يتلاءم مع مستجدات التطور العلمي والتكنولوجي والمعرفي. ومن هذا المنطلق اتَّجهت إلى الاستفادة من الخبرات الدولية؛ اتساقًا مع التطوُّر المتسارع في هذا المجال، من خلال تبنّي مشروع السلاسل العالمية في تدريس هاتَين المادّتَين وفق المعايير الدولية؛ من أجل تنمية مهارات البحث والتقصّي والاستنتاج لدى الطلبة، وتعميق فهمهم للظواهر العلمية المختلفة، وتطوير قدراتهم التنافُسية في المسابقات العلمية والمعرفية، وتحقيق نتائج أفضل في الدراسات الدولية.

إن هذا الكتاب، بما يحويه من معارف ومهارات وقيَم واتجاهات، جاء مُحقِّقًا لأهداف التعليم في السلطنة، وموائمًا للبيئة العمانية، والخصوصية الثقافية للبلد، بما يتضمَّنه من أنشطة وصور ورسوم. وهو أحد مصادر المعرفة الداعمة لتعلُّم الطالب، بالإضافة إلى غيره من المصادر المختلفة.

نتمنّى لأبنائنا الطلبة النجاح، ولزملائنا المعلّمين التوفيق فيما يبذلونه من جهود مُخلِصة، لتحقيق أهداف الرسالة التربوية السامية؛ خدمة لهذا الوطن العزيز، تحت ظل القيادة الحكيمة لمولانا حضرة صاحب الجلالة السلطان هيثم بن طارق المعظّم، حفظه الله ورعاه.

والله ولي التوفيق

د. مديحة بنت أحمد الشيبانية

وزيرة التربية والتعليم

المحتويات

المقدمة xiii
كيف تستخدم هذه السلسلة xiv
كيف تستخدم هذا الكتاب xvi
الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء xviii

الوحدة السادسة: الموجات

٦-١ وصف الموجات ٢١
٦-٢ طاقة الموجة ٢٧
٦-٣ سرعة الموجة ٢٨
٦-٤ تأثير دوبلر للموجات الصوتية ٣٠

الوحدة السابعة: تراكب الموجات

٧-١ مبدأ تراكب الموجات ٣٩
٧-٢ حيود الموجات ٤٠
٧-٣ التداخل ٤٣
٧-٤ تجربة الشق المزدوج ليونج ٤٩
٧-٥ محزوز الحيود ٥٤
٧-٦ الموجات المستقرة ٥٨
٧-٧ المزيد عن الموجات المستقرة ٥٩

الوحدة الثامنة: فيزياء الكم

٨-١ النموذج الجسيمي والنموذج الموجي ٧٧
٨-٢ التأثير الكهروضوئي ٨٥
٨-٣ للفوتونات كمية تحرّك أيضًا ٩٠
٨-٤ الأطياف الخطية ٩٢
٨-٥ ثنائية (ازدواجية) الموجة والجسيم ٩٧

الوحدة التاسعة: الفيزياء النووية

٩-١ المعادلات النووية ١١٢
٩-٢ الكتلة والطاقة ١١٣
٩-٣ الطاقة المنبعثة في الانحلال الإشعاعي ١١٨
٩-٤ طاقة الربط النووي واستقرار النواة ١١٩
٩-٥ العشوائية والانحلال الإشعاعي ١٢٣
٩-٦ نمذجة الانحلال الإشعاعي رياضيًا ١٢٤
٩-٧ التمثيلات البيانية للانحلال ومعادلاته ١٢٧
٩-٨ ثابت الانحلال (λ) وعمر النصف ($t_{\frac{1}{2}}$) ١٣٠

قائمة المصطلحات ١٣٧

ملحق: الجدول الدوري للعناصر ١٤٠

المقدمة

يغطي هذا الكتاب منهج الفيزياء للفصل الدراسي الثاني للصف الثاني عشر بما يلبّي السياسة التعليمية وغاياتها في سلطنة عُمان.

يطرح هذا الكتاب المفاهيم الفيزيائية المختلفة ويشرحها ويعمق فهمك حولها، كما يزوّدك بالأمثلة والأسئلة التي ستساعدك على اختبار فهمك، وعلى تطوير المهارات الأساسية اللازمة للنجاح في هذه المادة. كما توضح صفحات «كيف تستخدم هذا الكتاب» مكوّنات وميزات هذا الكتاب.

خلال دراستك لمادة الفيزياء ستجد أن بعض المفاهيم الأساسية قد تتكرر؛ وذلك لأن موضوعات الفيزياء مترابطة في المجالات المختلفة، وسوف تمضي قدمًا في دراستها بتعمق أكثر في الصفّ الثاني عشر، بذلك ستكتسب المزيد من الثقة في فهم مادة الفيزياء إذا تعمّقت في هذه الموضوعات. ويشمل هذا الكتاب المفاهيم الأساسية الآتية:

- نماذج الأنظمة الفيزيائية كالنموذج الرياضي لتأثير دوبلر.
- اختبار التنبؤات مقابل الأدلة.
- الرياضيات كلغة وأداة لحل المسائل الفيزيائية.
- المادة والطاقة.
- القوى والمجالات.

تُعدّ دراسة الفيزياء تجربة مثيرة وممتعة وجديرة بالاهتمام؛ فالفيزياء مادة أساسية للعديد من المجالات والتخصصات العلمية المختلفة كالطب والهندسة وغيرهما، ومتكاملة مع مواد العلوم المختلفة كالجيولوجيا والكيمياء والأحياء. وتُعدّ تدريبًا مفيدًا لاكتشاف كيف أسهَم مختلف العلماء في تطوير معرفتنا ورفاهيتنا، وذلك من خلال أبحاثهم التي أجروها في مفاهيم الفيزياء وتطبيقها. نأمل ألّا يساعدك هذا الكتاب على النجاح في دراساتك ومهنتك المستقبلية فحسب، بل أن يحفّز فضولك وخيالك العلمي أيضًا؛ فقد يصبح طلبة اليوم من العلماء والمهندسين المبدعين غدًا، كما نأمل أن تكون التجارب التي أجراها الفيزيائيون في الماضي درجة من درجات سلّم التطوّر، فنمضي بالفيزياء قُدمًا نحو مستويات أعلى وأرقى.

كيف تستخدم هذه السلسلة

تقدّم هذه المكوّنات (أو المصادر) الدعم للطلبة في الصف الثاني عشر في سلطنة عمان لتعلم مادة الفيزياء واستيعابها، حيث تعمل كتب هذه السلسلة جميعها معًا لمساعدة الطلبة على تطوير المعرفة والمهارات العلمية اللازمة لهذه المادة. كما تقدّم الدعم للمعلمين لإيصال هذه المعارف للطلبة وتمكينهم من مهارات الاستقصاء العلمي.

يقدّم «كتاب الطالب» دعمًا شاملًا لمنهج الفيزياء للصف الثاني عشر في سلطنة عمان، ويقدّم شرحًا للحقائق والمفاهيم والتقنيات العلمية بوضوح، كما يستخدم أمثلة من العالم الواقعي للمبادئ العلمية. والأسئلة التي تتضمنها كل وحدة تساعد على تطوير فهم الطلبة للمحتوى، في حين أن الأسئلة الموجودة في نهاية كل وحدة تحقق لهم مزيدًا من التطبيقات العلمية الأساسية.

يحتوي «كتاب التجارب العملية والأنشطة» على أنشطة وأسئلة نهاية الوحدة، والتي تمّ اختيارها بعناية، بهدف مساعدة الطلبة على تطوير المهارات المختلفة التي يحتاجون إليها أثناء تقدمهم في دراسة كتاب الفيزياء. كما تساعد هذه الأسئلة الطلبة على تطوير فهمهم لمعنى الأفعال الإجرائية المستخدمة في الأسئلة، إضافة إلى دعمهم في الإجابة عن الأسئلة بشكل مناسب.

كما يحقّق هذا الكتاب للطلبة الدعم الكامل الذي يساعدهم على تطوير مهارات الاستقصاء العملية الأساسية. وكذلك مهارات تخطيط الاستقصاءات، واختيار الجهاز المناسب وكيفية التعامل معه، وطرح الفرضيات، وتدوين النتائج وعرضها، وتحليل البيانات وتقييمها.

يدعم دليل المعلم «كتاب الطالب» و «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، ويعزز الأسئلة والمهارات العملية الموجودة فيهما. ويتضمّن هذا الدليل أفكارًا تفصيلية للتدريس وإجابات عن كل سؤال ونشاط وارد في «كتاب الطالب» وفي «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، فضلًا عن الإرشادات التعليمية لكل موضوع، بما في ذلك خطة التدريس المقترحة، وأفكار للتعلم النشط والتقويم التكويني، والمصادر المرتبطة بالموضوع، والأنشطة التمهيدية، والتعليم المتمايز (تفريد التعليم) والمفاهيم الخاطئة وسوء الفهم. كما يتضمن أيضًا دعمًا مفصلًا لإجراء الاستقصاءات العملية وتنفيذها في «كتاب التجارب العملية والأنشطة»، بما في ذلك فقرات «مهم» لجعل الأمور تسير بشكل جيد، إضافة إلى مجموعة من عينات النتائج التي يمكن استخدامها إذا لم يتمكن الطلبة من إجراء التجربة، أو أخفقوا في جمع النتائج النموذجية.

كيف تستخدم هذا الكتاب

خلال دراستك هذا الكتاب، ستلاحظ الكثير من الميزات المختلفة التي ستساعدك في التعلم. هذه الميزات موضحة على النحو الآتي:

أهداف التعلّم

تُمثّل هذه الأهداف مضمون كل وحدة دراسية، وتساعد على إرشاد الطلبة خلال دراسة «كتاب الطالب»، كما تشير إلى المفاهيم المهمة المطروحة في كل موضوع، ويتم التركيز عليها عند تقويم الطالب.

قبل أن تبدأ بدراسة الوَحدة

تحتوي هذه الميزة على أسئلة وأنشطة تتمحور حول المعرفة القبلية للموضوعات التي ستحتاج إليها قبل البدء بدراسة الوحدة.

العلوم ضمن سياقها

تُقدّم هذه الميزة أمثلة وتطبيقات واقعية للمحتوى الموجود في كل وحدة دراسية، ما يعني أنها تشجع الطلبة على إجراء المزيد من البحث في الموضوعات المختلفة.

مهارة عملية

لا يحتوي هذا الجزء من الكتاب على تعليمات مفصلة لإجراء تجارب معيّنة، لكنك ستجد، في مربّعات النص هذه، توجيهات أساسية حول النشاط العملي الذي تحتاج إلى تطبيقه.

مصطلحات علمية

يتم تمييز المصطلحات الأساسية في النص عند تقديمها لأول مرة. ثم يتم تقديم تعريفات لها في الهامش تشرح معاني هذه المصطلحات.

سوف تجد أيضًا تعريفات لهذه المصطلحات في قائمة المصطلحات الواردة في نهاية هذا الكتاب.

أفعال إجرائية

لقد تمّ إبراز الأفعال الإجرائية الواردة في المنهج الدراسي بلون غامق في أسئلة نهاية الوحدة، ويمكن استخدامها في الاختبارات، خصوصًا عندما يتم تقديمها للمرة الأولى. وستجد في الهامش تعريفًا لها.

سوف تجد أيضًا التعريفات نفسها في قائمة المصطلحات الواردة في نهاية هذا الكتاب.

ترد التعريفات للمفاهيم العلمية والمبادئ والقوانين والنظريات العلمية المهمة في الهامش، ويتم إبرازها في النص بلون غامق عند تقديمه لأول مرة. وستجد هذه التعريفات أيضًا في قائمة المصطلحات الموجودة في نهاية هذا الكتاب.

المعادلة: يتم تمييز المعادلات الأساسية في النص عند تقديم المعادلة لأول مرة. تعريف للمعادلة ومزيد من المعلومات ترد في الهامش.

مهمّ

يتم في مربّعات النص هذه إدراج حقائق وإرشادات مهمّة للطلبة.

أمثلة

تحتوي على أمثلة محلولة توضّح كيفية استخدام صيغة رياضية معيّنة لإجراء عملية حسابية.

أسئلة

يتخلّل النص أسئلة تمنحك فرصة للتحقق من أنك قد فهمت الموضوع الذي قرأت عنه.

ملخّص

تحتوي مربّعات النص هذه على ملخّص للنقاط الرئيسية في نهاية كل وحدة.

أسئلة نهاية الوحدة

تقيس هذه الأسئلة مدى تحقّق الأهداف التعليمية في الوحدة، وقد يتطلب بعضها استخدام معارف علمية من وحدات سابقة. تتوافر إجابات هذه الأسئلة في دليل المعلم.

قائمة تقييم ذاتي

تلي الملخّص عبارات تتضمّن عناوين منها: «أستطيع أن» التي تتطابق مع أهداف التعلم الموجودة في بداية الوحدة؛ و «أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد»، أو «متمكّن إلى حدٍّ ما» اللتَين تشيران إلى وجوب مراجعة ما تراه ضروريًا في هذا المجال. وقد تجد أنه من المفيد تقييم مدى ثقتك بكل من هذه العبارات أثناء عملية المراجعة.

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا

الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء

- العمل بأمان في مختبر الفيزياء جانب أساسي من جوانب التعلّم الذي يتميّز به العمل التجريبي.
- كن دائمًا مستمعًا جيدًا للتعليمات، وملتزمًا التوجيهات وقواعد السلوك بعناية.
- إذا لم تكن متأكّدًا من أي جانب من جوانب عملك التجريبي فلا تتوانَ في سؤال معلّمك، وإذا كنت تودّ تصميم استقصاءٍ خاصّ بك، فاطلب إلى معلّمك أن يتحقّق من خطّتك قبل تنفيذها.
- العديد من احتياطات الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء تُعنى بمنع حدوث ضرر يلحق بالطالب أو بالأجهزة والأدوات.

استخدام السوائل في العمل	ضع كل الأدوات في حوض بحيث إذا انسكب شيء منها لا يؤثّر على أوراق العمل. فإذا كنت تستخدم الماء الساخن أو المغلي؛ فاستخدم ماسكًا لحمل الأوعية مثل الكؤوس.
استخدام ميزان الحرارة الزجاجيّ المُعبّأ بسائل	ضع ميزان الحرارة بشكل آمن على الطاولة فور الانتهاء من استخدامه، وتأكّد من موقعه بحيث لا يتدحرج، وإذا تعرّض للكسر؛ فأبلغ معلّمك فورًا، ولا تلمس الزجاج المكسور أو السائل المتسرّب منه.
تعليق موادّ على أسلاك رفيعة	ارتدِ نظّارات واقية تحسّبًا لحدوث انقطاع في السلك، واحذر من سقوط أثقال في حالِ انقطاع السلك؛ وضَع وسادة أو ما شابه على الأرض.
توصيل مكوّنات كهربائية	لا تتجاوز فرق الجهد الكهربائي الموصى به للمكوِّن الكهربائي، على سبيل المثال: فرق الجهد الكهربائي لمصباح ما هو (6 V).
استخدام الحوامل المعرّضة للانقلاب	إذا كان الحامل متحرّكًا أو معرّضًا لخطر الانقلاب، فثبّته على الطاولة بإحكام.
استخدام الأجسام القابلة للتدحرُج كالأسطوانات	ضع شيئًا مناسبًا مثل صندوق لجمع الأجسام القابلة للتدحرُج، بحيث لا تسقط على الأرضية أو تؤثّر على تجربة شخص آخر.
الخلايا الجافة 1.5 V	لا توصل قطبَي الخلية أو البطارية أحدهما بالآخر بسلك كهربائي.

الجدول ١ احتياطات الأمان والسلامة في مختبر الفيزياء

الوحدة السادسة

الموجات Waves

أهداف التعلّم

٦-١ يصف الموجات المستعرضة والموجات الطولية ويقارن بينها، مستخدمًا السعة والإزاحة وفرق الطور والزمن الدوري والسرعة والتردد وطول الموجة.

٦-٢ يجد التردد والسعة باستخدام معايرة مقياس الزمن ومعايرة مقياس فرق الجهد الكهربائي لجهاز رسم إشارة الأشعة المهبطية (الأوسيلوسكوب (CRO)).

٦-٣ يحلّل التمثيل البياني لموجات مستعرضة وطولية ويفسره.

٦-٤ يستخدم المعادلة:

$$\text{شدة الموجة} = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}}.$$

٦-٥ يستخدم العلاقة $I \propto A^2$ (حيث I هي شدة الموجة و A هي سعة الموجة المسافرة).

٦-٦ يستنتج معادلة سرعة الموجة $v = f\lambda$ ويستخدمها.

٦-٧ يشرح سبب اختلاف التردد الملاحظ عن تردد المصدر عندما يكون مصدر الموجات الصوتية متحرّكًا بالنسبة إلى مراقب ثابت (فهم تأثير دوبلر لمصدر ثابت مع مراقب متحرك، ومصدر متحرك مع مراقب متحرك غير مطلوب).

٦-٨ يستخدم المعادلة: $f_o = \frac{f_s v}{(v \pm v_s)}$ للتردد الملاحظ عندما يتحرك مصدر الموجات الصوتية بالنسبة إلى مراقب ثابت.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- اكتب تعريفًا لكل من الإزاحة والسرعة والقدرة.

العلوم ضمن سياقها

الاهتزازات تصنع الموجات

تهب الرياح على سطح البحر فتنتج أمواجًا؛ حيث يبدأ سطح الماء بالاهتزاز صعودًا وهبوطًا، وتنتشر هذه الاهتزازات مبتعدة بعضها عن بعض، وقد تنتقل الأمواج الكبيرة آلاف الكيلومترات عبر المحيط قبل أن تتكسّر على الشواطئ (الصورة ٦-١).

كيف يمكنك أن تعرف من النظر إلى الصورة ٦-١ أن الموجة تنقل الطاقة؟

الصورة ٦-١ تُظهر هذه الصورة تكسّر موجة على أحد شواطئ محافظة ظفار وتبدّد الطاقة التي استمدتها الموجة من الرياح في رحلتها عبر المحيط.

٦-١ وصف الموجات

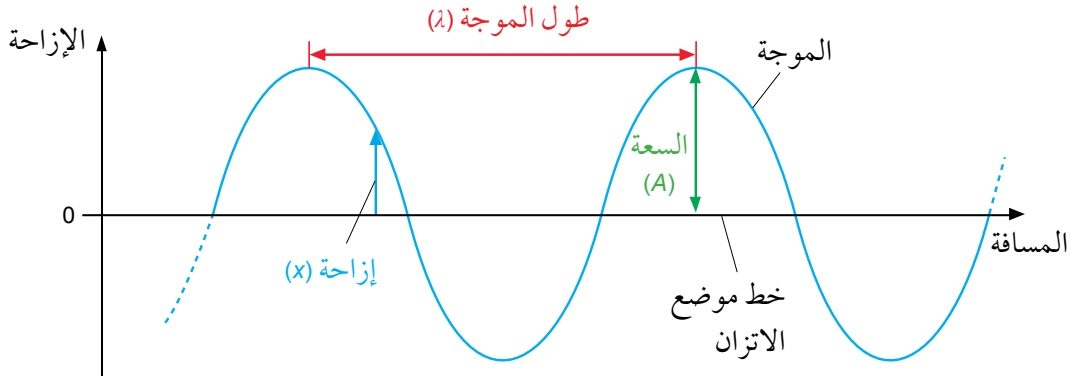
مصطلحات علمية

الموجة المسافرة Progressive wave: موجة تحمل طاقة من مكان إلى آخر.

عندما تنقر على وتر الجيتار فإنه يهتز، وتُنشئ هذه الاهتزازات موجة تنتقل في الهواء نسمّيها صوتًا. في الواقع جميع الاهتزازات تنتج موجات بأنواع مختلفة (الصورة ٦-٢)، وتسمى الموجات التي تتحرك خلال مادة أو فراغ **الموجات المسافرة (المتقدمة) Progressive waves**، إذ تنقل الموجة المسافرة الطاقة من مكان إلى آخر.

الصورة ٦-٢ تكشف التلسكوبات الراديوية الموجات الراديوية القادمة من النجوم والمجرات البعيدة. قوس المطر هو تأثير ناتج عن انعكاس موجات الضوء وانكسارها بواسطة قطرات الماء في الغلاف الجوي.

في الحياة اليومية نستخدم كلمة الموجة لوصف ما نراه على سطح البحر عند الشاطئ، أما في الفيزياء فنتوسع بفكرة الموجة لوصف العديد من الظواهر الأخرى، بما في ذلك الضوء والصوت وغيرهما؛ تخيّل موجة مثالية (لا يمكن أن ترى مثلها بالضبط في الواقع) كالموضّحة في الشكل ٦-١.



الشكل ٦-١ تمثيل بياني (الإزاحة – المسافة) يوضّح المصطلحات: الإزاحة والسعة وطول الموجة.

التمثيل البياني للإزاحة مقابل المسافة (الشكل ٦-١) أو التمثيل البياني المشابه له للإزاحة مقابل الزمن، يوضّح المصطلحات المهمة التالية حول الموجات وحركتها.

- تسمى المسافة التي تبعدها نقطة على الموجة من موضع الاتزان **الإزاحة** **Displacement (x)**.
- تسمى أقصى إزاحة لأي نقطة على الموجة عن موضع الاتزان **السعة** **Amplitude (*A*)**.

وتقاس سعة الموجة في البحر بوحدات المسافة، مثل الأمتار. وكلما ازدادت سعة الموجة ارتفع الصوت أو صارت أمواج البحر أعنف.

- تسمى المسافة بين نقطتَين متجاورتَين على موجة مهتزة لكل منهما الإزاحة والاتجاه نفسهما **طول الموجة** **Wavelength (λ)** (λ الحرف اليوناني لامدا)، وهذه هي المسافة نفسها بين قمتَين متجاورتَين أو قاعَين متجاورَين، ويقاس الطول الموجي بوحدات المسافة مثل الأمتار.
- يسمى الزمن المستغرق لنقطة ما في موجة لإكمال اهتزازة كاملة **الزمن الدوري** **Period (*T*)**؛ فهو الزمن المستغرق لنقطة في الموجة للانتقال من موضع معيّن والعودة إلى الموضع نفسه، بحيث تتحرك في الاتجاه نفسه، ويقاس الزمن الدوري بوحدات الزمن مثل الثواني.
- يسمى عدد الاهتزازات لكل ثانية لنقطة ما في الموجة **التردّد** **Frequency (*f*)**، فعلى سبيل المثال كلما ازداد تردد موجات صوت نغمة موسيقية كانت حدة الصوت أعلى. ويُقاس التردد بوحدة الهرتز (Hz)، حيث:

1 Hz = اهتزازة واحدة في الثانية و $1\ kHz = 10^3\ Hz$ و $1\ MHz = 10^6\ Hz$

التردد (f) لموجة ما هو مقلوب الزمن الدوري (T):

$$f = \frac{1}{T}$$

مصطلحات علمية

الإزاحة **Displacement**: المسافة التي تبعدها نقطة ما في موجة من موضع الاتزان.

السعة **Amplitude**: أقصى إزاحة للموجة من موضع الاتزان.

طول الموجة **Wavelength**: المسافة بين نقطتَين متجاورتَين في موجة مهتزة لكل منهما الإزاحة والاتجاه نفسهما (الطور نفسه).

الزمن الدوري **Period**: الزمن المستغرق لنقطة ما في موجة لإكمال اهتزازة كاملة.

التردد **Frequency**: عدد الاهتزازات لنقطة ما في موجة لكل ثانية.

تصنّف الموجات إلى موجات كهرومغناطيسية وهي التي لا تحتاج إلى وسط تنتقل عبره، وموجات ميكانيكية وهي التي تحتاج إلى مادة (وسط) لتنتقل فيه. الصوت هو أحد الأمثلة على الموجات الميكانيكية، وثمّة أمثلة أخرى على هذا النوع من الموجات كالموجات على الأوتار المشدودة والموجات الزلزالية وموجات الماء (الصورة ٦-٣).

الصورة ٦-٣ تأثير قطرة على سطح سائل يُنشئ اهتزازًا، والاهتزاز يؤدي إلى ظهور موجات على سطح السائل.

مهارة عملية ٦-١

قياس التردد

يمكنك قياس تردد الموجات الصوتية باستخدام جهاز رسم إشارة الأشعة المهبطية (الكاثودية) (CRO) أو ما يسمى الأوسيلوسكوب، وتبيّن الصورة ٦-٤ كيف يحدث ذلك.

يوصل ميكروفون بمدخل الأوسيلوسكوب، وعند إصدار صوت يحوّل الميكروفون الموجات الصوتية إلى فرق جهد كهربائي متغيّر له تردد يساوي تردد الموجات الصوتية، ويُعرض فرق الجهد الكهربائي هذا على شاشة الأوسيلوسكوب.

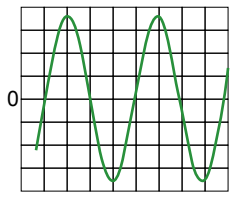
يعمل الأوسيلوسكوب كفولتميتر له القدرة على عرض فرق جهد كهربائي سريع التغيّر، ويتمثل ذلك بتحرك بقعة مضيئة عبر شاشة الأوسيلوسكوب بسرعة ثابتة محدّدة بواسطة المقياس الزمني للأوسيلوسكوب. وفي الوقت نفسه تتحرك البقعة المضيئة إلى الأعلى وإلى الأسفل وفقًا لفرق الجهد الكهربائي عند مدخل الأوسيلوسكوب.

وبالتالي فإن ما يظهر على شاشة الجهاز هو تمثيل بياني لتغيّر فرق الجهد الكهربائي على المحور الصادي (y) (الرأسي) مع الزمن على المحور السيني (x) (الأفقي)، فإذا عرفنا مقياس التدريج الأفقي يمكننا تحديد الزمن الدوري ومن ثم تردد الموجة الصوتية، ويبيّن المثال ١ كيفية تنفيذ ذلك. (سندرس في الوحدة السابعة إحدى طرائق قياس طول الموجة لموجات الصوت).

الصورة ٦-٤ تحديد تردد الموجات الصوتية لشوكة رنانة مهتزة باستخدام الأوسيلوسكوب.

مثال

١. يبيّن الشكل ٦-٢ شكل موجة الإشارة على شاشة الأوسيلوسكوب عندما تُلتقط موجات صوتية بواسطة ميكروفون. ضُبطت معايرة المقياس الزمني على ($1\ ms\ div^{-1}$)، وضُبطت معايرة مقياس فرق الجهد الكهربائي على ($20\ mV\ div^{-1}$). جِد تردد الموجات الصوتية، وسعة الإشارة بالفولت (V).
(تلميح: (div^{-1}) تعني لكل قسم او لكل مربع واحد).



الشكل ٦-٢ شكل موجة الإشارة على شاشة الأوسيلوسكوب.

أولًا: لإيجاد تردد الموجات الصوتية:

الخطوة ١: حدّد الزمن الدوري (T) للإشارة على الشاشة، يمكنك أن ترى في تدريج مقياس الزمن من الشكل ٦-٢ أن الزمن الدوري يكافئ 4.0 أقسام (div).

$T = 4.0\ div$

الخطوة ٢: حدّد الزمن الدوري بوحدة الثانية (s) باستخدام المقياس الزمني.

الزمن الدوري (T) = 4.0 div × معايرة مقياس الزمن

$T = 4.0\ div \times 1\ ms\ div^{-1}$

$= 4.0\ ms$

تلميح: لاحظ أن div^{-1} و div تلغي إحداهما الأخرى.

$1\ ms = 10^{-3}\ s$

لذلك فإن الزمن الدوري:

$T = 4.0 \times 10^{-3}\ s$

الخطوة ٣: احسب التردد (f) من الزمن الدوري (T):

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4.0 \times 10^{-3}} = 250\ Hz$$

لذلك تردد الصوت يساوي (250 Hz).

تابع

ثانيًا: لإيجاد سعة الإشارة:

الخطوة ١: حدّد سعة الإشارة على الشاشة. يمكنك أن ترى من تدريج مقياس فرق الجهد الكهربائي في الشكل ٦-٢ أن السعة تكافئ 3.5 قسمًا (div). تذكّر أن السعة تقاس من موضع (0 V).

سعة الإشارة A = 3.5 div

الخطوة ٢: جِد السعة بالفولت (V) باستخدام معايرة مقياس فرق الجهد الكهربائي.

السعة = 3.5 div × معايرة مقياس فرق الجهد

$A = 3.5 \text{ div} \times 20 \text{ mV div}^{-1}$

$= 70 \text{ mV}$

تلميح: لاحظ أن div^{-1} و div تلغي إحداهما الأخرى.

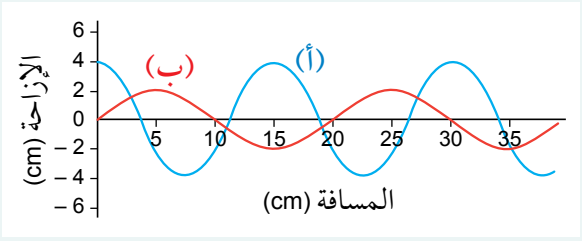
$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$

لذلك فإن السعة:

$A = 70 \times 10^{-3} \text{ V} = 0.07 \text{ V}$

أسئلة

(١) حدّد طول الموجة والسعة لكل من الموجتَين المبيّنتَين في الشكل ٦-٣.



الشكل ٦-٣ موجتان للسؤال ١.

(٢) ميكروفون موصل بأوسيلوسكوب (CRO)، يلتقط موجات صوتية فتشغل دورتان كاملتان خمسة أقسام على طول المحور السيني (x) لشاشة الأوسيلوسكوب. ضُبطت معايرة مقياس الزمن على $(0.005 \text{ s div}^{-1})$، احسب تردد الموجات الصوتية.

الموجات الطولية والموجات المستعرضة

هناك نوعان مختلفان من الموجات: **الموجات الطولية والموجات المستعرضة**. يمكن تمثيلهما باستخدام زنبرك موضوع على طول منضدة طويلة.

تتكوّن **الموجات الطولية** Longitudinal waves عند دفع طرف الزنبرك إلى الأمام وإلى الخلف، لتصبح حلقات الزنبرك مضغوطة ثم متمدّدة (مشدودة) على طول الزنبرك، فتتحرك بالتالي نبضات الموجة على طول الزنبرك.

وتتكوّن **الموجات المستعرضة** Transverse waves عند هزّ طرف الزنبرك من جانب إلى آخر، فتتحرك حلقات الزنبرك عموديًا عند انتقال الموجة على طوله.

إذًا الاختلاف بين الموجات الطولية والموجات المستعرضة يكون على النحو الآتي:

- تهتز جسيمات الوسط في الموجات الطولية **موازية** لاتجاه السرعة المتجهة للموجة.
- تهتز جسيمات الوسط في الموجات المستعرضة **بزاوية قائمة** (عمودية) مع اتجاه السرعة المتجهة للموجة.

الموجات الصوتية هي مثال على الموجة الطولية؛ بينما الضوء وجميع الموجات الكهرومغناطيسية الأخرى هي موجات مستعرضة، أما أمواج الماء فمعقدة جدًا، فقد تتحرك جسيمات الماء إلى الأعلى وإلى الأسفل ومن جانب إلى

مصطلحات علمية

الموجة الطولية

Longitudinal wave: الموجة التي تهتز فيها جسيمات الوسط باتجاه موازٍ للاتجاه الذي تنتقل فيه الموجة.

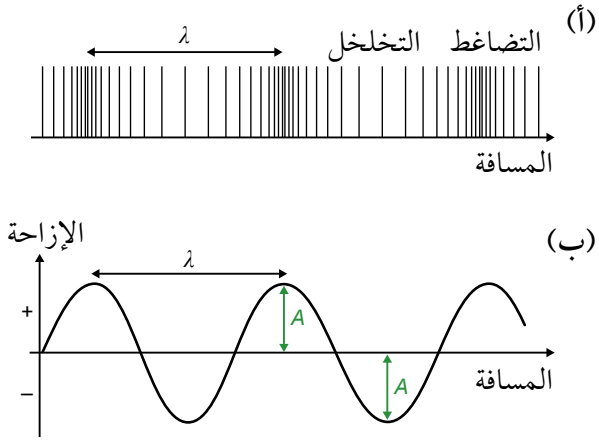
الموجة المستعرضة

Transverse wave: الموجة التي تهتز فيها جسيمات الوسط عموديًا على الاتجاه الذي تنتقل فيه الموجة.

آخر عند انتقال موجة مائية على سطح الماء، ويمكنك استقصاء موجات الماء في حوض الموجات، وهناك المزيد حول هذه الموجات في الجدول ٦-٢ وفي الوحدة السابعة.

تمثيل الموجات

يبيّن الشكل ٦-٤ كيف يمكننا تمثيل الموجات الطولية والمستعرضة، وتبيّن الموجة الطولية كيف أن المادة التي تنتقل عبرها الموجة تنضغط وتتخلخل بالتناوب، فيؤدي ذلك إلى ظهور ضغط مرتفع وضغط منخفض على التوالي.



الشكل ٦-٤ (أ) الموجات الطولية و (ب) الموجات المستعرضة.

ومع ذلك قد يكون من الصعب رسم هذه المناطق، لذلك غالبًا ما سترى الموجة الطولية ممثّلة كما لو كانت موجة جيبية؛ والإزاحة المشار إليها في التمثيل البياني هي إزاحة الجسيمات في الموجة.

يمكننا مقارنة **التضاغطات** **Compressions** (مناطق في الموجة الصوتية يكون عندها ضغط الهواء أكبر من قيمته المتوسطة) **والتخلخُلات** **Rarefactions** (مناطق في الموجة الصوتية يكون عندها ضغط الهواء أصغر من قيمته المتوسطة) للموجة الطولية مع القمم والقيعان للموجة المستعرضة.

الطور وفرق الطور

الطور هو الحالة الاهتزازية لنقطة ما على الموجة، فنقول أن نقطتين لهما الطور نفسه إذا كانتا تتحركان بالكيفية نفسها، فجميع النقاط على طول الموجة لها نمط الاهتزاز نفسه، ومع ذلك فإن النقاط المختلفة لا تهتز بالضرورة في الاتجاه نفسه وفي اللحظة نفسها، وكإحدى النقاط المهتزة على موجة ما فإن النقطة المجاورة لها تهتز متقدمة أو متأخرة عنها قليلًا، وعندها نقول أن هناك **فرق طور** **Phase difference** بينهما، وهذا الفرق هو الذي يؤدي إلى أن الاهتزازة تتقدم عن الأخرى أو تتأخر خلفها، ويقاس فرق الطور بالدرجات أو بالراديان.

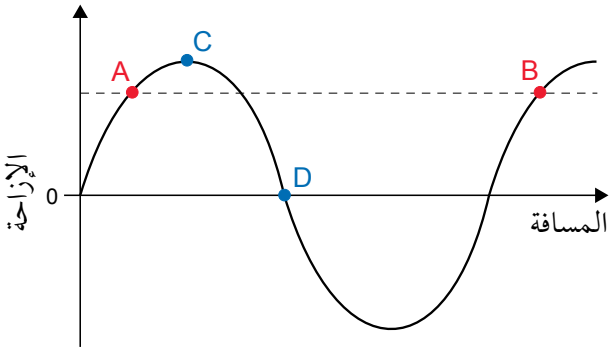
مصطلحات علمية

فرق الطور Phase difference: قياس لمقدار التأخر أو التقدم بين جسيمين في موجة ما، ويقاس بالدرجات أو الراديان.

الجسيمان المهتزان بالإزاحة نفسها والاتجاه نفسه (في الطور نفسه) لهما فرق طور 0° أو 360° ومضاعفاتها (أو 0 rad أو 2π rad ومضاعفاتها).

الجسيمان المهتزان في الطور المعاكس لهما فرق طور 180° (أو π rad).

وكما ترى من الشكل ٦-٥، فإن هناك نقطتَين مهتزتين A و B، يفصل بينهما طول موجي كامل واحد (λ)، وتهتزّان بالكيفية نفسها أو بالطريقة نفسها، لهما الطور نفسه، وفرق الطور بين هذَين الجسيمَين المهتزَّين عند A و B يساوي 360° (يمكنك أن تقول أيضًا إنه 0°)، كما أن فرق الطور بين أي نقطتَين أخريَين بين A و B يمكن أن يكون له أي قيمة بين 0° و 360°؛ فالدورة الكاملة لموجة ما تعادل 360°، وبما أنه يفصل بين النقطتَين C و D ربع طول موجي، فإن فرق الطور بين هاتَين النقطتَين هو (90°).



النقطتان A و B تهتزان بفرق طور 360° أو 0° فهما «متفقتان في الطور»
أو بالطور نفسه. النقطتان C و D بينهما فرق طور 90°

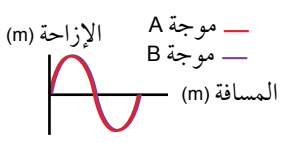
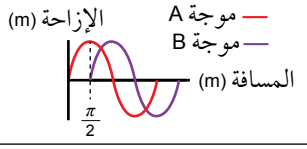
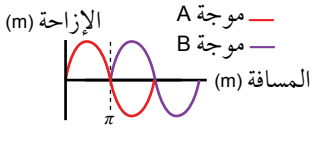
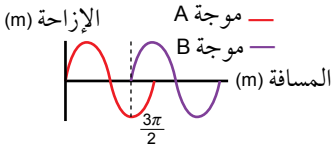
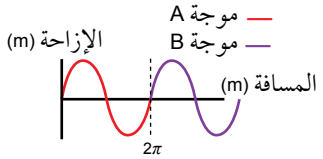
الشكل ٦-٥ النقاط المختلفة على طول الموجة لها أطوار مختلفة.

بشكل عام، عندما تكون المسافة الفاصلة بين جسيمَين مهتزَّين في موجة ما هي (x)، عندها يمكن حساب فرق الطور (ϕ) بين هذَين الجسيمَين بالدرجات باستخدام المعادلة أو العلاقة:

$$\phi = \frac{x}{\lambda} \times 360°$$

حيث (λ): طول الموجة.

يمكن وصف الموجات وفرق الطور بينها بالطريقة نفسها التي نصف بها فرق الطور بين نقطتين على الموجة نفسها، ويوضح الجدول ٦-١ فرق الطور بين موجتين A و B متساويتين في التردد وطول الموجة.

الشكل	الوصف	x	Δt	ϕ (°)	ϕ (rad)
	متّفقتان في الطور	0	0	0°	0
	مختلفتان في الطور	$\frac{1}{4}\lambda$	$\frac{1}{4}T$	90°	$\frac{\pi}{2}$
	متعاكستان في الطور	$\frac{1}{2}\lambda$	$\frac{1}{2}T$	180°	π
	مختلفتان في الطور	$\frac{3}{4}\lambda$	$\frac{3}{4}T$	270°	$\frac{3\pi}{2}$
	متّفقتان في الطور	λ	T	360°	2π

الجدول ٦-١ فرق الطور بين موجتين متساويتين في التردد والطول الموجي.

سؤال

(٣) باستخدام محورَي الإزاحة والمسافة، ارسم مخططًا لموجتَين A و B؛ بحيث يكون للموجة A ضعف الطول الموجي للموجة B ونصف سعتها.

٦-٢ طاقة الموجة

من المهم أن ندرك أنه بالنسبة إلى كلا النوعَين من الموجات الميكانيكية (الطولية والمستعرضة)، فإن الجسيمات التي تتكوّن منها المادة التي تنتقل الموجة عبرها لا تنتقل، بل تهتز فقط حول نقطة ثابتة، والذي ينتقل هو **الطاقة** التي تنقلها الموجة، فعندما يهتز كل جسيم فإنه يدفع الجسيم المجاور له بنقل الطاقة إليه، وبهذه الطريقة تنتقل الطاقة من جسيم إلى آخر ثم إلى الذي يليه، وهكذا على طول الموجة.

شدة الموجة

مصطلح **الشدة** **Intensity** (I) له معنى دقيق جدًا في الفيزياء، إذ تُعرّف شدة الموجة بأنها معدل الطاقة المنقولة (القدرة) عبر وحدة المساحة العمودية على اتجاه انتشار الموجة، ويُرمز إلى شدة الموجة بالرمز (I).

مصطلحات علمية

الشدة **Intensity**: معدل الطاقة (القدرة) المنقولة عبر وحدة المساحة العمودية على اتجاه انتشار الموجة.

$$\text{شدة الموجة} = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}}$$

تُقاس شدة الموجة بالواط لكل متر مربع ($W\,m^{-2}$)، فعلى سبيل المثال عندما تكون الشمس في السماء عمودية فوق الرأس، تكون شدة إشعاعها نحو 1 كيلو واط لكل متر مربع ($1.0\ kW\,m^{-2}$) وهذا يعني أن الطاقة تصل إلى معدل 1 kW ($1000\ J\,s^{-1}$) تقريبًا على كل متر مربع من سطح الأرض، وتكون شدة ضوء الشمس في الجزء العلوي من الغلاف الجوي أكبر من ذلك، ما يعادل ($1.4\ kW\,m^{-2}$) تقريبًا.

سؤال

(٤) مصباح قدرته (100 W) يبعث إشعاعًا كهرومغناطيسيًا في جميع الاتجاهات. بافتراض أن المصباح مصدر نقطي، احسب شدة الإشعاع:

أ. على مسافة (1.0 m) من المصباح.

ب. على مسافة (2.0 m) من المصباح.

تلميح: فكّر في مساحة الكرة ($4\pi r^2$).

الشدة والسعة

تقل شدة الموجة بشكل عام أثناء انتقالها على طول الموجة لسببين:

- قد «تنتشر» الموجة (كما في مثال انتشار الضوء من مصباح في السؤال ٤).
- قد تُمتص الموجة أو تتشتت (كما هي الحال عندما يمر الضوء عبر الغلاف الجوي للأرض).

مع انتشار الموجة فإن سعتها تتناقص، وهذا يشير إلى أن شدة الموجة (I) مرتبطة بالسعة (A).

في الواقع الشدة (I) تتناسب طرديًا مع مربع السعة (A):

الشدة $\propto$ مربع السعة

$$I \propto A^2$$

تشير العلاقة أيضًا إلى أنه بالنسبة إلى موجة معيّنة فإن:

$$\frac{\text{الشدة}}{\text{مربع السعة}} = \text{مقدار ثابت}$$

لذلك، إذا كانت إحدى الموجتين لها **ضعف** سعة موجة أخرى وكلتاهما تنتشران في الوسط نفسه، فإن شدتها تكون **أربعة أمثال** شدة الموجة الأخرى، وهذا يعني أن هذه الموجة تنقل أربعة أمثال معدل الطاقة لكل وحدة مساحة عمودية على اتجاه انتشار الموجة.

سؤال

٥ تصدر موجة بسعة (5.0 cm) وشدة ($400\ \text{W m}^{-2}$).

أ. احسب شدة الموجة إذا زادت سعتها إلى (10.0 cm).

ب. احسب سعة الموجة إذا قلّت شدتها إلى ($100\ \text{W m}^{-2}$).

٣-٦ سرعة الموجة

تُعرف السرعة التي تنتقل بها الطاقة بواسطة الموجة بسرعة الموجة (v)، وتُقاس بوحدة (m s^{-1})، فسرعة الموجة الصوتية في الهواء عند ضغط جوي ($10^5\ \text{Pa}$) ودرجة الحرارة (20°C) تساوي نحو ($340\ \text{m s}^{-1}$)، في حين أن سرعة الضوء في الفراغ تساوي ($3.00 \times 10^8\ \text{m s}^{-1}$) تقريبًا.

معادلة الموجة

يمكن تحديد معادلة مهمة تربط السرعة (v) لموجة بترددها (f) وطول موجتها (λ)، كما يأتي:

$$\text{السرعة} = \frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}}$$

ستقطع الموجة مسافة طول موجي واحد كامل (λ) في زمن يساوي زمن دوري واحد (T)، لذلك:

$$\text{سرعة الموجة} = \frac{\text{طول الموجة}}{\text{الزمن الدوري}}$$

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

$$v = \frac{1}{T} \times \lambda$$

وبالتعويض عن $f = \frac{1}{T}$ نحصل على:

$$v = f\lambda$$

حيث (v): سرعة الموجة، و (f): تردد الموجة، و (λ): طول الموجة.

قد يساعد مثال عددي في توضيح ذلك: تخيّل موجة تتجاوزك ترددها (5 Hz) وطولها الموجي (3 m)، فإن ذلك يعني أنه في ثانية واحدة (1 s) تتجاوزك خمس دورات موجية كاملة، طول كل منها (3 m). إذًا الطول الكلي للموجات التي تجاوزتك في (1 s) هو (15 m)، والمسافة التي تقطعها الموجة في الثانية هي سرعتها، وبالتالي فإن سرعة الموجة هي ($15\ m\ s^{-1}$).

يمكنك أن ترى أنه بالنسبة إلى **سرعة معيّنة** لموجة ما، فإنه كلما ازداد طولها الموجي قلّ ترددها (وكلما قلّ طولها الموجي ازداد ترددها)، هذا يعني أنه بالنسبة إلى موجة ما سرعتها ثابتة (في وسط واحد)، فإن طولها الموجي يتناسب عكسيًا مع التردد؛ فسرعة الصوت في الهواء ثابتة (عند درجة حرارة وضغط معيّنَين)، ويمكن جعل طول الموجة للصوت أصغر بواسطة زيادة تردد مصدر الصوت.

يعطي الجدول ٦–٢ أنموذج قيم للسرعة (v) والتردد (f) وطول الموجة (λ) لبعض الموجات الميكانيكية. يمكنك التحقّق بنفسك من أن المعادلة $v = f\lambda$ صحيحة.

	موجات الماء في حوض موجات	موجات الصوت في الهواء	الموجات في زنبرك
السرعة v ($m\ s^{-1}$)	1.2 تقريبًا	340	1 تقريبًا
التردد f (Hz)	6 تقريبًا	من 20 إلى 20000 (بحدود سمع الإنسان)	2 تقريبًا
طول الموجة λ (m)	0.2 تقريبًا	من 17 إلى 0.017	0.5 تقريبًا

الجدول ٦–٢ بيانات بعض الموجات الميكانيكية التي غالبًا ما تُستقصى في المختبر.

مثال

٢. إذا كان تردد الدرجة النغمية C المتوسطة على البيانو تساوي (264 Hz) (الصورة ٦–٥)، فاحسب طول الموجة للصوت الناتج عن هذه الدرجة النغمية، إذا علمت أن سرعة الصوت في الهواء ($340\ m\ s^{-1}$).

الخطوة ١: نعيد ترتيب معادلة الموجة بالشكل الآتي:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

الخطوة ٢: نعوّض القيم لنحصل على λ:

$$\lambda = \frac{340}{264} = 1.3\ m$$

طول الموجة λ هو (1.3 m).

الصورة ٦–٥ كل وتر في البيانو ينتج عنه نغمة مختلفة.

أسئلة

٦ الصوت موجة ميكانيكية يمكن أن تنتقل عبر مادة صلبة. احسب تردد الصوت الذي طول موجته (0.25 m) وينتقل عبر الفولاذ بسرعة ($5060\ m\ s^{-1}$).

٧ يهتز وتر كمان بتردد (64 Hz)، احسب سرعة الموجات المستعرضة على وتر الكمان، إذا كان الطول الموجي للموجة (140 cm).

٨ تستخدم أداة مهتزة ترددها (30 Hz) لإرسال موجة مستعرضة طولها الموجي (5.0 cm) على طول وتر مشدود. احسب لهذه الموجة:

أ. ترددها.

ب. سرعتها.

٩ انسخ الجدول ٦-٣ وأكمله.

(سرعة موجات الراديو تساوي $3.00 \times 10^8\ m\ s^{-1}$).

المحطة	طول الموجة (m)	التردد (MHz)
راديو A (FM)		97.6
راديو B (FM)		94.6
راديو B (LW)	1515	
راديو C (MW)	693	

الجدول ٦-٣

٦-٤ تأثير دوبلر للموجات الصوتية

ربما لاحظت تغيرًا في النغمة التي تسمعها عندما تمر سيارة إسعاف وهي تطلق صافرة الإنذار الخاصة بها؛ إذ تكون حدة (درجة) الصوت أعلى مع اقتراب السيارة منك، وتنخفض كلما تحركت بعيدًا عنك. هذا مثال على **تأثير دوبلر Doppler effect**، وهذا ما يحدث أيضًا إذا مرّ بك قطار بسرعة وهو يطلق صافرته.

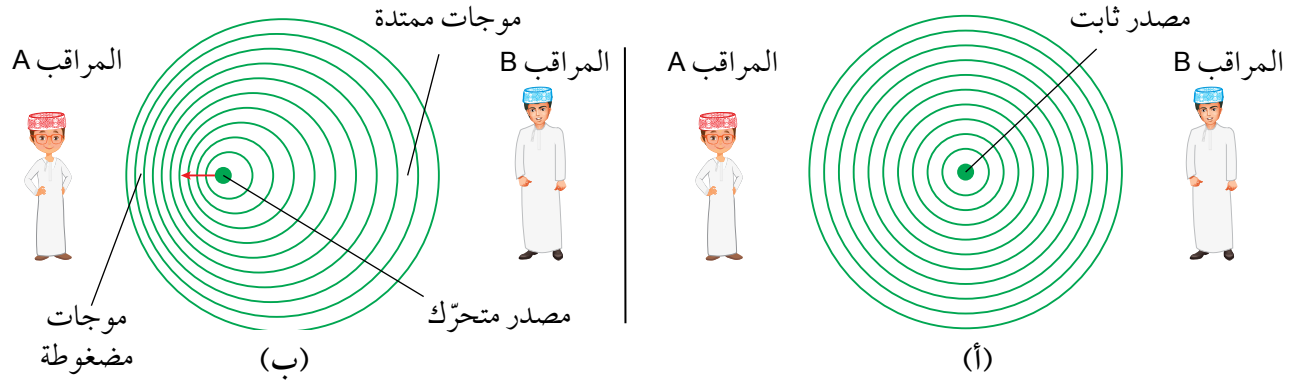
مصطلحات علمية

تأثير دوبلر Doppler effect: التغيّر في التردد أو طول الموجة الملاحظ لموجة عندما يتحرك مصدر الموجة باتجاه المراقب أو بعيدًا عنه (أو يتحرك المراقب بالنسبة إلى المصدر).

يبيّن الشكل ٦-٦ سبب ملاحظة هذا التغيّر في التردد؛ إذ يبيّن مصدرًا للصوت يبعث موجات بتردد ثابت (f_s)، بوجود مراقبَين A و B.

- إذا كان المصدر ثابتًا (الشكل ٦-٦ أ)، فإن الموجات تصل إلى المراقبَين A و B بالمعدل نفسه، وبالتالي يسمع كلاهما أصواتًا لها التردد (f_s) نفسه.
- إذا كان المصدر يتحرك باتجاه المراقب A ويبتعد عن المراقب B (الشكل ٦-٦ ب)، فإن الحالة مختلفة؛ إذ يمكنك أن ترى من المخطط أن الموجات تتقارب باتجاه A وتنتشر متباعدة باتجاه B.

ستصل إلى المراقب A موجات طولها الموجي أقصر (مضغوطة)، حيث يصل المزيد من الأطوال الموجية في الثانية إلى A، وبالتالي يسمع A صوتًا حادًا بتردد أعلى من تردد المصدر (f_s). أما الموجات التي تصل إلى B فيزداد طولها الموجي (امتدت) وسيسمع B صوتًا غليظًا بتردد أقل من (f_s).



الشكل ٦-٦ الموجات الصوتية (الخطوط الخضراء) المنبعثة بتردد ثابت من: (أ) مصدر ثابت (ب) مصدر متحرك بسرعة v_s (المسافة الفاصلة بين الخطوط الخضراء المتجاورة تساوي طولًا موجيًّا واحدًا).

معادلة التردد الملاحظ

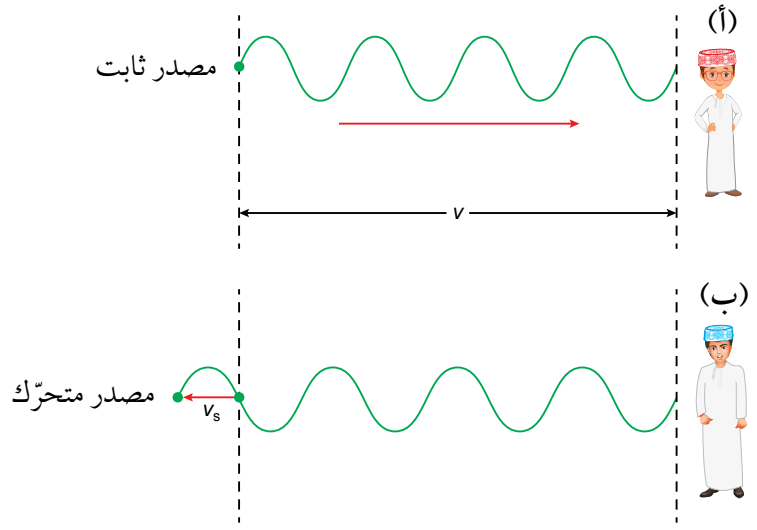
عندما يكون المصدر متحركًا والمراقب ثابتًا، نتحدث عن سرعتين مختلفتين؛ حيث يتحرك المصدر بسرعة (v_s)، وتنتقل الموجات الصوتية في الهواء بسرعة (v)، وهي لا تتأثر بسرعة المصدر (تذكّر أن سرعة الموجة تعتمد فقط على الوسط الذي تنتقل خلاله).

التردد وطول الموجة الذي يلاحظه المراقب سيتغيّر وفقًا للسرعة (v_s) التي يتحرك بها المصدر بالنسبة إلى المراقب الثابت. يبيّن الشكل ٦–٧ كيف يمكننا حساب طول الموجة الملاحظ (λ_0) والتردد الملاحظ (f_0).

تمثل مقاطع الموجات المبيّنة في الشكل ٦–٧ عددًا من أطوال الموجات المنبعثة من المصدر يساوي (f_s) في ثانية واحدة (1 s)، وإذا كان المصدر ثابتًا (الشكل ٦–٧ أ)، فإن طول هذا المقطع يساوي سرعة الموجة (v) (لأن السرعة = $\frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}}$ ، فإذا كان الزمن يساوي ثانية واحدة فإن السرعة تساوي المسافة). وطول الموجة الذي يلاحظه المراقب هو ببساطة:

$$\lambda_0 = \frac{v}{f_s}$$

تختلف الحالة عندما يبتعد المصدر عن المراقب (الشكل ٦–٧ ب)، إذ يتحرك المصدر في (1 s) مسافة (v_s). الآن سيكون طول المقطع لعدد (f_s) من أطوال الموجات يساوي ($v + v_s$).



الشكل ٦–٧ الموجات الصوتية المنبعثة بتردد ثابت: (أ) من مصدر ثابت (ب) من مصدر متحرك بسرعة v_s مبتعدًا عن المراقب (أي الشخص الذي يسمع الصوت).

يُعطى طول الموجة الملاحظ عندئذٍ بالمعادلة:

$$\lambda_0 = \frac{(v + v_s)}{f_s}$$

ويُعطى التردد الملاحظ بالمعادلة:

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{f_s \times v}{(v + v_s)}$$

حيث (f_0) التردد الملاحظ، و (f_s) تردد المصدر، و (v) سرعة الموجة في ذلك الوسط و (v_s) سرعة المصدر بالنسبة إلى المراقب.

يبيّن لنا هذا الأمر كيفية حساب التردد الملاحظ عندما يتحرك المصدر مبتعدًا عن المراقب؛ أمّا إذا كان المصدر يتحرك نحو المراقب، فإن طول المقطع لعدد (f_s) من أطوال الموجات سينضغط إلى طول أقصر يساوي $v - v_s$، وسيُعطى التردد الملاحظ بالمعادلة:

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{f_s \times v}{(v - v_s)}$$

يمكننا دمج هاتَين المعادلتَين لإعطاء معادلة واحدة لانزياح دوبلر في التردد (التردد الملاحظ) بسبب المصدر المتحرك:

معادلة تأثير دوبلر:

$$f_0 = \frac{f_s \times v}{(v \pm v_s)}$$

حيث تطبق إشارة الجمع على المصدر المبتعد عن المراقب، وإشارة الطرح على المصدر المقترب من المراقب، مع ملاحظة هذه النقاط المهمة:

- لا يتأثر تردد المصدر (f_s) بحركة المصدر.
- لا تتأثر السرعة (v) للموجات في أثناء انتقالها عبر الهواء (أو أي وسط آخر) بحركة المصدر أيضًا.

لاحظ أنه يمكن أيضًا ملاحظة تأثير دوبلر عندما يتحرك المراقب بالنسبة إلى مصدر ثابت، وكذلك عندما يتحرك كل من المصدر والمراقب أيضًا (هاتان الحالتان لن تتطرق إليهما في هذه المرحلة الدراسية).

مثال

٣. يطلق قطار صافرة إنذار بتردد (800 Hz) وهو يتحرك بسرعة ($60\ m\ s^{-1}$) مقتربًا من مراقب ثابت. احسب تردد الصوت الذي يسمعه المراقب.

سرعة الصوت في الهواء تساوي ($340\ m\ s^{-1}$).

الخطوة ١: اختر الشكل المناسب لمعادلة تأثير دوبلر. في هذه الحالة إن المصدر يقترب نحو المراقب فنختار إشارة الطرح:

$$f_o = \frac{f_s \times v}{(v - v_s)}$$

الخطوة ٢: عوّض القيم من السؤال وقم بالحل:

$$f_o = \frac{800 \times 340}{(340 - 60)} = \frac{800 \times 340}{280}$$

$$= 971\ Hz \approx 970\ Hz$$

وبالتالي فإن المراقب يسمع صوتًا تزداد حدّته (أو درجته) بشكل ملحوظ لأن القطار يتحرك بسرعة منتظمة بالنسبة إلى سرعة الصوت في الهواء.

سؤال

(١٠) يصدر محرّك طائرة صوتًا بتردد ثابت قيمته (120 Hz) وتبتعد الطائرة عن مراقب ثابت بسرعة ($80\ m\ s^{-1}$). احسب:

أ. طول الموجة الملاحظ للصوت الذي يسمعه المراقب.

ب. التردد الملاحظ لهذا الصوت.

(سرعة الصوت في الهواء = $340\ m\ s^{-1}$)

ملخّص

تحمل الموجة المسافرة الطاقة من مكان إلى آخر.

هناك نوعان من الموجات المسافرة، طولية ومستعرضة. الموجات الطولية لها اهتزازات موازية للاتجاه الذي تنتقل فيه الموجة، في حين أن الموجات المستعرضة لها اهتزازات عمودية على الاتجاه الذي تنتقل فيه الموجة.

الإزاحة هي المسافة التي تبعدها نقطة ما في موجة من موضع الاتزان.

السعة هي أقصى إزاحة لموجة ما عن موضع الاتزان.

طول الموجة هو المسافة بين نقطتَين متجاورتَين على موجة ما تهتزان بالكيفية نفسها.

الزمن الدوري هو الزمن المستغرق لنقطة ما في موجة لإكمال اهتزازة كاملة.

التردد هو عدد الاهتزازات لكل ثانية لنقطة ما في الموجة.

فرق الطور هو قياس لمقدار التأخر أو التقدم بين جسيمين في الموجة، ويقاس بالدرجات أو الراديان.

النقطتان على موجة ما، المفصولتان بمسافة طول موجة واحد، لهما فرق طور مقداره (0°) أو (360°).

يرتبط التردد f للموجة بالزمن الدوري T بواسطة المعادلة:

$$f = \frac{1}{T}$$

تُعطى سرعة جميع الموجات بواسطة المعادلة:

سرعة الموجة = التردد × طول الموجة

$$v = f\lambda$$

يمكن قياس تردد الموجة الصوتية باستخدام جهاز رسم إشارة الأشعة المهبطية (الكاثودية) (الأوسيلوسكوب).

تُعرّف شدة الموجة بأنها قدرة الموجة المرسلة لكل وحدة مساحة عمودية على اتجاه انتشار الموجة، وتُعطى بالمعادلة:

$$\text{شدة الموجة} = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}}$$

وحدة شدة الموجة هي $W\ m^{-2}$.

شدة الموجة I تتناسب طرديًا مع مربع السعة A:

$$I \propto A^2$$

تأثير دوبلر هو التغيّر في تردد الموجة الملاحظ عندما يتحرك المصدر بسرعة (v_s)، ويُعطى التردد الملاحظ بالمعادلة:

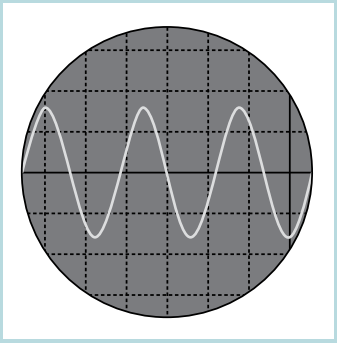
$$f_0 = \frac{f_s v}{(v \pm v_s)}$$

أسئلة نهاية الوحدة

١ ما الوحدة الصحيحة لشدة الموجة؟

أ. $J\ m^{2}$ ب. $J\ s^{-1}$ ج. $W\ m^{2}$ د. $W\ m^{-2}$

٢ يُظهر الشكل ٦–٨ شاشة جهاز رسم إشارة الأشعة المهبطية (الكاثودية) (الأوسيلوسكوب CRO). ضُبطت معايرة مقياس الزمن على ($500\ \mu s\ div^{-1}$). احسب الزمن الدوري للإشارة، وترددها.



الشكل ٦–٨

٣ يجلس محمود على شاطئ البحر يراقب قاربًا آليًا يتحرك بسرعة ما في عرض البحر، وللقارب صافرة إنذار تصدر صوتًا ثابتًا بتردد (420 Hz)، ويتحرك القارب في مسار دائري بسرعة ($25\ m\ s^{-1}$)، فيلاحظ محمود أن نغمة صافرة الإنذار تتغيّر بنمط منتظم.

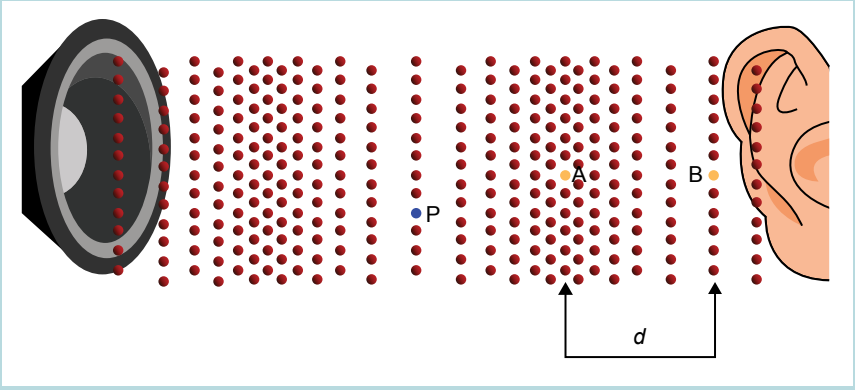
أ. اشرح سبب تغيّر حدة (درجة) صوت صافرة الإنذار كما يلاحظها محمود.

ب. حدّد الحد الأقصى والأدنى للترددات التي سيسمعها محمود.

ج. عند أي نقطة في حركة القارب سيسمع محمود النغمة الأكثر حدة؟

(سرعة الصوت في الهواء = $340\ m\ s^{-1}$).

٤ يبيّن الشكل ٦–٩ بعض جسيمات الهواء أثناء مرور موجة صوتية.



الشكل ٦–٩

تابع

أ. هل تظهر جبهة الموجة التي تحتوي:

١. الجسيم A انضغاطًا أم تخلخلًا؟

٢. الجسيم B انضغاطًا أم تخلخلًا؟

ب. صِف كيف يتحرك الجسيم المسمى P مع عبور الموجة عبره.

ج. تردد الموجة الصوتية (240 Hz). اشرح باستخدام حركة جسيم واحد معنى ذلك.

د. إذا علمت أن سرعة موجة الصوت ($340\ m\ s^{-1}$) فحدد طول المسافة d بين الجسيمين A و B عند قيمة التردد نفسها في الجزئية (ج).

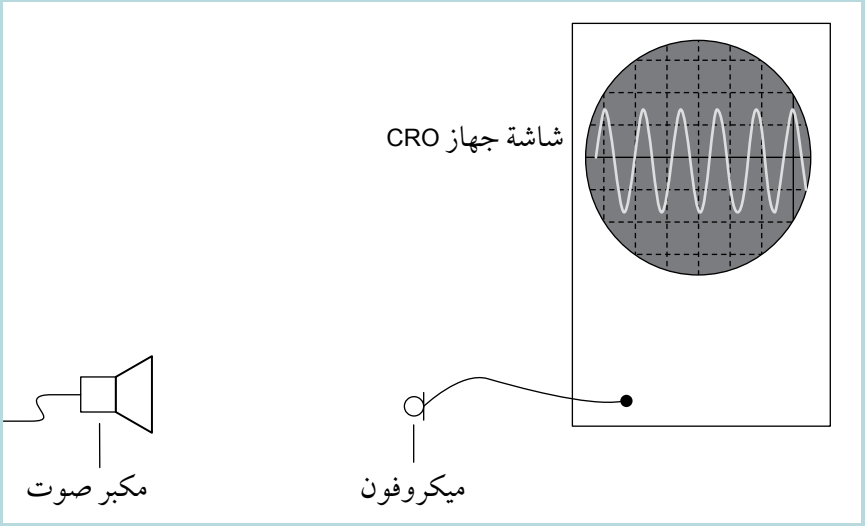
٥ تحدّد فاطمة سرعة الصوت في تجربة ما باستخدام المعادلة $v = f\lambda$. قيمة كل من التردد (f) وطول الموجة (λ) مبيّنة أدناه:

$f = (1000 \pm 10)$ Hz

$\lambda = (34 \pm 2)$ cm

احسب السرعة (v) مضمنًا قيمة عدم اليقين المطلق.

٦ يبيّن الشكل ٦–١٠ مكبر صوت يصدر صوتًا وميكروفونًا متصلًا بجهاز رسم إشارة الأشعة المهبطية (الكاثودية) (CRO).



الشكل ٦–١٠

أ. يوصف الصوت بأنه موجة طولية. صِف الموجات الصوتية بناءً على حركة جسيمات الهواء.

ب. ضُبطت معايرة مقياس الزمن لجهاز رسم إشارة الأشعة المهبطية (الكاثودية) على ($5\ ms\ div^{-1}$). احسب تردد الصوت.

ج. وُجد أن طول موجة الصوت يساوي (1.98 m). احسب سرعة الصوت.

تابع

٧ يمكن استخدام تأثير دوبلر لقياس سرعة تدفق الدم، إذ تمرّر الموجات فوق الصوتية وهي صوت عالي التردد من جهاز إرسال إلى الجسم، فتنعكس عن الجسيمات في الدم، ثم يقاس الانزياح في التردد بواسطة كاشف ثابت موضوع خارج الجسم وقريب من جهاز الإرسال.

تتحرك الجسيمات في دم أحد المرضى بسرعة ($30\ cm\ s^{-1}$) في اتجاه بعيدٍ عن جهاز الإرسال مباشرة. سرعة الموجات فوق الصوتية في الجسم تساوي ($1500\ cm\ s^{-1}$).

تم نمذجة هذه الحالة جزئيًا باعتبار أن الجسيمات تصدر صوتًا بتردد (4.000 MHz) في أثناء ابتعادها عن الكاشف. ينتقل هذا الصوت إلى الكاشف خارج الجسم، ولكن التردد المقاس بواسطة الكاشف لا يساوي (4.000 MHz).

أ. اذكر ما إذا كان التردد الذي يستقبله الكاشف الثابت أعلى أو أقل من التردد المنبعث من حركة الجسيمات. اشرح إجابتك.

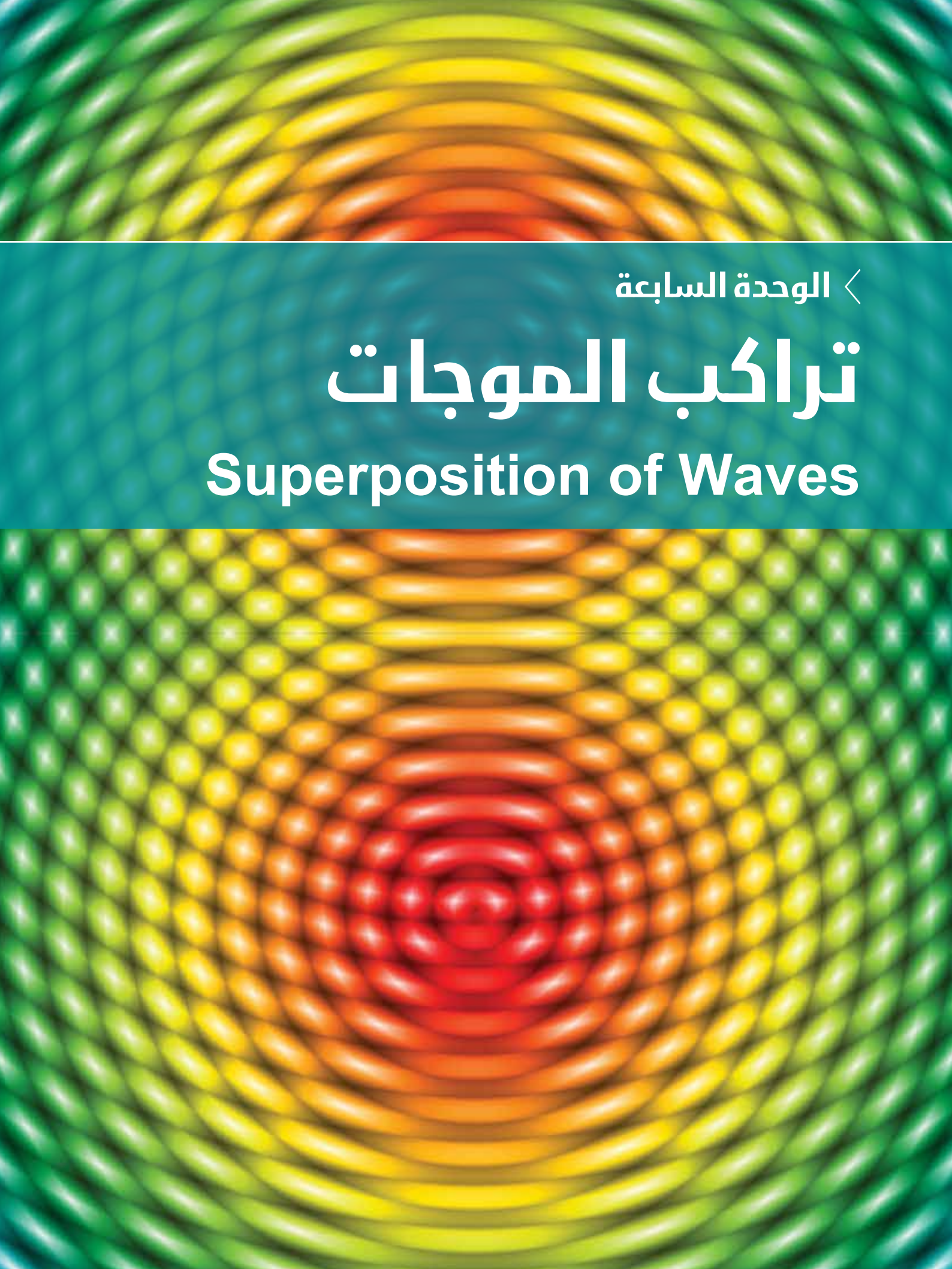
ب. احسب الفرق بين التردد المنبعث من الجسيمات المتحركة والتردد المقاس بواسطة الكاشف.

ج. اقترح سبب وجود اختلاف في التردد بين الصوت الذي تستقبله الجسيمات والصوت المنبعث من جهاز الإرسال أيضًا.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم الموجات المستعرضة والطولية.	٦-١			
أعرّف المصطلحات: طول الموجة والسعة والتردد وسرعة الموجة وفرق الطور وشدة الموجة.	٦-١، ٦-٢			
أستخدم جهاز رسم إشارة الأشعة المهبطية (الكاثودية) (CRO) لتحديد التردد والسعة.	٦-١			
أستخدم المعادلات والعلاقة: الشدة ∝ مربع السعة شدة الموجة = القدرة / المساحة $v = f\lambda$	٦-٢، ٦-٣			
أصف تأثير دوبلر للموجات الصوتية.	٦-٤			
أستخدم معادلة دوبلر $f_0 = \frac{f_s v}{(v \pm v_s)}$ عند اقتراب مصدر الصوت وابتعاده.	٦-٤			



الوحدة السابعة

تراكب الموجات

Superposition of Waves

أهداف التعلّم

٧-١ يشرح مبدأ تراكب الموجات ويستخدمه.

٧-٢ يعرّف مصطلح الحيود ويستخدمه.

٧-٣ يصف التجارب التي تُظهر الحيود ويشرحها بما في ذلك التأثير النوعي لعرض الفجوة بالنسبة إلى الطول الموجي لموجة ما.

٧-٤ يعرّف مصطلحي التداخل والترابط ويستخدمهما.

٧-٥ يصف التجارب التي تُظهر تداخلًا من مصدرَين باستخدام موجات الماء في حوض الموجات، وموجات الصوت وموجات الضوء والموجات الميكروية ويشرحها.

٧-٦ يصف الشروط المطلوبة لملاحظة أهداب التداخل ثنائي المصدر.

٧-٧ يستخدم المعادلة: $\lambda = \frac{ax}{D}$ لتداخل الضوء من شق مزدوج.

٧-٨ يستخدم المعادلة: $d \sin\theta = n\lambda$.

٧-٩ يصف استخدام محزوز الحيود لتحديد طول الموجة لضوء ما.

٧-١٠ يصف التجارب التي تُظهر الموجات المستقرة باستخدام الموجات الميكروية والأوتار المشدودة والأعمدة الهوائية ويشرحها (سيُفترض أن تصحيحات نهاية الأنابيب الهوائية مهملة؛ معرفة مفهوم تصحيحات النهاية غير مطلوبة).

٧-١١ يشرح بيانيًا طريقة تكوّن موجة مستقرة، ويحدّد العُقد والبطون.

٧-١٢ يصف كيف يمكن تحديد طول موجة مستقرة من مواقع العُقد أو البطون.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- هل يمكنك تذكّر الخصائص العامة للموجات بما في ذلك الموجات الكهرومغناطيسية؟ اكتب أكبر عدد ممكن من الخصائص التي يمكنك تذكّرها.
- معرفة فرق الطور أمر مهم لفهم كيفية اتحاد الموجات في حيّز ما. ذكّر نفسك بذلك بواسطة كتابة فرق الطور لجُسيمَين يهتزان في الطور نفسه، وجُسيمَين يهتزان في طورَين متعاكسَين.

العلوم ضمن سياقها

المستوى العالي من الضوضاء في بعض الوظائف يضرّ بالصحة، كالعمل في غرفة محرك سفينة، أو معاينة الطائرات التي تهبط أو تقلع في مطار ما؛ والحل بسيط وهو ارتداء سماعات إلغاء الضوضاء، التي ستقلّل بشكل ملحوظ من شدة الضجيج الذي يصل إلى الأذنَين، حيث يؤدي ارتداء سماعات إلغاء الضوضاء إلى حماية الأذنَين (الصورة ٧-١)، إذ تُنشئ الإلكترونيات داخل هذه السماعات نسخة من صوت الضوضاء المرسلة إلّا أنها دائمًا في طور معاكس (أي بفرق طور 180°) مع الضوضاء، ويؤدي جمع هاتين الموجتَين إلى خفض شدة الصوت الذي يصل إلى الأذن إلى حدود الصفر تقريبًا.

هل يمكنك التفكير في وظائف أخرى تكون فيها مثل هذه السماعات مفيدة وأخرى غير مفيدة؟

سندرس في هذه الوحدة كيفية جمع الموجات وإلغائها؛ ومبدأ تراكب الموجات هو نقطة الانطلاق الملائمة.

الصورة ٧-١ سماعات إلغاء الضوضاء فعّالة في إلغاء الضوضاء وحماية الأذنين من الضرر.

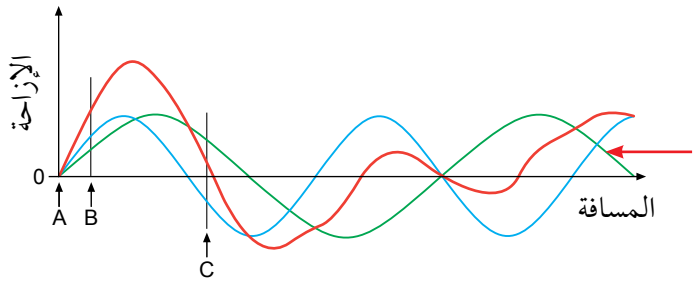
٧-١ مبدأ تراكب الموجات

درسنا في الوحدة السادسة الموجات والفرق بين الموجات الطولية والموجات المستعرضة، وفي هذه الوحدة سندرس ما يحدث عندما تلتقي موجتان أو أكثر عند نقطة في حيّز ما وتتحدان معًا (الصورة ٧-٢).

إذًا، ماذا يحدث عندما تصل موجتان معًا إلى المكان نفسه؟ يمكننا الإجابة عن هذا السؤال من ممارساتنا اليومية. ماذا يحدث عندما تتقاطع حزمتان من موجات الأشعة الضوئية لمصباحَين يدويَّين؟ إنهما تعبران مباشرةً، إحداهما من خلال الأخرى، وبالمثل تعبر الموجات الصوتية متداخلة فيما بينها على ما يبدو دون أن يؤثر بعضها على بعض، وهذا مختلف جدًا عن سلوك **الجسيمات**، فعندما تصطدم كرتان زجاجيتان في الهواء فإن إحداهما ترتدّ عن الأخرى بطريقة مختلفة تمامًا عن الموجات.

الصورة ٧-٢ تظهر موجات عند سقوط قطرات من الماء في حوض السباحة، إذ تتداخل الموجات لتكوين نمط معقّد من القمم والقيعان.

إذا نظرنا بعناية إلى كيفية تفاعل مجموعتَين من الموجات عندما تلتقيان فسنجد بعض النتائج المدهشة، فعندما تلتقي موجتان فإنهما تتّحدان وتُجمع إزاحتا الموجتَين معًا. يُبيّن الشكل ٧-١ تمثيلَين بيانيَّين (الإزاحة - المسافة) لموجتَين جيبيَّتَين (باللونين الأزرق والأخضر) لهما أطوال موجية مختلفة، كما يُبيّن أيضًا الموجة المحصلة (باللون الأحمر)، الناتجة من اتحاد هاتين الموجتَين، فكيف توصلنا لإيجاد الإزاحة الناتجة المبيّنة باللون الأحمر؟



الشكل ٧-١ جمع موجتَين من خلال مبدأ تراكب الموجات، يمثل الخط الأحمر الموجة المحصّلة.

عند الموضع A؛ تكون إزاحة كل من الموجتَين صفرًا، وبالتالي فإن الإزاحة المحصلة يجب أن تكون صفرًا أيضًا، أما في الموضع B فكِلا الموجتَين لهما إزاحة موجبة، لذلك فإن الإزاحة الناتجة يمكن إيجادها بواسطة جمع إزاحتَي

الموجتَين معًا، وفي الموضع C تكون إزاحة إحدى الموجتَين موجبة والأخرى سالبة؛ فالإزاحة الناتجة تقع بين إزاحتَي الموجتَين، وتكون الإزاحة المحصّلة في الواقع هي المجموع الجبري لإزاحتَي الموجتَين؛ أي مجموعهما مع مراعاة إشارتَي الموجب أو السالب.

يمكننا بطريقة معيّنة على طول محور المسافة حساب محصّلة الموجتَين بواسطة جمعهما جمعًا جبريًا عند كل لحظة زمنية، لاحظ أنه بالنسبة إلى هاتين الموجتَين فإن الموجة المحصّلة هي موجة معقّدة إلى حدّ ما؛ حيث تظهر انحدارات ونتوءات على طولها.

فكرة إيجاد محصلة موجتين تلتقيان في نقطة ما عن طريق جمع الإزاحتين في كل نقطة تسمى **مبدأ تراكب الموجات Principle of superposition**. ويمكن تطبيق هذا المبدأ على أكثر من موجتَين وعلى جميع أنواع الموجات أيضًا وينص مبدأ تراكب الموجات على أنه:

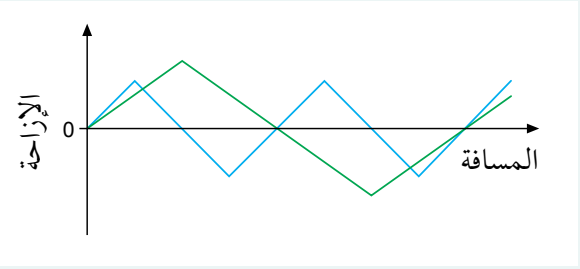
عندما تلتقي موجتان أو أكثر عند نقطة ما، فإن الإزاحة المحصّلة هي المجموع الجبري لإزاحات الموجات الفردية.

مهمّ

مبدأ تراكب الموجات Principle of superposition:
عندما تلتقي موجتان أو أكثر عند نقطة ما، فإن الإزاحة المحصّلة هي المجموع الجبري لإزاحات الموجات الفردية.

سؤال

١ ارسم موجتَين «مثلّثتَين» على ورقة تمثيل بياني مشابهتَين لتلك المبيّنة في الشكل ٧-٢ (التعامل مع هذه الموجات المثلّثة أسهل من التعامل مع الموجات الجيبية). يجب أن يكون طول الموجة لإحدى الموجتَين (8.0 cm) والسعة (2.0 cm)، وطول الموجة الأخرى (16.0 cm) وسعتها (3.0 cm). استخدم مبدأ تراكب الموجات لتحديد الإزاحة المحصلة في نقاط مناسبة على طول الموجتَين، وارسم الموجة المحصلة كاملةً.



الشكل ٧-٢ موجتان مثلثتان.

٧-٢ حيود الموجات

يجب أن تدرك أن جميع الموجات (مثل الصوت والضوء) قد تنعكس وتنكسر، وهناك ظاهرة أخرى تنطبق على جميع الموجات وهي أنها يمكن أن تحيد (تنحني)، **والحيود Diffraction** هو انحناء الموجة أثناء مرورها عبر فجوة أو حول حافة وانتشارها، ومن السهل ملاحظة آثار الحيود واستقصاؤه باستخدام موجات الماء، كما هو مبيّن في المهارة العملية ٧-١.

مصطلحات علمية

الحيود Diffraction: انحناء الموجة عندما تمر عبر فجوة ما أو تتجاوز حافة وانتشارها.

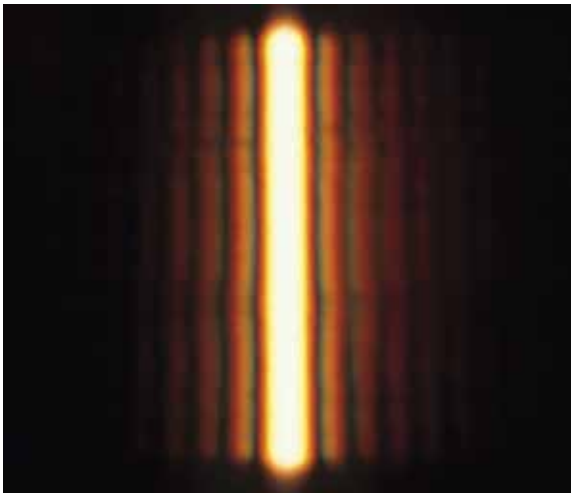
حيود الصوت والضوء

تكون تأثيرات الحيود أكبر ما يمكن عندما تمر الموجات عبر فجوة بعرض يساوي تقريبًا طولها الموجي، وهذا مفيد في شرح سبب قدرتنا على ملاحظة الحيود بسهولة لبعض الموجات دون موجات أخرى؛ على سبيل المثال الموجات الصوتية في النطاق المسموع لها أطوال موجية تتراوح من بضعة سنتيمترات إلى بضعة أمتار (انظر الجدول ٦-٢

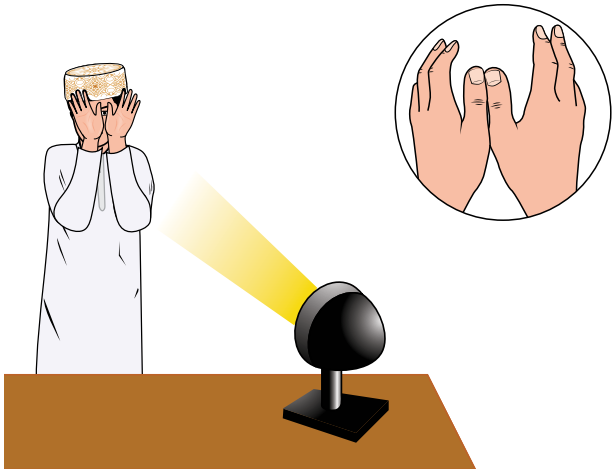
من الوحدة السادسة)، لذلك قد نتوقع ملاحظة تأثيرات حيود الصوت في بيئتنا، فالأصوات مثلًا تحيد عند مرورها عبر مداخل الأبواب، فإذا كان عرض مدخل الباب مقاربًا لطول موجة الصوت، فإن الصوت يحيد وينتشر من إحدى الغرف إلى الغرف المجاورة.

للضوء المرئي أطوال موجية أقصر بكثير (5×10^{-7} m تقريبًا)، لذلك لا يحيد بشكل ملحوظ بواسطة مداخل الأبواب؛ لأن عرض الفجوة أكبر بأكثر من مليون مرة من طول موجة الضوء، لكن يمكننا أن نلاحظ حيود الضوء بواسطة تمريره عبر شق ضيق جدًا أو ثقب صغير جدًا؛ فعندما يوجّه ضوء ليزر إلى شق عرضه مقارب للطول الموجي للضوء الساقط فإنه يحيد وينتشر في الحيز الموجود خلف الشق ليشكل بقعة على الشاشة (الصورة ٧-٣)، ويسمح الشق القابل للتعديل برؤية تأثير تضييق الفجوة تدريجيًا.

يمكنك رؤية تأثيرات الحيود بنفسك بواسطة عمل شق ضيق بإبهاميك والنظر من خلاله إلى مصدر ضوء بعيد (الشكل ٧-٣)، ويمكنك رؤية تأثير تضييق الشق من خلال الضغط برفق على إبهاميك معًا لتضييق الفجوة بينهما.



الصورة ٧-٣ يحيد الضوء في أثناء مروره عبر شق ضيق جدًا.



الشكل ٧-٣ يمكنك رؤية تأثيرات الحيود بالنظر إلى مصدر ساطع للضوء (مصباح) من خلال شق ضيق. ماذا يحدث عندما تجعل الشق أضيق؟

مهارة عملية ٧-١

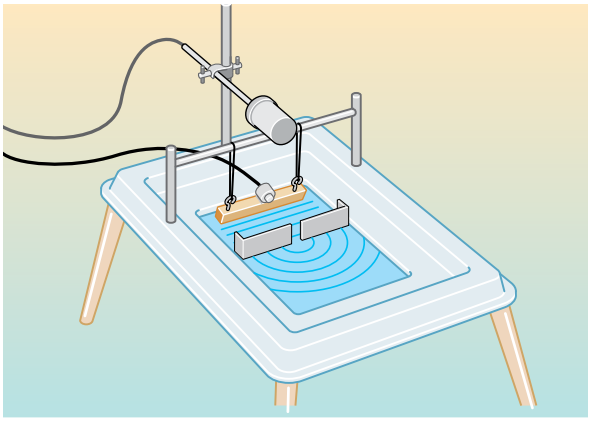
ملاحظة الحيود في حوض الموجات المائية

يمكن استخدام حوض الموجات لعرض الحيود، إذ تتولد موجات مستوية باستخدام ساق مهتز، فتتحرك الموجات نحو فجوة في حاجز (الشكل ٧-٤)، حيث تصطدم الموجات بالحاجز وتنعكس عنه إلى الخلف؛ أمّا التي تصل إلى الفجوة فإنها تمر عبرها فتنحني وتنتشر في الحيز خلفها، وانحناء الموجات في أثناء انتقالها عبر فجوة (أو بعد تجاوز حافة الحاجز وانتشارها) هو ما يسمى الحيود.

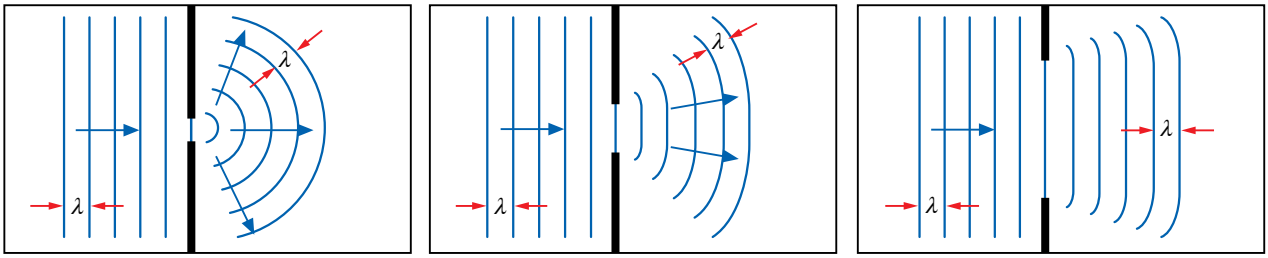
تابع

يعتمد مدى حيود الموجات على عرض الفجوة، وهذا مبيّن في الشكل ٧-٥ إذ توضّح الخطوط في هذا المخطط جبهات الموجات، فتبدو كما لو أننا ننظر إلى الموجات من أعلى حوض الموجات، ونرسم خطوطًا لتمثيل قمم تلك الموجات في زمن ما، **والمسافة الفاصلة بين جبهتَي الموجة المتجاورتَين تساوي طول الموجة (λ) للموجات.**

عندما تواجه الموجات فجوة في حاجز فإن مقدار الحيود يعتمد على عرض الفجوة، إذ يصعب وجود أي حيود ملحوظ عندما يكون عرض الفجوة أكبر بكثير من طول الموجة، وكلما أصبح عرض الفجوة أقل يصبح تأثير الحيود أكثر وضوحًا، ويكون أوضح ما يمكن عندما يكون عرض الفجوة مساويًا تقريبًا للطول الموجي للموجات.



الشكل ٧-٤ الحيود في حوض الموجات المائية.



(أ) **يكون عرض الفجوة أكبر بكثير من طول الموجة ويصعب ملاحظة الحيود.**

(ب) **يكون عرض الفجوة أكبر من طول الموجة ويلاحظ حيود محدود.**

(ج) **يكون عرض الفجوة مساويًا لطول الموجة تقريبًا ويكون تأثير الحيود أكبر ما يمكن.**

الشكل ٧-٥ يعتمد مدى حيود الموجات على العلاقة بين طول الموجة وعرض الفجوة.

حيود موجات الراديو والموجات الميكروية

قد يكون لموجات الراديو أطوال موجية تقارب الكيلومتر، وقد تحيد هذه الموجات بسهولة بواسطة الفجوات الموجودة بين التلال والمباني الشاهقة حول مدننا وقرانا؛ أما الموجات الميكروية التي تستخدمها شبكة الهواتف المحمولة فلها أطوال موجية تقارب (10 cm)، هذه الموجات لا تحيد بسهولة (لأن أطوال موجاتها أصغر بكثير من أبعاد الفجوات) وغالبًا ما تنتقل عبر الفضاء بخطوط مستقيمة.

تحتاج السيارات إلى هوائيات راديو خارجية؛ لأن موجات الراديو لها أطوال موجية أطول من أبعاد النوافذ؛ لذلك لا يمكن أن تحيد إلى داخل السيارة. وإذا حاولت الاستماع إلى راديو في قطار بدون هوائي خارجي، فستجد أن إشارات FM يمكن التقاطها بشكل ضعيف (أطوالها الموجية تقارب 3 m)، أما إشارات AM فأطوالها الموجية أطول، لذلك لا يمكن أن تدخل إلى القطار على الإطلاق.

سؤال

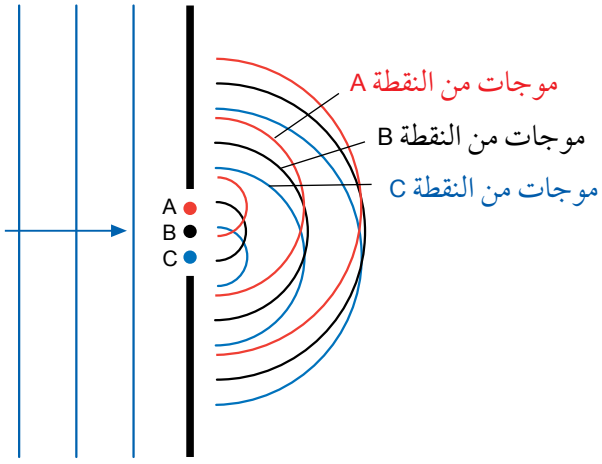
(٢) يستخدم فرن الميكروويف (الصورة ٧-٤) موجات ميكروية ذات طول موجة يساوي (12.5 cm). الباب الأمامي للفرن مصنوع من الزجاج بداخله شبكة فلزية، ويبلغ عرض الفجوات في الشبكة الفلزية بضعة ملليمترات.

اشرح كيف يتيح لنا هذا التصميم رؤية الطعام داخل الفرن، في حين لا يُتاح للموجات الميكروية الإفلات (الخروج) إلى المطبخ (حيث يمكن أن تؤذينا).

الصورة ٧-٤ يوجد في باب فرن الميكروويف شبكة فلزية تبقي الموجات الميكروية في الداخل وتسمح بخروج الضوء إلى الخارج.

شرح الحيود

الحيود هو تأثير موجي يمكن تفسيره بواسطة مبدأ تراكب الموجات؛ إذ علينا أن نفكر فيما يحدث عندما تصل موجة مستوية إلى فجوة في حاجز (الشكل ٧-٦). فمثلًا في الموجات المائية كل نقطة على سطح الماء داخل الفجوة تتحرك إلى الأعلى وإلى الأسفل، وكل من هذه النقاط المتحركة يمكن اعتبارها مصدرًا نقطيًا لموجات جديدة تنتشر في الحيز خلف الحاجز. نتيجة لذلك يكون لدينا الكثير من هذه الموجات الجديدة، ويمكننا استخدام مبدأ تراكب الموجات لإيجاد التأثير الناتج عنها، وبدون محاولة حساب تأثير عدد لانهائي من هذه الموجات، يمكننا القول إنه في بعض الاتجاهات تجمع الموجات معًا في حين يُلغي بعضها بعضًا في اتجاهات أخرى.



الشكل ٧-٦ تتشارك الموجات من جميع النقاط في الفجوة لتشكيل النمط في الحيز خلفها.

٣-٧ التداخل

ينتج عن إضافة موجات مختلفة الأطوال الموجية والسعات موجات معقدّة، ونعني بالتعقيد هنا أنها ليست جيبية، في حين يمكننا أن نجد بعض التأثيرات المثيرة للاهتمام إذا أخذنا في الاعتبار ما يحدث عندما تتداخل موجتان من النوع نفسه، ولهما طول الموجة نفسه عند نقطة ما. سنستخدم مرة أخرى مبدأ تراكب الموجات لشرح ما نلاحظه.

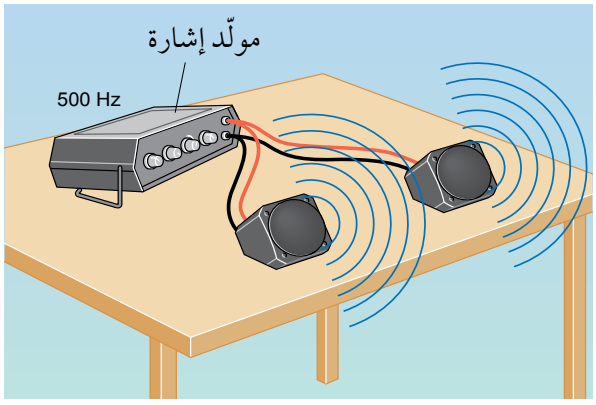
مهارة عملية ٧-٢

ملاحظة التداخل

تداخل الموجات الصوتية

تبيّن التجربة البسيطة المبيّنة في الشكل ٧-٧ ما يحدث عندما تلتقي مجموعتان من الموجات الصوتية، حيث يوصل مكبّرا صوت بمولد الإشارة نفسه، فيصدر كل منهما موجات صوتية لها طول الموجة نفسه، وعند التحرك في الحيز أمام مكبّرَي الصوت، ستسمع تأثير المحصلة.

قد تتوقع أننا سنسمع صوتًا أعلى بمرتَين عن الصوت الصادر من أحد مكبّرَي الصوت، لكن في الواقع يحدث شيء مختلف تمامًا، إذ يكون الصوت في بعض النقاط أعلى من صوت مكبّر الصوت الواحد، ويكون الصوت في نقاط أخرى أكثر انخفاضًا؛ وهكذا يملأ الحيز حول مكبّرَي الصوت بسلسلة من المناطق ذات الأصوات الصاخبة والهادئة، ونلاحظ هنا الظاهرة المعروفة باسم **التداخل Interference** التي تؤدي إلى تشكيل نقاط إلغاء ونقاط تعزيز عندما تمر موجتان مترابطتان إحداهما عبر الأخرى. **الموجتان المترابطتان لهما فرق طور ثابت وهو ما لا يمكن تحقيقه إلّا إذا كانت كلتا الموجتين لهما الطول الموجي نفسه والتردد نفسه وصادرتين عن المصدر نفسه.**

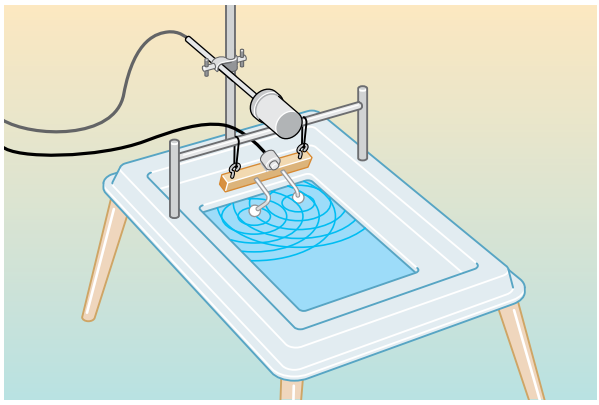


الشكل ٧-٧ تتّحد الموجات الصوتية الصادرة من مكبّرَي الصوت لتعطي نمط تداخل.

(من الأفضل تنفيذ هذه التجربة في الخارج حتى لا تؤثر انعكاسات الأصوات (الصدى) على النتائج).

التداخل في حوض الموجات

انظر إلى الشكل ٧-٨. يجب أن تكون وضعية الكرتَين المهتزّتَين في حوض الموجات بحيث تكاد كل منهما تلامس سطح الماء عندما يهتز الساق، فتعمل كل كرة كمصدر نقطي لنشر الموجات الدائرية؛ وعند التقاء هاتَين المجموعتَين من الموجات نلاحظ نمط التداخل، والطريقة الأخرى لملاحظة التداخل في حوض الموجات هي استخدام الموجات المستوية التي تمر عبر فجوتَين في حاجز، إذ تحيد موجات الماء عند عبورها الفجوتَين ثم تتداخل خلفهما. تبيّن الصورة ٧-٥ نمط التداخل الناتج عن كرتَين مهتزَّتَين في حوض الموجات.



الشكل ٧-٨ يمكن استخدام حوض الموجات لعرض نمط تداخل مجموعتَين من الموجات الدائرية.

الصورة ٧-٥ تنتج الموجات الصادرة من مصدرين نقطيين نمط تداخل.

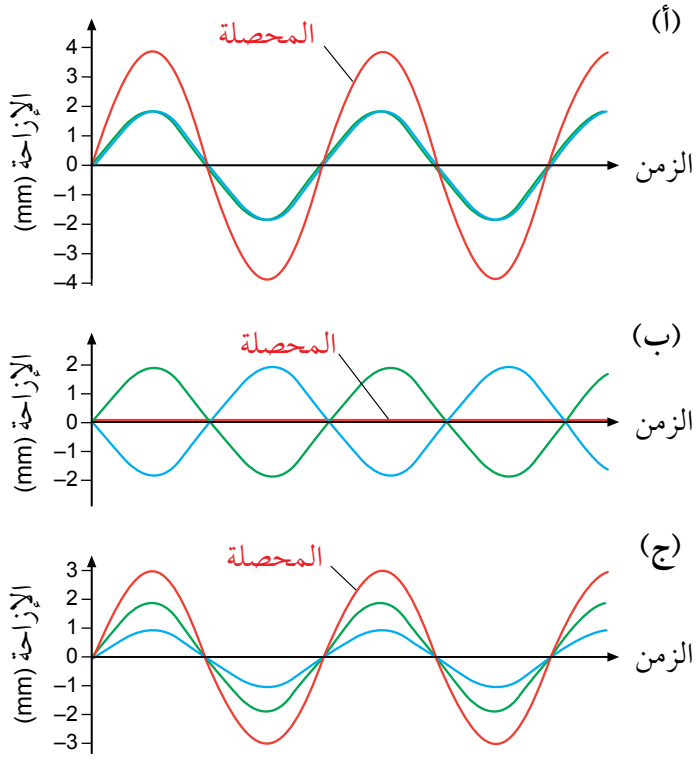
كيف ينشأ التداخل؟

يبيّن الشكل ٧–٩ كيف ينشأ التداخل، فمكبّرا الصوت في الشكل ٧–٧ (المهارة العملية ٧–٢) يصدران موجات لها الطور نفسه؛ لأن كليهما متصل بمولد الإشارة نفسه، فتصل موجات من مكبّرَي الصوت إلى كل نقطة أمام المكبّرَين، حيث تصل في بعض النقاط موجتان في الطور نفسه وبسعة متساوية (الشكل ٧–٩ أ). طبقًا لمبدأ تراكب الموجات فإن سعة الموجة المحصّلة منهما تساوي ضعف سعة أيّ من الموجتَين، حيث نسمع صوتًا أعلى.

في حين يحدث شيء مختلف في نقاط أخرى، حيث تصل الموجتان وهما **متعاكستان في الطور** (فرق الطور 180°) (الشكل ٧–٩ ب)، فيحدث إلغاء للموجة الناتجة وتكون سعة الموجة المحصلة صفرًا، ونتوقع في هذه النقطة أن لا نسمع صوت المكبّرَين، وعندما تكون الموجتان في نقاط أخرى ليست في الطور نفسه ولا في الطور المعاكس، يكون للموجة المحصلة سعة أقل من تلك الموجودة عند أعلى صوت.

عندما تصل موجتان في الطور نفسه معًا إلى نقطة ما فإنهما تجمعان، ونسمي هذا التأثير **التداخل البنّاء Constructive interference**؛ ويُعرف التأثير عندما تلغي إحدى الموجتَين الموجة الأخرى باسم **التداخل الهدّام Destructive interference**.

أما عندما يكون للموجتَين سعتان مختلفتان ولكنهما في الطور نفسه (الشكل ٧–٩ ج)، فإن تداخلًا بنّاءً ينتج موجة تكون سعتها مجموع السعتَين.



الشكل ٧–٩ جمع الموجات الزرقاء والخضراء التي لها السعة نفسها بواسطة مبدأ تراكب الموجات قد يعطي: (أ) تداخلًا بنّاءً (ب) تداخلًا هدامًا، اعتمادًا على فرق الطور بينهما. (ج) يمكن أن تتداخل الموجات ذات السعات المختلفة تداخلًا بناءً أيضًا.

مصطلحات علمية

التداخل Interference: تراكب موجتَين أو أكثر من مصادر مترابطة.

التداخل البنّاء Constructive interference: عندما تتعزّز موجتان لإعطاء سعة أكبر عند نقطة ما في حيّز.

التداخل الهدّام Destructive interference: عندما تلغي موجتان إحداهما الأخرى لإعطاء سعة منخفضة (أو صفرية) عند نقطة ما في حيّز.

سؤال

(٣) لماذا لا ينتج عن مكبّرَي الصوت اللذَين يصدران أصواتًا ذات ترددات مختلفة قليلًا تأثيرات تداخل ثابتة؟ اشرح إجابتك.

كيف يمكن أن نفسر نمط التداخل الذي لوحظ في حوض الموجات؟ انظر إلى الصورة ٧-٥ وقارنها بالشكل ٧-١٠. يبيّن الشكل ٧-١٠ مجموعتَين من الموجات تنطلقان من مصدرَين لتصلا إلى موضع مثل A في الطور نفسه فيَحدث تداخل بنّاء ويُشار إليه **بالتداخل الأقصى**، وتصل مجموعتا الموجات إلى الموضع B في الطور المعاكس فيَحدث تداخل هدّام ويُشار إليه **بالتداخل الأدنى**، فعلى الرغم من وصول الموجات إلى النقطة B يبقى سطح الماء مستويًا تقريبًا. وسواء اتحدت الموجتان لتشكلا تداخلًا بنّاء أم تداخلًا هدّامًا عند نقطة ما فإن ذلك يعتمد على فرق المسار بين الموجتَين الآتيتَين من **مصدرَين مترابطَين Coherent sources**. يُعرّف **فرق المسار Path difference** على أنه المسافة الإضافية التي تقطعها إحدى الموجتَين مقارنة بالموجة الأخرى، ويجب ألّا تخلط ما بينها وبين فرق الطور الذي تعرفت عليه سابقًا في هذا الكتاب.

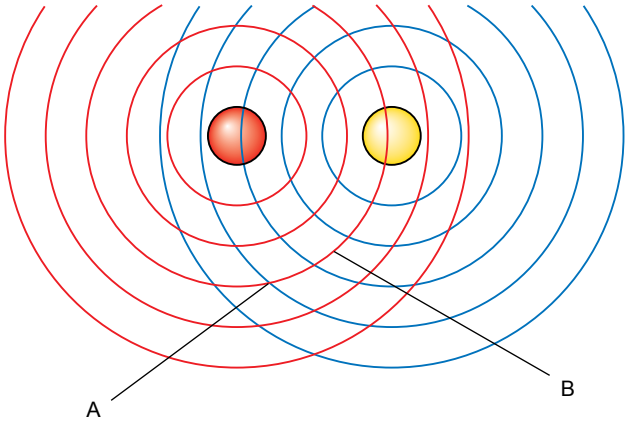
انتقلت الموجات من المصدر الأحمر عند النقطة A في الشكل ٧-١٠ بمقدار ثلاثة أطوال موجية كاملة، وانتقلت الموجات من المصدر الأصفر بمقدار أربعة أطوال موجية كاملة، ففرق المسار بين المجموعتَين هو طول موجي واحد، وفرق المسار الذي يعادل طولًا موجيًا واحدًا يكافئ فرق طور يساوي صفرًا؛ وهذا يعني أن الموجتَين تكونان في الطور نفسه، لذلك تتداخلان تداخلًا بنّاءً.

مصطلحات علمية

المصدران المترابطان

Coherent sources: المصدران اللذان لهما التردد نفسه تمامًا، ولهما فرق طور صفري أو ثابت.

فرق المسار Path difference: المسافة الإضافية التي تقطعها إحدى الموجتَين مقارنة بالموجة الأخرى، وغالبًا ما يُعطى فرق المسار بدلالة طول الموجة λ للموجات.



الشكل ٧-١٠ تعتمد نتيجة التداخل على فرق المسار بين الموجتَين.

فكّر الآن في التداخل الهدّام، فالموجات التي تكون عند نقطة B قد انتقلت من المصدر الأحمر بمقدار ثلاثة أطوال موجية، وتكون قد انتقلت من المصدر الأصفر بمقدار 2.5 من الأطوال الموجية. والفرق بين مسارَي مجموعتَي الموجات هو 0.5 طول موجة ($\frac{\lambda}{2}$) أي ما يكافئ فرق طور 180°، فتتداخل الموجات تداخلًا هدّامًا؛ لأنها متعاكسة في الطور. ينطبق شرطا التداخل البنّاء والتداخل الهدّام على جميع الموجات التي تُظهر تأثير التداخل: موجات الماء، والضوء، والموجات الميكروية، وموجات الراديو، والصوت وغيرها، وهذان الشرطان بشكل عام كالآتي:

يكون فرق المسار بالنسبة إلى **التداخل البنّاء** عددًا صحيحًا كاملًا من الأطوال الموجية:

فرق المسار = 0، λ، 2λ، 3λ، وهكذا

التداخل البنّاء:

فرق المسار = $n\lambda$

يكون فرق المسار بالنسبة إلى **التداخل الهدّام** عددًا فرديًا من أنصاف الأطوال الموجية:

فرق المسار = $\frac{1}{2}\lambda$، $1\frac{1}{2}\lambda$، $2\frac{1}{2}\lambda$، وهكذا

التداخل الهدّام:

$$\text{فرق المسار} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

حيث (n) هو عدد صحيح (أي عدد صحيح بما في ذلك الصفر).

مهارة عملية ٧-٣

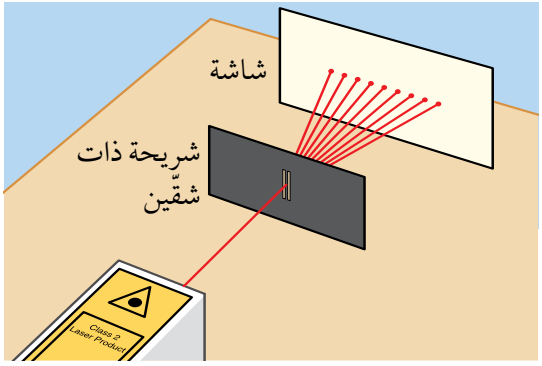
تداخل الأشعة

تداخل الضوء

احتياطات الأمان والسلامة

- إذا نفّذت تجارب باستخدام الليزر، فعليك اتّباع إجراءات الأمان والسلامة الصحيحة، إذ يجب عليك على وجه الخصوص ارتداء نظّارة واقية للعينَين وتجنّب السماح للشعاع بدخول عينيك مباشرة.

إليك إحدى الطرائق لإظهار تأثيرات التداخل الناتج عن الضوء: تجربة بسيطة تتضمن توجيه ضوء ليزر إلى شق مزدوج (الشكل ٧-١١)، إذ يُعدّ الشقان خطَّين واضحَين على شريحة سوداء يفصلهما جزء من المليمتر، وعندما يسقط الضوء على الشاشة تظهر سلسلة متساوية التباعد من البقع الضوئية (انظر الصورة ٧-٦) التي يشار إليها على أنها **تداخلات قصوى** Interference maxima أو «أهداب مضيئة»، وهي مناطق تصل موجات الضوء إليها من الشقَّين في الطور نفسه، بعبارة أخرى هي مناطق التداخل البنّاء، أما المناطق المعتمة بينها فهي نتيجة التداخل الهدّام ويُشار إليها على أنها تداخلات دنيا Interference minima أو «أهداب معتمة».



الشكل ٧-١١ يُظهر ضوء الليزر الذي يمر عبر الشقَّين تأثيرات التداخل في الحيّز خلف الشقَّين.

هذه الأهداب المضيئة والمعتمة تكافئ المناطق الصاخبة والهادئة بالنسبة إلى الأصوات التي لاحظتها في المهارة العملية ٧-٢، إذ تتوافق الأهداب المضيئة مع الصوت العالي والأهداب المعتمة مع الصوت الهادئ أو انعدام الصوت.

يمكنك التحقّق من أن الضوء يصل بالفعل إلى الشاشة من كلا الشقَّين على النحو الآتي: ضَع علامة على نقطة على الشاشة يوجد فيها هدب معتم، ثم غطِّ أحد الشقَّين بعناية بحيث يمر ضوء الليزر من خلال شق واحد فقط، وبحيث ترى أن نمط أهداب التداخل يختفي، وبدلًا من ذلك يظهر نطاق عريض من الضوء عبر الشاشة، هذا النطاق العريض من الضوء هو نمط الحيود الناتج عن شق واحد، والنقطة التي كانت معتمة هي الآن مضيئة، غطِّ الشق الثاني بدلًا من الأول؛ لترى التأثير نفسه. تبيّن لك التجربة الآن أن الضوء يصل إلى الشاشة من كلا الشقَّين، ولكن في بعض النقاط (الأهداب المعتمة) يلغي شعاعا الضوء أحدهما الآخر.

يمكنك تحقيق نتائج مماثلة مع ضوء ساطع بدلًا من الليزر، ولكن الليزر مناسب أكثر؛ لأن ضوءه يتركز في شعاع ضيق وأكثر شدة، وتسمى هذه التجربة الشهيرة تجربة يونج للشق المزدوج (Young double-slit experiment)، مع العلم أن توماس يونج (Thomas Young) لم يتوفر له ضوء ليزر عندما عرض تجربته لأول مرة في عام 1801 م (ستناقش بمزيد من التفصيل لاحقًا في هذه الوحدة).

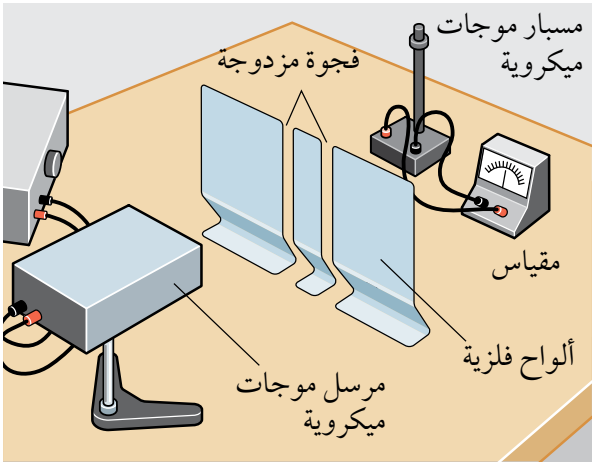
مصطلحات علمية

التداخلات القصوى Interference maxima: المناطق التي تصل إليها موجات الضوء من شقَّين في الطور نفسه، بعبارة أخرى هي مناطق التداخل البنّاء.

تابع

تداخل الموجات الميكروية

باستخدام جهاز توليد موجات ميكروية طولها الموجي (2.8 cm) (الشكل ٧-١٢)، يمكنك ملاحظة نمط التداخل، حيث يوجه جهاز إرسال الموجات الميكروية نحو فجوة مزدوجة في حاجز فلزي، فتحيد عبر الفجوتَين وتنتشر في المنطقة الواقعة خلفها، حيث يمكن الكشف عنها باستخدام مسبار الموجات الميكروية (جهاز الاستقبال)، ويمكن كشف المناطق ذات الشدة العالية (التداخل البنّاء)، والشدة المنخفضة (التداخل الهدّام) للموجات خلف الفجوتين، بواسطة تحريك المسبار، وقد يوصل المسبار بجهاز قياس، أو بمضخم ومكبّر للصوت لإعطاء نتائج مسموعة.



الشكل ٧-١٢ تُظهر الموجات الميكروية تأثيرات التداخل أيضًا.

سؤال

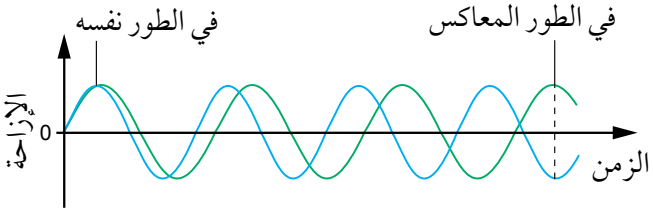
(٤) انظر إلى أدوات التجربة المبيّنة في الشكل ٧-١٢، وافترض أن مسبار الموجات الميكروية قد وضع عند نقطة منخفضة الشدة في نمط التداخل، اقترح ما يحدث إذا أغلقت إحدى الفجوات في الحاجز.

الترابط

نحن محاطون بالعديد من أنواع الموجات، مثل الموجات الضوئية والأشعة تحت الحمراء وموجات الراديو والموجات الصوتية وغيرها، وهناك موجات قادمة نحونا من كل الاتجاهات، لماذا إذًا لا نلاحظ أنماط التداخل في كل وقت؟ ولماذا نحتاج إلى معدّات خاصة في المختبر لملاحظة هذا التأثير؟

يمكننا في الواقع أن نرى حدوث تداخل للضوء في الحياة اليومية، فعلى سبيل المثال ربما لاحظت هالات من الضوء حول مصابيح الشوارع أو القمر في الليالي الضبابية، وربما لاحظت شرائط مضيئة وأخرى معتمة من الضوء إذا نظرت من خلال قطعة من القماش إلى مصدر ساطع للضوء، وتُعدّ كل هذه أمثلة لتأثيرات التداخل.

نحتاج عادةً إلى ظروف مُعدّة بشكل خاص لإنتاج تأثيرات التداخل التي يمكننا قياسها، فكّر في العرض التوضيحي باستخدام مكبّرَي الصوت، فإذا وُصّل المكبران بمولّدَي إشارة مختلفَي التردد قليلًا، فقد تبدأ الموجات الصوتية في الطور نفسه، لكنها سرعان ما ستخرج من هذا الطور (الشكل ٧-١٣) وسنسمع صوتًا عاليًا، ثم خافتًا، ثم عاليًا مرة أخرى؛ وسيستمر نمط التداخل في الانزياح في جميع أنحاء الغرفة، ولن يكون هناك نمط تداخل ثابت للمناطق الصاخبة والهادئة.



الشكل ٧-١٣ تتحرك الموجتان اللتان لهما ترددان مختلفان قليلًا (وبالتالي طولان موجيّان مختلفان) في الطور نفسه ومختلفة في الطور.

يمكننا التأكد من أن الموجات الصوتية التي ينتجها مكبرا الصوت ثابتة في الطور نفسه من خلال توصيل مكبّرَي

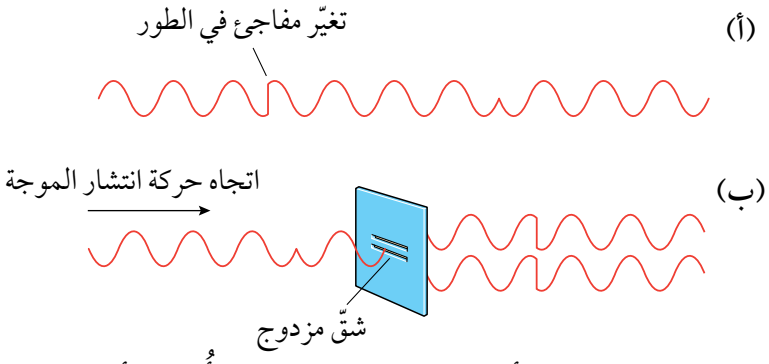
الصوت بمولد الإشارة **نفسه**، ويمكن القول أنهما يعملان **كمصدرَين مترابطَين** للموجات الصوتية، بحيث تكون هذه الموجات من مكبّرَي الصوت **مترابطة Coherent**، إذ تُصدر المصادر المترابطة موجات لها **فرق طور ثابت**. لاحظ أن الموجتَين يمكن أن يكون لهما فرق طور ثابت فقط إذا كان ترددهما هو نفسه وبقي ثابتًا.

مصطلحات علمية

المترابط Coherent: مصطلح يستخدم لوصف موجتَين صادرتَين من مصدرَين لهما فرق طور ثابت. يشار إلى المصادر التي تصدر مثل هذه الموجات على أنها مصادر مترابطة.

الآن فكر في تجربة الليزر في المهارة العملية ٧-٣: هل يمكننا استخدم جهازَي ليزر لينتجا التردد نفسه بالضبط وبالتالي الطول الموجي نفسه للضوء؟ يمثل الشكل ٧-١٤ (أ) ضوء ليزر ويمكننا التفكير فيه على أنه يتكوّن من عدة دفعات منفصلة من الضوء، ولا نستطيع تأكيد بقاء هذه الدفعات من مصدرَي الليزر في الطور نفسه دائمًا.

يمكن التغلّب على هذه المشكلة باستخدام ليزر واحد ويُجزّأ ضوؤُه باستخدام شقَّين (الشكل ٧-١٤ ب)، ليعمل كمصدرَين مترابطَين للضوء لهما الطور نفسه (أو أنّ هناك فرق طور ثابت بينهما).



الشكل ٧-١٤ يجب أن تكون الموجات مترابطة إذا أُريد لها أن تنتج نمط تداخل واضح.

إذا لم يكن المصدران مترابطَين، فإن نمط التداخل سيتغير باستمرار، وسيكون سريعًا جدًا لدرجة أنّه قد تعجز أعيننا عن ملاحظته، وسنرى ببساطة شريطًا منتظمًا من الضوء، بدون أن يكون هناك أي مناطق مضيئة ومعتمة محدّدة، ومن هذا المنطلق يجب أن تكون قادرًا على فهم أنه **من أجل الحصول على نمط للتداخل، فإننا نحتاج إلى مصدرَين مترابطَين للموجات.**

سؤال

٥ ارسم رسومًا تخطيطية للإزاحة مع الزمن لتوضيح ما يأتي:

أ. موجتان لهما السعة نفسها وتكونان في الطور نفسه.

ب. موجتان لهما السعة نفسها ويكون فرق الطور بينهما (90°).

ج. موجتان لهما الطور نفسه في البداية ولكنّ لهما طولَين موجيَّين مختلفَين قليلًا.

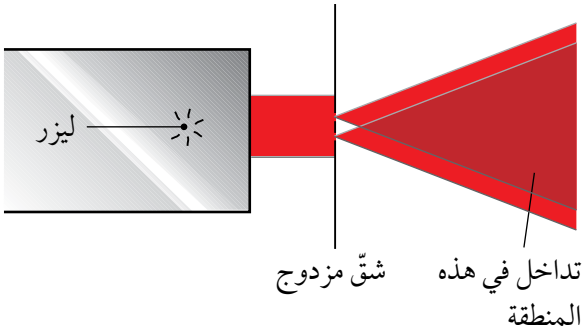
٧-٤ تجربة الشق المزدوج ليونج

الآن سنلقي نظرة على التجربة المشهورة التي قام بها توماس يونج (Thomas Young) في عام 1801 م، حيث استخدم هذه التجربة لإظهار الطبيعة الموجية للضوء، وفيها تسقط حزمة من الضوء على زوج من الشقوق المتوازية الموضوعة بزاوية قائمة على الحزمة، فيحيد الضوء وينتشر من كل شق في الحيّز خلف الشقَّين، ثم يتداخل الضوء

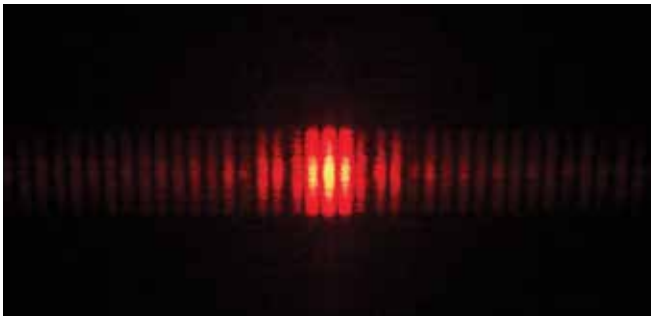
الخارج من الشقَّين على شاشة موضوعة لهذا الغرض؛ وهكذا يتكوّن نمط من التداخلات على الشاشة تظهر على شكل شرائط مضيئة وأخرى معتمة تسمى «أهداب».

شرح التجربة

نحتاج إلى مجموعتَين من الموجات لملاحظة التداخل، إذ يجب أن يكون مصدرا الموجات مترابطَين، أي يجب أن يبقى فرق الطور بين الموجتَين الصادرتَين ثابتًا، وهذا يعني أنه يجب أن يكون للموجتَين طول الموجة نفسه أيضًا، ويتم تحقيق ذلك بسهولة بواسطة تمرير شعاع واحد من ضوء الليزر عبر الشقَّين، فالليزر ينتج ضوءًا مترابطًا عالي الشدة، وعندما يمر ضوء الليزر عبر الشقَّين، فإنه يحيد بحيث ينتشر في الحيّز خلف الشقَّين (الشكل ٧-١٥). وبالتالي يكون لدينا مجموعتان متداخلتان من الموجات، حيث يظهر نمط الأهداب على الشاشة ليبيّن لنا نتيجة تداخلهما (الصورة ٧-٦).



الشكل ٧-١٥ يحدث التداخل عندما تلتقي الحزمتان الحائدتان عن الشقَّين.

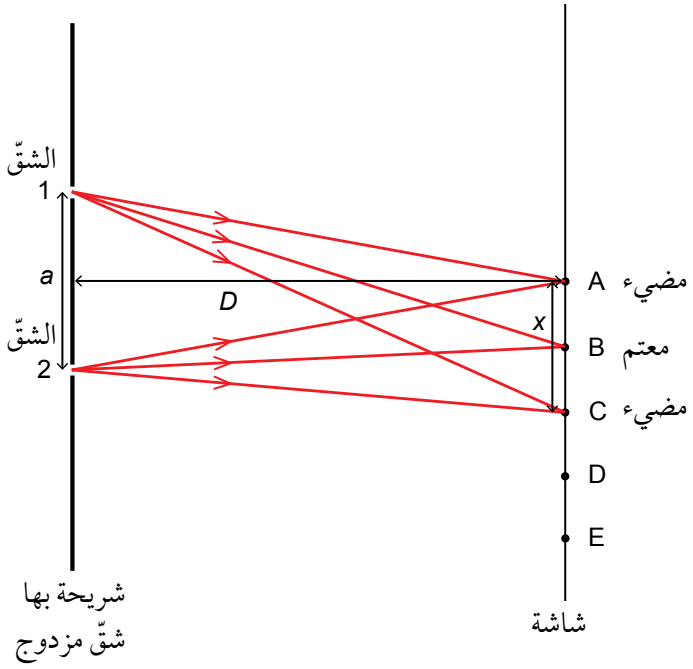


الصورة ٧-٦ أهداب التداخل التي تم الحصول عليها باستخدام الليزر والشق المزدوج.

كيف ينشأ هذا النمط؟ سننظر في ثلاث نقاط على الشاشة (الشكل ٧-١٦) ونشرح ما نتوقع ملاحظته في كل منها.

النقطة A

هذه النقطة تقع مباشرة مقابل منتصف المسافة بين الشقَّين، حيث يصل شعاعان من الضوء إلى A أحدهما من الشق 1 والآخر من الشق 2، وتقع النقطة A على مسافة متساوية من الشقَّين، وهكذا يقطع شعاعا الضوء المسافةَ نفسها، وفرق المسار بين شعاعَي الضوء يساوي صفرًا، وإذا افترضنا أنهما كانا في الطور نفسه عندما غادرا الشقَّين، فعندئذ سيكونان في الطور نفسه عند وصولهما إلى A وبذلك فإنهما سيتداخلان تداخلًا بنّاءً، وسنلاحظ هدبًا مضيئًا في A يُعرف بالهدب المضيء المركزي.



الشكل ٧-١٦ يعتمد نوع التداخل (ما إذا كان يمكن أن يُرى على الشاشة هدب مضيء أو معتم) على فرق المسار بين شعاعَي الضوء اللذَين يصلان إلى الشاشة من الشق المزدوج.

النقطة B

تقع النقطة B إلى جانب النقطة A، وهي نقطة منتصف الهدب المعتم الأول، ويصل شعاعان من الضوء مرة أخرى إلى B (شعاع واحد من كل شق)؛ يجب أن يقطع الضوء من الشق 1 مسافة أطول قليلًا من مسار الضوء القادم من الشق 2، وبالتالي لا يقطع الشعاعان المسافة نفسها. ولأن النقطة B تقع في منتصف الهدب المعتم الأول، لذلك فالشعاعان يجب أن يكونا متعاكسين في الطور (فرق الطور بينهما 180°)، ويجب أن يكون فرق المسار بين شعاعَي الضوء نصف طول موجة ($\frac{\lambda}{2}$)، وبالتالي يتداخل الشعاعان تداخلًا هدّامًا.

النقطة C

هذه النقطة هي نقطة المنتصف للهدب المضيء التالي، حيث أنّ المسافة AB = BC، وهذه المرة ينتقل الضوء من الشق 1 مسافة أطول قليلًا من مسار الضوء القادم من الشق 2، أي مسافة إضافية مساوية لطول موجة كامل (λ)، فيكون فرق المسار بين شعاعَي الضوء هو طول موجة كامل، ويكون الشعاعان في الطور نفسه على الشاشة، فهما يتداخلان تداخلًا بنّاءً، ونرى هدبًا مضيئًا.

وبهذه الطريقة يمكن تفسير نمط التداخل الكامل (الصورة ٧–٦).

سؤال

٦ بالنسبة إلى النقطتين D و E على الشاشة في الشكل ٧–١٦، حيث BC = CD = DE، اذكر ما تتوقع أن تلاحظه عند D و E واشرحه.

تحديد طول الموجة λ

يمكن استخدام تجربة الشق المزدوج لتحديد طول الموجة (λ) لضوء أحادي اللون (أحادي اللون يدل كما يوضح اسمه على «لون واحد» والذي يعني أن الضوء لديه طول موجة واحد بدلًا من طيف لأطوال موجات)، إذ يجب قياس الكمّيات الثلاث الآتية:

- **المسافة الفاصلة بين الشقَّين (*a*)**: هي المسافة بين مركزَي الشقَّين، وتمثل المسافة بين مركزَي الشقَّين 1 و 2 في الشكل ٧–١٦.
- **المسافة الفاصلة بين الأهداب (*x*)**: هي المسافة بين مركزَي هدبَين مضيئَين (أو معتمَين) متجاورَين، وتمثل المسافة AC في الشكل ٧–١٦.
- **المسافة بين الشق والشاشة (*D*)**: هي المسافة من نقطة منتصف الشقَّين إلى الهدب المضيء المركزي على الشاشة.

يمكن إيجاد طول الموجة (λ) للضوء بمجرد تحديد هذه الكميّات الثلاث باستخدام المعادلة:

معادلة الشق المزدوج:

$$\lambda = \frac{ax}{D}$$

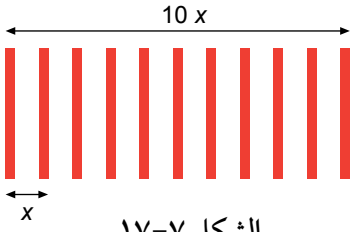
حيث (λ): طول الموجة للضوء أحادي اللون الساقط عموديًا على الشق المزدوج، و (a): المسافة الفاصلة بين مركزَي الشقَّين، و (x): المسافة الفاصلة بين مركزَي هدبَين مضيئَين (أو معتمَين متجاورَين)، و (D): المسافة بين الشقَّين والشاشة.

مثال

١. في تجربة الشق المزدوج باستخدام ضوء من ليزر هيليوم-نيون حصل طالب على النتائج الآتية (الشكل ٧-١٧):

عرض 10 أهداب:

$10\,x = 1.5$ cm



الشكل ٧-١٧

المسافة الفاصلة بين الشقَّين: $a = 1.0$ mm

المسافة بين الشقَّين والشاشة: $D = 2.40$ m

احسب طول الموجة للضوء بوحدة nm

الخطوة ١: نستخرج المسافة بين هدبَين متجاورَين (x) بوحدة المتر (m).

المسافة بين هدبَين متجاورَين:

$$x = \frac{1.5 \times 10^{-2}}{10} = 1.5 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

الخطوة ٢: عوّض قيم (a) و (x) و (D) (كلها بالأمتار) في المعادلة ثم احسب طول الموجة (λ):

$$\lambda = \frac{ax}{D}$$

$$= \frac{1.0 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^{-3}}{2.40}$$

$$= 6.25 \times 10^{-7}\ \text{m} \approx 6.3 \times 10^{-7}\ \text{m}$$

(تذكر أن: $1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m}$)

وبالتالي:

$\lambda = 630$ nm

سؤال

(٧) حرك الطالب في المثال ١ الشاشة مسافة (4.8 m) عن الشقَّين. حدّد المسافة الفاصلة بين هدبَين متجاورَين (x) في هذه الحالة.

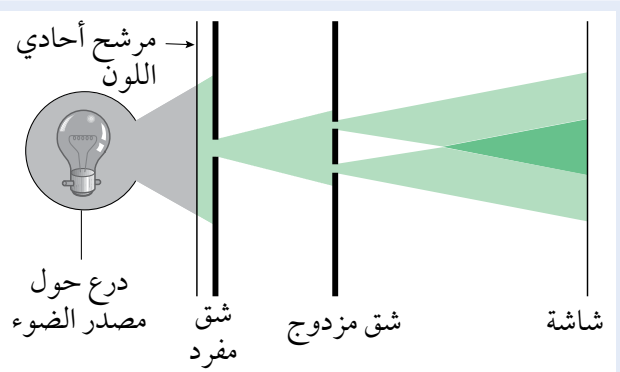
مهارة عملية ٧-٤

استخدام شقَّي يونج لتحديد λ

يمكن استخدام تجربة شقَّي يونج لتحديد طول الموجة λ للضوء أحادي اللون، وهنا سنلقي نظرة على عدد من الإجراءات العملية للتجربة والنظر في إمكانية تقليل النسبة المئوية لعدم اليقين في قيمة λ.

عُرضت إحدى الطرائق لتنفيذ تجربة الشق المزدوج في الشكل ٧-١٨، بحيث يُستخدم هنا مصدر ضوء أبيض بدلًا من الليزر، ويوضع درع حول مصدر الضوء لتخفيف مستوى الضوء المحيط في الغرفة، ويستخدم مرشح أحادي اللون يسمح بمرور موجات ذات طول موجي معيّن واحد فقط من الضوء، إذ يحيد الضوء من الشق المفرد، ليصل بعد حيوده في الطور نفسه إلى الشق المزدوج، ما يؤكد أن كلًا من جزأَي الشق المزدوج يتصرفان كمصدرَين مترابطَين للضوء، ويوضع الشق المزدوج على بُعد سنتيمتر واحد أو اثنين من الشق المفرد، فتلاحظ الأهداب على الشاشة الموضوعة على مسافة متر أو ما يقارب من ذلك. يجب تنفيذ التجربة في غرفة معتمة، حيث أنّ كثافة الأهداب المضيئة منخفضة (رؤيتها صعبة).

تابع



الشكل ٧-١٨ تجربة الشق المزدوج لرؤية الأهداب باستخدام مصدر ضوء أبيض.

هناك ثلاثة عوامل مهمة تُراعى في إعداد التجربة:

- جميع الشقوق يجب أن تكون بعرض جزء من المليمتر؛ لأن طول الموجة للضوء أقل من 1 ميكرومتر (10^{-6} m)، وهذا يُسبّب حيودًا ضئيلًا في الحيّز الواقع بعد الشق، وإذا كانت الشقوق أضيق، فإن شدة الضوء ستكون منخفضة جدًا ولا يمكن رؤية الأهداب.
- البُعد بين الشقَّين المزدوجَين يقارب المليمتر، فلو كانا متباعدَين كثيرًا، فإن الأهداب ستكون متقاربة جدًا، بحيث لا يمكن تمييزها.
- بُعد الشاشة عن الشقَّين يقارب المتر، بحيث تكون الأهداب الناتجة منفصلة بوضوح دون أن تكون باهتة جدًا.

قياس a و x و D

قياس المسافة الفاصلة بين الشقَّين a: يُعدّ المجهر المتحرك مناسبًا لقياس a؛ لأنه من الصعب الحكم على موضع مركز الشق؛ فإذا كان الشقان لهما العرض نفسه، فالمسافة الفاصلة بين حافتَيهما اليسرى هي المسافة الفاصلة نفسها بين مركزَيها.

قياس عرض الهدب x: من الأفضل قياس عرض عدة أهداب (على سبيل المثال عشرة) ثم حساب متوسط المسافة الفاصلة بعد ذلك، وذلك باستخدام مسطرة (30 cm) أو مجهر متحرّك.

قياس المسافة بين الشقَّين والشاشة D: يمكن أن تقاس باستخدام مسطرة مترية أو شريط قياس.

تقليل النسبة المئوية لعدم اليقين

لماذا نستخدم الليزر بدلًا من الضوء الأبيض؟ يكون شعاع الضوء من الليزر أكثر تركيزًا، وعندئذٍ لا يكون الشق المفرد الابتدائي ضروريًا، فشدة الحزمة الضوئية الأكبر تعني أن الشاشة يمكن أن تكون أبعد عن الشقَّين، بحيث تكون الأهداب متباعدة أكثر، وهذا يقلل النسبة المئوية لعدم اليقين في قياسات x و D وبالتالي، فإن النسبة المئوية الكلية لعدم اليقين في القيمة المحسوبة لطول الموجة λ ستكون أصغر.

وهناك فائدة أخرى لاستخدام الليزر، فالضوء الظاهر من الليزر يكون أحادي اللون، أي يكون له طول موجي واحد، وهذا يجعل الأهداب واضحة جدًا، وتكون كذلك موجودة بأعداد كبيرة على الشاشة، بينما عند استخدام الضوء الأبيض توجد مجموعة من الأطوال الموجية فتشكل أهدابًا في نقاط مختلفة على الشاشة، ما يؤدي إلى تشويه الأهداب فلا تكون واضحة.

كما ينتج عن استخدام الضوء الأبيض بدون مرشح، هدب مركزي أبيض (لأن كل الأطوال الموجية تكون في الطور نفسه هنا)، لكن الأهداب الأخرى تُظهر تأثيرات ملوّنة؛ حيث تتداخل الأطوال الموجية المختلفة تداخلًا بنّاءً في نقاط مختلفة، إضافة إلى ذلك فإن هناك عددًا قليلًا فقط من الأهداب المرئية في نمط التداخل.

ملخّص

خلاصة القول أنه لملاحظة أهداب التداخل يجب أن تراعي الشروط الآتية:

- أن يكون المصدران مترابطين.
- أن يكون عرض الشق مناسبًا لكي تتداخل الأشعة بشكل كافٍ، ويجب أن يكون أحدهما على مسافة مناسبة من الآخر.
- أن تكون المسافة بين المصدرَين والشاشة مناسبة.

أسئلة

(٨) استخدم المعادلة $\lambda = \frac{ax}{D}$ لشرح الملاحظات الآتية:

أ. تكون الأهداب متباعدة أكثر عند تقريب الشقَّين أحدهما من الآخر.

ب. تكون أهداب التداخل للضوء الأزرق أقرب إلى بعضها من تلك التي للضوء الأحمر.

ج. في تجربة لقياس طول الموجة لضوء ما، يُستحسَن أن تكون الشاشة بعيدة عن الشقَّين قدر الإمكان.

(٩) يستخدم الضوء الأصفر من مصباح بخار الصوديوم في تجربة الشق المزدوج، وهذا الضوء الأصفر طول موجته (589 nm). والمسافة الفاصلة بين الشقَّين هي (0.20 mm)، والشاشة موضوعة على بُعد (1.20 m) من الشقَّين. احسب المسافة الفاصلة بين هدبَين مضيئَين متجاورَين تَشكّلا على الشاشة.

(١٠) في تجربة الشق المزدوج، توضع المرشحات أمام مصدر ضوء أبيض لاستقصاء تأثير تغيير طول الموجة للضوء، إذ يستخدم في البداية مرشح أحمر (λ = 600 nm) فتكون المسافة الفاصلة بين الأهداب (2.4 mm)، بعد ذلك تم استخدام مرشح أزرق (λ = 450 nm) بدلًا من الأحمر. احسب المسافة الفاصلة بين الأهداب عند استخدام المرشح الأزرق.

٧-٥ محزوز الحيود

هناك أداة مشابهة للشريحة المستخدمة في تجربة الشق المزدوج ولكن بشقوق (خطوط) كثيرة، تُعرف هذه الأداة بمحزوز الحيود، ومن أنواعه:

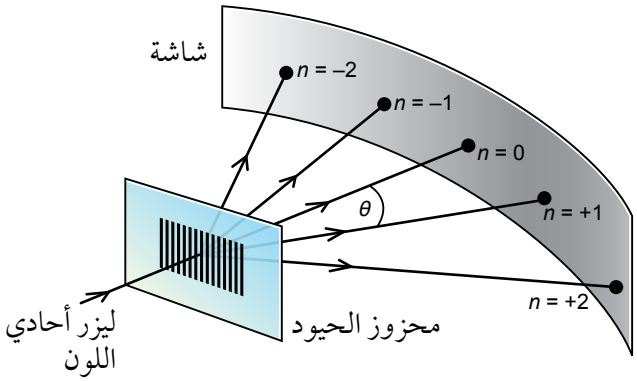
- محزوز حيود **النفاذ** يتكوّن من عدد كبير من الخطوط المتباعدة بشكل متساوٍ على شريحة زجاجية أو بلاستيكية، وكل خط منها قادر على إحداث حيود للضوء الساقط، وقد يكون هناك ما يصل إلى 10000 خط لكل سنتيمتر، فعندما يسلط الضوء من خلال هذا المحزوز، فإنه يمكن رؤية نمط أهداب التداخل.
- محزوز حيود **الانعكاس** يتكوّن من خطوط عُملت على سطح عاكس، بحيث ينعكس الضوء ويحيد بواسطة المحزوز، فالسطح اللامع للقرص المضغوط (القرص المدمج CD)، أو قرص الـ DVD (القرص الرقمي متعدّد الاستخدامات)، هو مثال عملي على محزوز حيود الانعكاس.

أمسك قرصًا مضغوطًا (مدمجًا) في يدك حتى ترى انعكاس الضوء من المصباح، وستلاحظ شرائط ملونة (الصورة ٧-٧)، إذ يحتوي القرص المضغوط على آلاف الخطوط من الأخاديد المجهرية المتباعدة بشكل متساوٍ على سطحه، وهذه الخطوط تحمل معلومات رقمية، والحيود الناتج عن هذه الخطوط هو الذي يُنتج شرائط الضوء الملونة من سطح القرص المضغوط.

الصورة ٧-٧ يعمل القرص المضغوط كمحزوز حيود الانعكاس. إذ ينعكس الضوء الأبيض ويحيد عن سطحه، فينتج عنه منظر للألوان الطيفية.

ملاحظة الحيود باستخدام محزوز النفاذ

يسقط ضوء ليزر أحادي اللون عموديًا على محزوز حيود النفاذ في الشكل ٧-١٩، فتتشكّل أهداب تداخل في الحيز خلفه؛ ويمكن ملاحظة هذه الأهداب على الشاشة، كما هي الحال مع الشق المزدوج، ومع ذلك فإنه من المعتاد في محزوز الحيود قياس الزاوية θ التي تتشكّل عندها الأهداب، بدلًا من قياس المسافة الفاصلة بينها، وتكون الأهداب متباعدة بالتساوي في الشقوق المزدوجة، وتكون الزوايا صغيرة جدًا، في حين تكون الزوايا أكبر بكثير في محزوز الحيود، ولا تكون المسافة الفاصلة بين الأهداب متباعدة بشكل متساوٍ.



الشكل ٧-١٩ يمر شعاع ليزر عبر محزوز الحيود فينتج نمطًا متناظرًا من التداخلات القصوى على الشاشة.

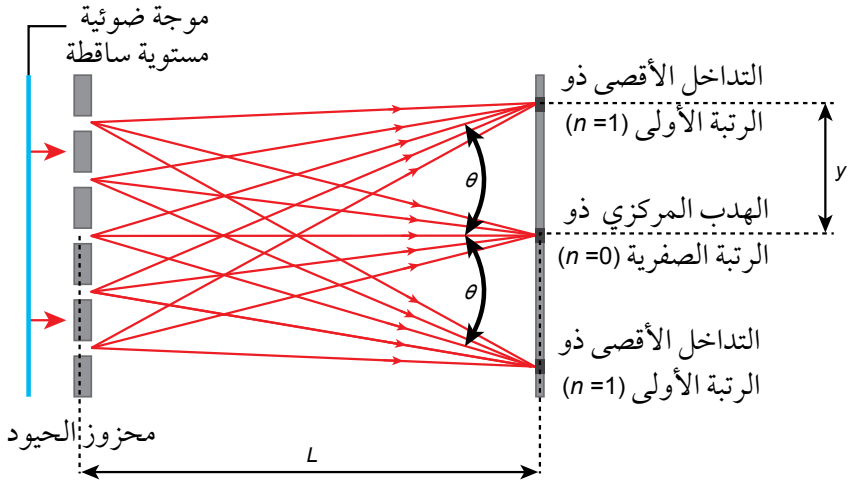
يشار إلى الأهداب المضيئة أيضًا باسم التداخلات القصوى، **ويسمى الهدب المركزي بالتداخل الأقصى ذي الرتبة الصفرية**، كما يسمى الهدب التالي بالتداخل الأقصى ذي الرتبة الأولى وهكذا، ويكون النمط متناظرًا على جانبَي الهدب المركزي، لذلك يوجد تداخلان أقصيان من الرتبة الأولى وتداخلان أقصيان من الرتبة الثانية وهكذا.

شرح التجربة

المبدأ هو نفسه كما هو في تجربة الشق المزدوج، ولكن هنا يمر الضوء من خلال العديد من الشقوق، ويحيد في أثناء مروره عبر كل شق إلى داخل الحيّز خلف الشقوق، لذلك لدينا الآن الكثير من تداخلات الأشعة الضوئية، وهي تتداخل مع بعضها.

هناك هدب مضيء يمثل التداخل الأقصى ذا الرتبة الصفرية ويحدث هذا لأن فرق المسار بين الأشعة التي تنفذ من جميع الشقوق يساوي الصفر فتصل الأشعة بالطور نفسه، وبالتالي فإن التداخل يكون تداخلًا بنّاءً (الشكل ٧-٢٠).

يتشكّل التداخل الأقصى ذو الرتبة الأولى باتجاه معيّن على النحو الآتي: يحدث الحيود من جميع الشقوق، فتنفذ الأشعة الضوئية من جميع الشقوق لتشكّل هدبًا مضيئًا (يجب أن تكون جميع الأشعة في الطور نفسه) فينتقل الشعاع من الشق الأعلى باتجاه التداخل الأقصى ذي الرتبة الأولى بأقصر مسافة (الشكل ٧-٢٠)، وينتقل الشعاع من الشق الأدنى مباشرة من الشق الأول مسافة إضافية تساوي طول موجة كامل وهو كذلك في الطور نفسه مع الشعاع الأول. فرق المسار بين هذين الشعاعَين يساوي طول موجة واحد (λ) بينما ينتقل الشعاع من الشق التالي في الأسفل طولَين موجيَّين إضافيَّين مقارنة مع الشعاع من الشق الأعلى ويكون بالطور نفسه مع الشعاعَين الأول والثاني، وفي الواقع تكون الأشعة من جميع الشقوق في الطور نفسه في هذا الاتجاه، فينتج هدب مضيء.



الشكل ٧-٢٠ نمط التداخل الناتج عن محزوز الحيود.

سؤال

(١١) اشرح كيف ينشأ التداخل الأقصى ذو الرتبة الثانية بدلالة فرق المسار.

حساب طول الموجة λ بمحزوز الحيود

يمكننا حساب طول الموجة (λ) للضوء أحادي اللون، وذلك بقياس الزوايا التي تحدث عندها التداخلات القصوى. ويرتبط طول الموجة (λ) مع الزاوية (θ) بالمعادلة:

$$d \sin\theta = n\lambda$$

حيث (d): المسافة الفاصلة بين خطَّين متجاورَين للمحزوز، و (θ): زاوية التداخل الأقصى ذي الرتبة (n)، و (λ) طول الموجة للضوء أحادي اللون الذي يسقط عموديًا على محزوز الحيود، وتُعرف (n) باسم **رتبة** التداخل الأقصى، حيث يكون لـ (n) قيم عددية صحيحة فقط 0، 1، 2، 3 وهكذا، وتُعرف المسافة (d) باسم تباعد المحزوز.

يبيّن المثال ٢ كيف يمكنك حساب (λ).

مثال

٢. يسقط ضوء أحادي اللون عموديًا على محزوز حيود به 300 خط لكل مليمتر ($300 \text{ lines mm}^{-1}$)، قيست الزاوية θ بين التداخلَين الأقصيَين ذوَي الرتبة الصفرية والأولى فكانت (10.0°). احسب طول الموجة للضوء الساقط.

الخطوة ١: احسب المسافة بين خطَّين متجاورَين (تباعد المحزوز) (d). نظرًا إلى وجود 300 خط لكل مليمتر، فيجب أن تكون (d):

$$d = \frac{1 \text{ mm}}{300} = 3.33 \times 10^{-3} \text{ mm}$$
$$= 3.33 \times 10^{-6} \text{ m}$$

الخطوة ٢: بإعادة ترتيب المعادلة $d \sin\theta = n\lambda$ وتعويض القيم فيها:

$\theta = 10.0°$

$n = 1$ (التداخل الأقصى ذو الرتبة الأولى)

$$\lambda = \frac{d \sin\theta}{n}$$
$$= \frac{3.33 \times 10^{-6} \times \sin 10.0°}{1} = 5.79 \times 10^{-7} \text{ m}$$
$$(1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m})$$

طول الموجة:

$\lambda = 579 \text{ nm} \approx 580 \text{ nm}$

أسئلة

(١٢) **أ.** استخدم طول الموجة (λ = 580 nm) في الحالة الموصوفة في المثال ٢، واحسب الزاوية θ للتداخل الأقصى ذي الرتبة الثانية.

ب. كرّر حساب θ للرتب n = 3 و n = 4 إلخ، ثم حدّد عدد التداخلات القصوى التي يمكن رؤيتها. اشرح إجابتك.

(١٣) باستخدام المعادلة $d \sin\theta = n\lambda$، اذكر كيف يتغيّر نمط التداخل واشرحه عندما:

أ. يزداد طول الموجة للضوء الساقط على محزوز الحيود نفسه.

ب. يستبدل محزوز الحيود بآخر يحتوي على عدد أكبر من الخطوط لكل cm للضوء الساقط نفسه.

(١٤) يحاول عزّام أن يجري قياسًا مضبوطًا لطول الموجة للضوء الأخضر الصادر من مصباح بخار الزئبق. طول الموجة (λ) لهذا الضوء يساوي (546 nm)، وذلك باستخدام شق مزدوج المسافة الفاصلة بين شقَّيه (0.50 mm)، وقد تمكّن عزّام من أن يرى 10 أهداب مضيئة واضحة على شاشة على مسافة (0.80 m) من الشقَّين، كما تمكّن من قياس عرضها الكلي باستخدام مسطرة إلى أقرب (1 mm).

ثم أجرى عزّام تجربة بديلة باستخدام محزوز حيود له 3000 خط لكل سنتيمتر ($3000 \text{ lines cm}^{-1}$)، وقاس الزاوية بين التداخلين الأقصيين ذوَي الرتبة الصفرية والثانية إلى أقرب (1°).

أ. احسب عرض الأهداب العشرة التي تمكن عزّام من قياسها في التجربة الأولى.

ب. احسب زاوية التداخل الأقصى ذي الرتبة الثانية التي قد يقيسها في التجربة الثانية.

ج. بناءً على إجاباتك عن الجزئيتين «أ» و «ب»، اقترح أي تجربة تعتقد أنها ستعطيه قيمة أكثر ضبطًا لـ (λ).

حيود الضوء الأبيض

يمكن استخدام محزوز الحيود لفصل الضوء الأبيض إلى الألوان المكوّنة له، ويُسمى هذا الفصل للضوء **التشتت Dispersion**، كما هو مبيّن في الشكل ٧-٢١، حيث تسلّط حزمة من الضوء الأبيض على المحزوز، فيلاحظ التداخل الأقصى ذو الرتبة الصفرية وله لون أبيض عند (θ = 0°)؛ لأن موجات جميع الألوان تكون في الطور نفسه في هذا الاتجاه.

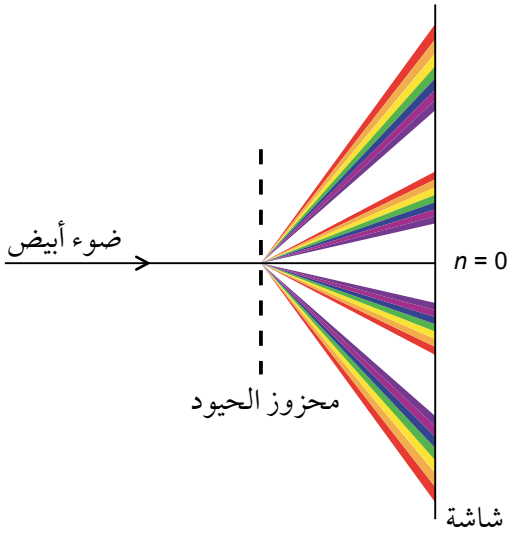
وتظهر سلسلة من الأطياف بلون بنفسجي أقرب إلى المركز وبلون أحمر أبعد عنه على كلا جانبَي الرتبة الصفرية، ونستطيع أن نرى السبب في أن الأطوال الموجية المختلفة تكون لها تداخلات قصوى بزوايا مختلفة إذا أعدنا ترتيب المعادلة $d \sin\theta = n\lambda$ لنحصل على:

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

يترتب على ذلك أنه كلما ازداد طول الموجة (λ)، ازدادت قيمة $\sin\theta$، وبالتالي ازدادت قيمة الزاوية θ، وبما أن الضوء الأحمر يقع في طرف الطيف المرئي حيث الطول الموجي الأكبر لذا فهو يظهر بأكبر زاوية.

مصطلحات علمية

التشتت Dispersion: تجزّؤ الضوء إلى الأطوال الموجية المكوّنة له.



الشكل ٧-٢١ الطريقة البسيطة لفصل الضوء الأبيض إلى الأطوال الموجية المكوّنة له، يكون باستخدام محزوز الحيود.

مقارنة محزوز الحيود بالشق المزدوج

من المفيد مقارنة استخدام محزوز الحيود مع استخدام شقَّي يونج لتحديد طول الموجة.

- تكون التداخلات القصوى **حادة** جدًا باستخدام محزوز الحيود.
- تكون التداخلات القصوى أيضًا **ساطعة** جدًا باستخدام محزوز الحيود، والسبب أنه بدلاً من الحصول على تداخل من شقَّين فقط، يكون هناك تداخل من ألف شقّ أو أكثر.
- قد يكون هناك عدم يقين كبير في قياس المسافة الفاصلة بين الشقَّين a باستخدام الشق المزدوج، وكذلك تكون الأهداب قريبة بعضها من بعض، لذلك يمكن أن يكون قياس المسافة الفاصلة بين الأهداب غير دقيق أيضًا.
- تكون التداخلات القصوى واسعة ومنفصلة باستخدام محزوز الحيود، ويمكن قياس الزاوية θ. إذًا يمكن توقع أن تجربة استخدام محزوز الحيود تعطي درجة عالية من الدقة لقيمة طول الموجة أكثر من تجربة الشق المزدوج البسيطة.

سؤال

(١٥) يسقط الضوء الأبيض عموديًا على محزوز حيود، المسافة الفاصلة بين خطوطه (d) تساوي (2.00×10^{-6} m)، والأطوال الموجية للطيف المرئي تتراوح بين (400 nm) و (700 nm).

أ. احسب الزاوية بين نهايتَي الضوءَين الأحمر والبنفسجي من طيف الرتبة الأولى.

ب. اشرح سبب تداخل طيفَي الرتبة الثانية والثالثة.

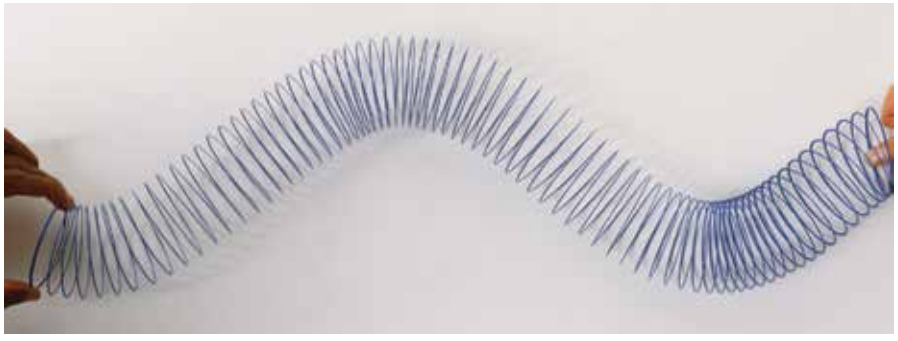
٦-٧ الموجات المستقرة

الموجات التي درسناها حتى الآن في الوحدة السادسة وفي الموضوعات السابقة من هذه الوحدة كانت **موجات مسافرة**، تبدأ من مصدر ما وتنتقل إلى الخارج، فتنقل الطاقة من مكان إلى آخر، وهناك نوع ثانٍ مهم من الموجات هي **الموجات المستقرة (الموجات الواقفة)** **Stationary waves (standing waves)**، ويمكن ملاحظتها على النحو الآتي: استخدم زنبركًا طويلًا أو حبلًا طويلًا أو قطعة من الأنابيب المطاطية، ثم ضَع الزنبرك على الأرضية وثبّت أحد طرفَيه بإحكام، ثم حرّك الطرف الثاني من جانب إلى آخر، فتنتقل الموجات المستعرضة على طول الزنبرك وتنعكس عند طرفه المثبّت (الصورة ٧-٨).

مصطلحات علمية

الموجة المستقرة (الموجة الواقفة)

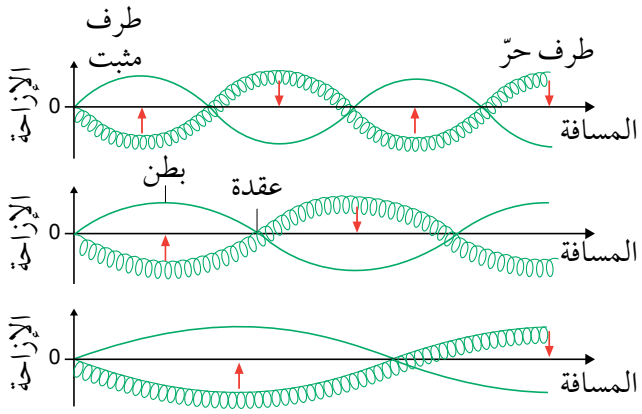
Stationary wave (standing wave): نمط اهتزازي مستقر ناتج عن تراكب موجتَين مسافرتَين لهما التردد نفسه وتنتقلان باتجاهَين متعاكسَين، وللموجة المستقرة عقد وبطون.



الصورة ٧-٨ استخدام زنبرك لتوليد نمط موجة مستقرة.

إذا ضَبطت تردد الاهتزاز، عندها تكون قادرًا على الحصول على نمط مستقر من الموجات، مثل أحد تلك الأنماط المبيّنة في الشكل ٧-٢٢، وللحصول على أحد الأنماط الأخرى عليك تغيير التردد.

يجب أن تلاحظ أنه عليك تحريك طرف الزنبرك بالتردد الصحيح للحصول على أحد هذه الأنماط المثيرة للاهتمام، ويختفي هذا النمط عندما يزداد أو ينقص تردد اهتزاز الطرف الحرّ للزنبرك قليلًا.



الشكل ٧-٢٢ تعتمد أنماط الموجات المستقرة المختلفة الممكنة على تردد الاهتزاز.

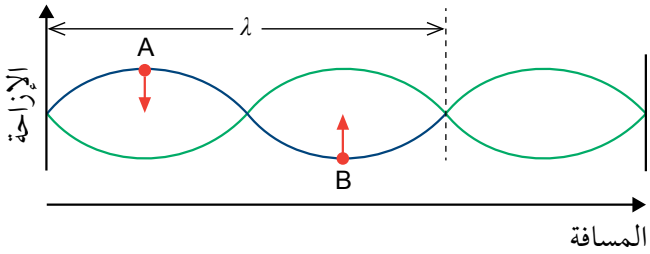
العُقد والبطون

ما لاحظته هو موجة مستقرة في الزنبرك الطويل، وهناك نقاط على طول الزنبرك تبقى ثابتة (تقريبًا)، في حين تهتز نقاط أخرى على كِلا الجانبَين بأكبر سعة، وتسمى النقاط التي لا تتحرك **العقد Nodes** ويُرمز إليها بالرمز N، وتسمى النقاط التي يهتز فيها الزنبرك بأقصى سعة **البطون Antinodes** ويُرمز إليها بالرمز A. من الواضح أن المظهر الجانبي لشكل الموجة لا ينتقل على طول الزنبرك، ولذلك نسميها موجة مستقرة أو موجة واقفة.

مصطلحات علمية

العقدة Node: نقطة على الموجة المستقرة ذات سعة صفرية.

البطن Antinode: نقطة على الموجة المستقرة ذات سعة قصوى.



الشكل ٧-٢٣ يجب أن يكون الطرفان المثبّتان للزنبرك الطويل عقدتَين في نمط الموجة المستقرة.

نحن نمثّل الموجة المستقرة عادة بواسطة رسم شكل الزنبرك في موضعَيه الطرفيَّين (الشكل ٧-٢٣)، إذ يظهر الزنبرك كسلسلة من الحلقات، يفصل بينها عقد، فتتحرك النقطة A في هذا المخطط إلى الأسفل، وتتحرك النقطة B في الوقت نفسه في الحلقة التالية إلى الأعلى. فرق الطور بين النقطتَين A و B يساوي 180°، ومن هنا تتحرك أجزاء الزنبرك في الحلقات المتجاورة دائمًا في طور معاكس (فرق طور 180°)، ويساوي نصف دورة.

٧-٧ المزيد عن الموجات المستقرة

تخيّل وترًا مشدودًا بين نقطتَين ثابتتَين: وتر جيتار على سبيل المثال، فإذا سُحب الوتر من منتصفه ثم حرّر، فإن موجة مستقرة تنتج عنه بعقدة عند كل من طرفَيه الثابتَين وبطن في المنتصف، كما ينتج عن تحرير الوتر موجتان مسافرتان تنتقلان في اتجاهَين متعاكسَين، وتنعكس هاتان الموجتان عند الطرفَين الثابتَين، ثم تتّحدان لإنتاج موجة مستقرة.

يبيّن الشكل ٧-٢٢ كيف يمكن إنتاج موجة مستقرة باستخدام زنبرك طويل، إذ تتشكّل موجة مستقرة عندما تكون هناك موجتان متتاليتان لهما السعة وطول الموجة نفساهما، وتنتقلان باتجاهَين **متعاكسَين** أي تتراكبان. يستخدم الشكل ٧-٢٤ التمثيل البياني (الإزاحة - المسافة) لتوضيح تشكيل الموجة المستقرة على طول زنبرك طويل (أو طول وتر مشدود):

- في الزمن ($t = 0$)، تنتقل الموجتان المسافرتان إلى اليسار وإلى اليمين في الطور نفسه، ثم تتحد الموجتان لتشكلا **تداخلًا بنّاءً**، ولتعطيا موجة محصلة لها سعة ضعف سعة كل موجة.
- بعد زمن يساوي ربع الزمن الدوري $\left(t = \frac{T}{4}\right)$، تكون كل موجة قد انتقلت مسافة تساوي ربع طول الموجة إلى اليسار أو إلى اليمين، وبالتالي تكون الموجتان متعاكستَين في الطور (فرق الطور = 180°)، فتتّحدان لتشكّلا **تداخلًا هدّامًا**، ولتعطيا موجة إزاحتها تساوي صفرًا.
- بعد زمن يساوي نصف الزمن الدوري $\left(t = \frac{T}{2}\right)$، تعود الموجتان إلى الطور نفسه مرة أخرى، ومرة أخرى تتّحدان لتشكّلا **تداخلًا بنّاءً**.
- بعد زمن يساوي ثلاثة أرباع الزمن الدوري $\left(t = \frac{3T}{4}\right)$، تكون الموجتان متعاكستَين في الطور مرة أخرى، فتتّحدان لتشكّلا **تداخلًا هدّامًا**، وتُظهر الموجة الناتجة إزاحة تساوي صفرًا.
- بعد فترة زمنية تساوي زمن دوري كامل واحد ($t = T$) ، فإن الموجتَين تتّحدان لتشكّلا **تداخلًا بنّاءً**، ويكون المظهر الجانبي للزنبرك كما كان عند ($t = 0$).

تكرّر هذه الدورة نفسها مشكّلةً عقدًا وبطونًا على طول الزنبرك، فالمسافة الفاصلة بين العقد المتجاورة أو البطون المتجاورة تدل على الموجتَين المسافرتَين اللتَين أنتجتا الموجة المستقرة.

عند التمعّن في التمثيلات البيانية في الشكل ٧-٢٤ يتّضح أن المسافة الفاصلة بين العقد المتجاورة أو البطون المتجاورة ترتبط بطول الموجة (λ) للموجة المسافرة.

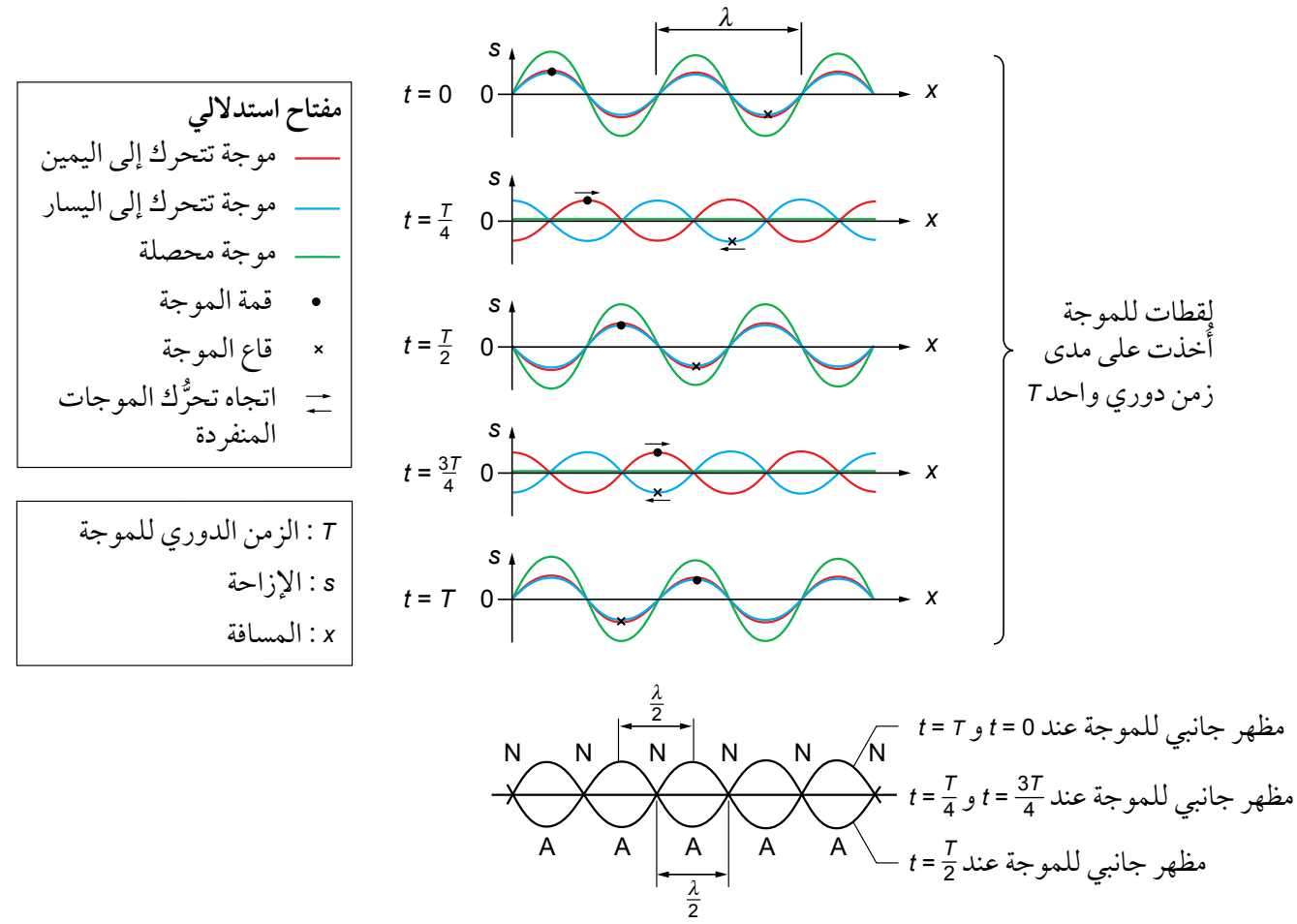
والاستنتاجات المهمة هي:

- المسافة الفاصلة بين عقدتَين متجاورتَين (أو بين بطنَين متجاورَين) تساوي $\frac{\lambda}{2}$.
- المسافة الفاصلة بين عقدة وبطن متجاورَين تساوي $\frac{\lambda}{4}$.

يمكن أن يحدّد طول الموجة (λ) لأي موجة مسافرة من المسافة الفاصلة بين عقدتَين متجاورتَين أو بطنَين متجاورَين لنمط الموجة المستقرة الناتجة (هذه المسافة الفاصلة هي $\frac{\lambda}{2}$)، ويمكن بعد ذلك استخدام هذه النتيجة لتحديد السرعة (v) للموجة المسافرة أو ترددها (f) باستخدام معادلة سرعة الموجة:

$$v = f\lambda$$

حيث (v): سرعة الموجة، و (f): التردد و (λ): طول الموجة.



الشكل ٧-٢٤ تتحرك الموجة ذات اللون الأزرق إلى اليسار وتتحرك الموجة ذات اللون الأحمر إلى اليمين، ويستخدم مبدأ تراكب الموجات لتحديد الإزاحة المحصلة، ويبيّن المظهر الجانبي للزنبرك الطويل باللون الأخضر.

من المفيد ملاحظة أن **الموجة المستقرة لا تنتقل، وبالتالي ليس لها سرعة**، ولا تنقل الطاقة بين نقطتَين مثل الموجة المسافرة. يبيّن الجدول ٧-١ بعض الخصائص الرئيسية للموجة المسافرة وللموجة المستقرة.

	الموجة المسافرة	الموجة المستقرة
طول الموجة	λ	λ
التردد	f	f
السرعة	v	0

الجدول ٧-١ خصائص للموجات المسافرة والمستقرة.

سؤال

(١٦) تكوّنت موجة مستقرة (واقفة) في زنبرك مهتز، فكانت المسافة الفاصلة بين العقد المتجاورة (25 cm). احسب:

أ. الطول الموجي للموجة المسافرة.

ب. المسافة من عقدة ما إلى البطن المجاور لها.

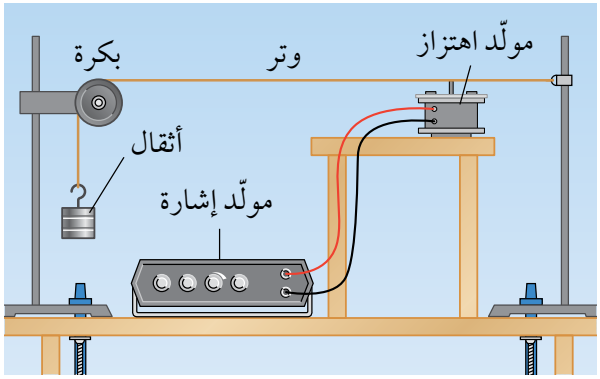
مهارة عملية ٧-٥

ملاحظة الموجات المستقرة

سنتطرق هنا لبعض التجارب لملاحظة الموجات المستقرة للموجات الميكانيكية في الأوتار المشدودة، والموجات الميكروية، والموجات الصوتية في الأعمدة الهوائية.

الأوتار المشدودة: تجربة ميلد

في هذه التجربة يتصل أحد طرفَي وتر بمولّد اهتزاز يُدار بواسطة مولّد إشارة (الشكل ٧-٢٥)، ويتدلى الطرف الآخر من الوتر فوق بكرة، وتحافظ أثقال معلقة بالوتر على إبقائه مشدودًا. عندما يكون مولّد الإشارة قيد التشغيل، يهتز الوتر بسعة صغيرة، ويمكن إنتاج موجات مستقرة ذات سعة أكبر بواسطة ضبط التردد.



الشكل ٧-٢٥ تجربة ميلد لاستقصاء الموجات المستقرة في وتر.

لا يمكن أن يهتز طرف الوتر عند البكرة؛ لأن هذا الطرف هو عقدة، وبالمثل فإن الطرف الذي يلامس مولد الاهتزاز يمكنه الحركة بمقدار صغير فقط، وهذا الطرف يعدّ عقدة أيضًا؛ وكلما ازداد التردد أصبح من الممكن ملاحظة حلقة واحدة (بطن واحد)، وحلقتَين، وثلاث حلقات وأكثر. تبيّن الصورة ٧-٩ وترًا مهتزًا حيث ضُبط تردد مولد الاهتزاز لإنتاج حلقتَين.

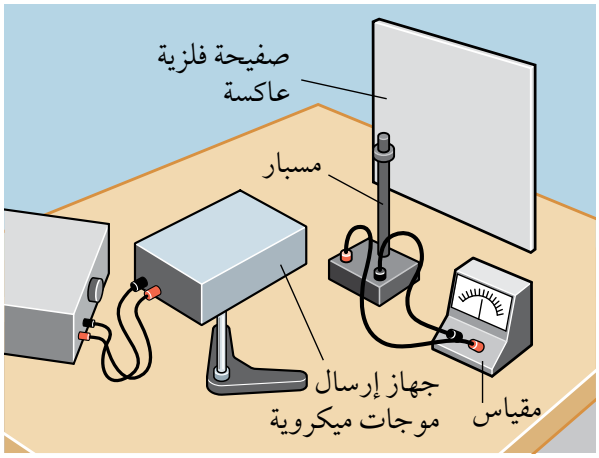
يُعدّ المنظار الومّاض (الستروبوسكوب) مفيدًا في الكشف عن حركة الوتر عند هذه الترددات، والتي تبدو مشوّشة للعين، ويُضبط تردد الاهتزاز بحيث يكون هناك حلقتان على طول الوتر، ثم يضبط تردد الستروبوسكوب بحيث يتطابق تقريبًا مع تردد الاهتزازات. وبذلك يمكننا أن نرى الوتر يتحرك «بالحركة البطيئة»، ومن السهل رؤية الحركات المتعاكسة للحلقتَين المتجاورتَين.

الصورة ٧-٩ عند توليد موجة مستقرة، يتحرك نصف الوتر إلى الأعلى في حين يتحرك النصف الآخر إلى الأسفل، وفي هذه الصورة يتحرك الوتر بسرعة كبيرة بحيث يتعذر ملاحظة التأثير.

تُعرف هذه التجربة **بتجربة ميلد**، ويمكن التوسع فيها لاستقصاء تأثير تغيير طول الوتر، وقوة الشدّ في الوتر وسُمك الوتر.

الموجات الميكروية

ابدأ بتوجيه جهاز إرسال الموجات الميكروية إلى صفيحة فلزية، تعكس بدورها الموجات الميكروية لتعود نحو المصدر (الشكل ٧-٢٦)، ثم حرّك المسبار المستقبل في المسافة بين جهاز الإرسال والصفيحة العاكسة، فستلاحظ مواضع الشدة العالية والمنخفضة؛ هذا لأن موجة مستقرة نشأت بين جهاز الإرسال والصفيحة العاكسة، ومواضع الشدة العالية والمنخفضة هي البطون والعقد على التوالي.



الشكل ٧-٢٦ يتم إنتاج موجة مستقرة عندما تنعكس الموجات الميكروية عن الصفيحة الفلزية.

إذا حرّك المسبار على طول الخط المباشر من جهاز الإرسال إلى الصفيحة، فإنه يمكن تحديد طول الموجة للموجات الميكروية من المسافة بين العقد، وبمعرفة أن الموجات

تابع

الميكروية تنتقل بسرعة الضوء c ($3.0 \times 10^8\ m\ s^{-1}$)، فإنه يمكننا بعد ذلك تحديد ترددها (f) باستخدام معادلة الموجة:

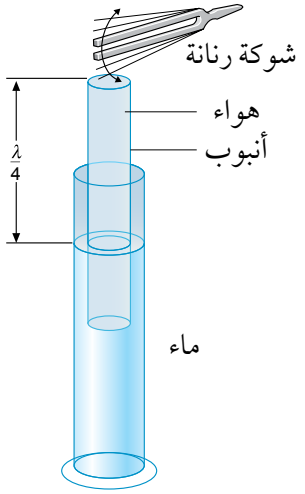
$$c = f\lambda$$

العمود الهوائي المغلق من أحد طرفيه

احتياطات الأمان والسلامة

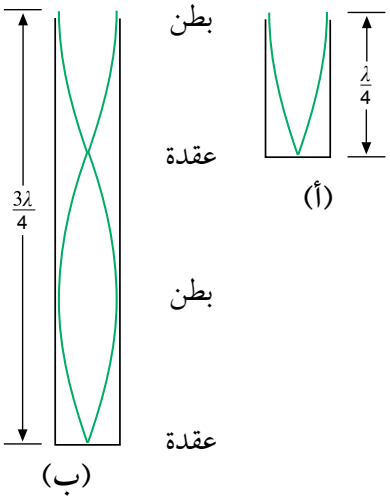
- انتبه عند تقريب الشوكة الرنانة من الأنبوب الزجاجي ولا تجعلها تلامسه حتى لا تكسره فتؤذي نفسك.

يثبّت أنبوب زجاجي (مفتوح من كِلا طرفيه) بحيث يكون طرف واحد داخلًا في مخبار به ماء؛ ويمكنك تغيير طول عمود الهواء في الأنبوب بضبط ارتفاعه بواسطة تحريك الأنبوب إلى الأعلى أو الأسفل (الشكل ٧–٢٧)، فإذا وضعت شوكة رنانة تهتزّ فوق فتحة نهايته، فإن عمود الهواء في الأنبوب يُجبر على الاهتزاز، فتبدو أصوات نغمة الشوكة الرنانة أعلى بكثير. هذا مثال على ظاهرة تسمى **الرنين Resonance**، والتجربة الموصوفة هنا هي المعروفة باسم أنبوب الرنين.



الشكل ٧–٢٧ يتم توليد موجة مستقرة في الهواء داخل أنبوب عندما يُضبط طول عمود الهواء على الطول الصحيح.

يجب أن يكون طول عمود الهواء لحدوث الرنين طولًا مناسبًا، فالهواء في أسفل الأنبوب غير قادر على الاهتزاز، لذلك يجب أن تكون هذه النقطة عقدة؛ لكن يمكن أن يهتز الهواء بحرّية في الطرف المفتوح للأنبوب أكثر من غيره، لذلك يسمّى بطنًا، وبناء عليه فإن طول عمود الهواء يجب أن يكون ربع طول موجي (الشكل ٧–٢٨ أ)، (بدلًا من ذلك، يمكن أن يُضبط طول عمود الهواء ليساوي ثلاثة أرباع طول الموجة. انظر الشكل ٧–٢٨ ب).



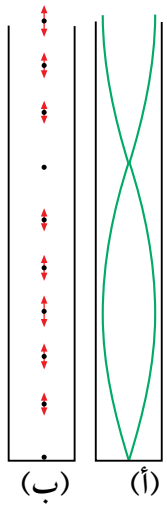
الشكل ٧–٢٨ أنماط الموجات المستقرة للهواء في أنبوب أحد طرفَيه مغلق.

انتبه! تمثيل الموجات الصوتية المستقرة يمكن أن يكون مضلّلًا؛ تذكّر أن الموجة الصوتية هي موجة طولية، لكن المخطط الذي رسمناه أشبه بموجة مستعرضة. يبيّن الشكل ٧–٢٩ (أ) كيف نمثل الموجة الصوتية المستقرة عادة، في حين يبيّن الشكل ٧–٢٩ (ب) اتجاه اهتزاز الجسيمات على طول الموجة.

مصطلحات علمية

الرنين Resonance: الرنين هو تطابق تردد مصدر مهتز مع التردد الطبيعي لاهتزاز جسم ما، الأمر الذي يؤدي إلى اهتزاز ذلك الجسم بسعة أكبر.

تابع



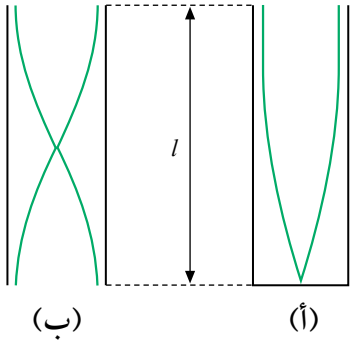
الشكل ٧-٢٩ التمثيل القياسي للموجة الصوتية المستقرة قد تمثّل على أنها: (أ) موجة مستعرضة (ب) الموجة الصوتية في الحقيقة موجة طولية، حيث تهتز الجسيمات فيها كما هو مبيّن.

الأعمدة الهوائية المفتوحة الطرفَين

يهتز الهواء في الأنبوب المفتوح من كلا طرفَيه بطريقة مماثلة للهواء الموجود في العمود مغلق الطَرف. خذ أنبوبًا مفتوحًا من طرفَيه وانفخ برفق عبر طرفه الأعلى، فستسمع نغمة صوت تعتمد حدتها على طول الأنبوب، ثم غطِّ أسفل الأنبوب براحة يدك وكرّر العملية، فتجد أن حدة النغمة الناتجة الآن أخفض من النغمة السابقة، ما يعني أن التردد يقل فيصبح تقريبًا نصف التردد الأصلي.

من المدهش إلى حدّ ما أن تكون الموجة المستقرة قد أُنشأت في عمود من الهواء مفتوح بهذه الطريقة. ما الذي يحدث؟ يقارن الشكل ٧-٣٠ الحالة بين الأنابيب المغلقة من طرف واحد والأنابيب المفتوحة الطرفين؛ فالأنبوب المفتوح الطرفَين يجب أن يكون له بطن عند كل من الطرفَين وعقدة في المنتصف.

يمكنك أن ترى بالنسبة إلى أنبوب بطول l مغلق من أحد طرفَيه أن الموجة المستقرة فيه تتكوّن من ربع طول موجي، لذلك فإن طول الموجة يساوي $4l$، في حين أن الموجة المستقرة في الأنبوب مفتوح الطرفَين تكون نصف طول موجة، ما يعطي طولًا موجيًا يساوي $2l$، وهكذا فإن إغلاق أحد طرفَي الأنبوب يضاعف طول الموجة للنغمة وينصّف التردد.



الشكل ٧-٣٠ أنماط الموجات المستقرة للموجات الصوتية: (أ) في أنبوب مغلق الطرف (ب) في أنبوب مفتوح الطرفَين.

أسئلة

(١٧) انظر إلى الموجة المستقرة (الواقفة) في الوتر في الصورة ٧-٩، حيث طول الجزء المهتز من الوتر (60 cm).

أ. احسب طول الموجة للموجة المسافرة والمسافة الفاصلة بين بطنَين متجاورَين.

ب. تمّت زيادة تردد الاهتزازة حتى تظهر موجة مستقرة لها ثلاثة بطون على الوتر.

١. ارسم نمط الموجة المستقرة لتوضيح مظهر الوتر.

٢. احسب طول الموجة للموجة المسافرة على هذا الوتر.

(١٨) **أ.** ارسم نمط الموجة المستقرة لتجربة الموجات الميكروية في المهارة العملية ٧-٥، ثم بيّن بوضوح ما إذا كان هناك عقدة أو بطن على الصفيحة العاكسة.

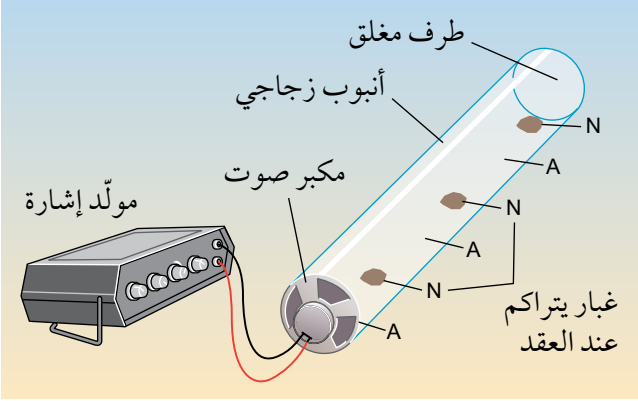
ب. وُجد أن المسافة الفاصلة بين نقطتَين متجاورتَين لهما شدة عالية تساوي (14 mm). احسب طول الموجة والتردد للموجات الميكروية.

(١٩) اشرح كيف تنشأ مجموعتان متماثلتان من الموجات تتحرّكان باتجاهين متعاكسين في تجارب الموجات الميكروية وعمود الهواء الموصوفة في المهارة العملية ٧-٥.

تحديد طول موجة الصوت وسرعته

بما أننا نعلم أن العُقد المتجاورة (أو البطون) للموجة المستقرة تفصلها مسافة نصف طول موجة، يمكننا استخدام هذه الحقيقة لتحديد طول الموجة (λ) لموجة مسافرة. وإذا عرفنا تردد الموجات (f) أيضًا، فإنه يمكننا إيجاد سرعتها (v) باستخدام معادلة سرعة الموجة $v = f\lambda$.

من طرائق تحديد سرعة الصوت استخدام أنبوب الغبار لكونت (Kundt) (الشكل ٧-٣١)، حيث يرسل مكبّر الصوت موجات صوتية على طول الجزء الداخلي من الأنبوب، وينعكس الصوت عند الطرف المغلق؛ وعندما تنشأ موجة مستقرة، فإن الغبار (أو المسحوق الناعم) في الأنبوب يهتز في البطن بشدة، ويميل إلى التراكم عند العقد، حيث تكون حركة الهواء صفرًا، ومن ثم فإنه يمكن رؤية مواقع العقد والبطون بوضوح.



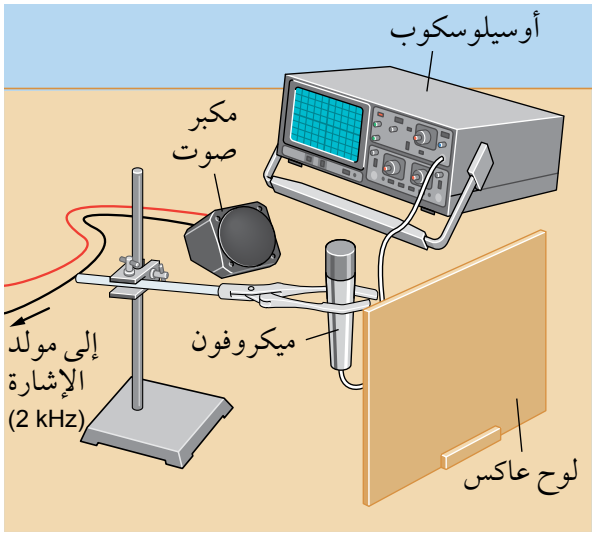
الشكل ٧-٣١ يمكن استخدام أنبوب الغبار لكونْت لإيجاد سرعة الصوت.

مهارة عملية ٧-٦

استخدام الموجات الصوتية المستقرة لتحديد λ و v

هذه الطريقة مبيّنة في الشكل ٧-٣٢، فهي تُجرى بالترتيب المستخدم في الموجات الميكروية نفسه. ينتج مكبّر الصوت موجات صوتية، وهذه الموجات تنعكس عن اللوح العاكس، ويلتقط الميكروفون الموجة المستقرة في الحيّز بين مكبّر الصوت واللوح، وتعرض الإشارة الناتجة على شاشة الأوسيلوسكوب. يكون من الأسهل إيقاف تشغيل المقياس الأفقي لجهاز الأوسيلوسكوب، بحيث لا تتحرك البقعة عبر الشاشة، بل تتحرك إلى الأعلى وإلى الأسفل منها، ويعطي ارتفاع الإشارة الرأسية مقياسًا لشدة الصوت.

من السهل الكشف عن العقد والبطون بواسطة تحريك الميكروفون على طول الخط الواصل بين مكبّر الصوت واللوح؛ ولقياس أكثر ضبطًا لا تقاس المسافة الفاصلة بين العقد المتجاورة، بل تقاس عبر عدة عقد. وبما أن المسافة بين عقدتَين متجاورتَين تساوي نصف الطول الموجي، فإنه يمكن الحصول على الطول الموجي للموجات الصوتية، ويمكن بعد ذلك حساب سرعة الموجة باستخدام معادلة سرعة الموجة؛ حيث أن التردد يتم تحديده باستخدام جهاز الأوسيلوسكوب.



الشكل ٧-٣٢ تكوّنت موجة صوتية مستقرة بين مكبّر الصوت واللوح.

أسئلة

(٢٠) **أ.** بالنسبة إلى الشكل ٧-٣١، اقترح سبب سهولة تحديد موضع العقدة بضبط أكثر من البطن.

ب. اشرح سبب تفضيل قياس المسافة عبر عدة عقد.

(٢١) وُجد أن عقدتَين تفصل بينهما مسافة (20 cm) وبينهما ثلاثة بطون لموجات صوتية ترددها (2500 Hz).

أ. احسب طول الموجة لهذه الموجات الصوتية.

ب. استخدم معادلة سرعة الموجة $v = f\lambda$ لحساب سرعة الصوت في الهواء.

ملخّص

ينص مبدأ تراكب الموجات على أنه عندما تلتقي موجتان أو أكثر عند نقطة ما، فإن الإزاحة الناتجة هي المجموع الجبري لإزاحتَي الموجتَين الفرديتَين.

عندما تمر الموجات من خلال شق، فإنها قد تحيد بحيث تنتشر في الحيّز خلفه، ويكون تأثير الحيود أكبر عندما يكون الطول الموجي للموجات مساويًا لعرض الفجوة.

التداخل هو تراكب موجتَين أو أكثر من مصدرَين مترابطَين.

يكون المصدران مترابطَين عندما يصدران موجات لها فرق طور ثابت (يمكن أن يحدث هذا فقط إذا كان للموجات التردد نفسه أو طول الموجة نفسه).

فرق المسار هو المسافة الإضافية التي تقطعها إحدى الموجتَين مقارنة بالموجة الأخرى.

يكون فرق المسار في حالة التداخل البنّاء عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية (0، λ، 2λ، 3λ وهكذا)، أي أن فرق المسار = $n\lambda$.

تكون الموجات في حالة التداخل البنّاء دائمًا متفقة في الطور (فرق الطور= 0°).

يكون فرق المسار في حالة التداخل الهدّام عددًا فرديًا من أنصاف الأطوال الموجية ($\frac{1}{2}\lambda$، $1\frac{1}{2}\lambda$، $2\frac{1}{2}\lambda$، وهكذا)، أي أن فرق المسار = $\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$، حيث n عدد صحيح يشمل الصفر.

تكون الموجات في حالة التداخل الهدّام، متعاكسة في الطور (فرق الطور = 180°).

عندما يمر الضوء عبر شق مزدوج، فإنه يحيد عند كل شق، ويلاحظ نمط تداخل متساوي التباعد من أهداب مضيئة ومعتمة، قد يُستخدم لتحديد طول الموجة للضوء باستخدام المعادلة:

$$\lambda = \frac{ax}{D}$$

يمكن استخدام هذه المعادلة لجميع الموجات، بما في ذلك الموجات الصوتية والموجات الميكروية.

يحيد الضوء من محزوز الحيود عند شقوقه أو خطوطه المتعدّدة، ويتداخل الضوء بعد حيوده في الحيّز خلف المحزوز.

معادلة محزوز الحيود هي:

$$d \sin\theta = n\lambda$$

حيث d هي المسافة بين الخطوط المتجاورة للمحزوز أو تباعد المحزوز، θ هي الزاوية بين التداخل الأقصى ذي الرتبة الصفرية والتداخل الأقصى ذي الرتبة n، و λ هي طول الموجة للضوء الساقط عموديًا على المحزوز.

تتشكل الموجات المستقرة عندما تنتقل موجتان متماثلتان مسافرتان باتجاهَين متعاكسَين فتلتقيان وتتراكبان، ويحدث هذا عادة عندما تكون إحدى الموجتَين انعكاسًا للأخرى.

العقدة هي النقطة التي تكون فيها السعة صفرًا دائمًا.

البطن هو النقطة التي تكون فيها السعة قصوى.

العقد المتجاورة (أو البطون المتجاورة) يفصل بينها مسافة تساوي نصف الطول الموجي للموجة المسافرة.

للموجة المستقرة نمط مميّز من العقد والبطون.

يمكننا استخدام معادلة سرعة الموجة $v = f\lambda$ لتحديد السرعة v أو التردد f لموجة مسافرة. ويمكن الحصول على الطول الموجي λ باستخدام العقد أو البطون لنمط الموجة المستقرة.

أسئلة نهاية الوحدة

١ ينتج شعاعا ضوء من مصدرَين مترابطَين تداخلًا بنّاءً. أيّ ممّا يأتي لا يمكن أن يكون فرق طور بين الشعاعَين؟

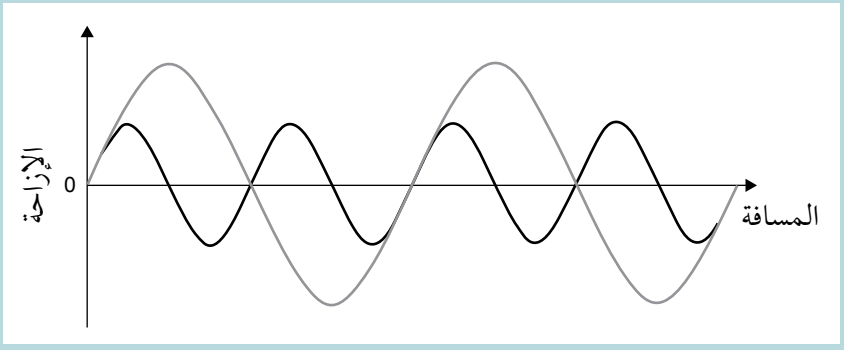
أ. 0° ب. 270° ج. 360° د. 720°

أفعال إجرائية

قارن Compare: حدّد أوجه التشابه و/ أو الاختلاف معلّقًا عليها.

٢ أ. انسخ الموجات المبيّنة في الشكل ٧-٣٣ على ورقة رسم بياني، مستخدمًا مبدأ تراكب الموجات لرسم الموجة المحصلة.

ب. قارن الطول الموجي للموجة المحصّلة مع الطول الموجي للموجتَين المكوّنتَين لها.

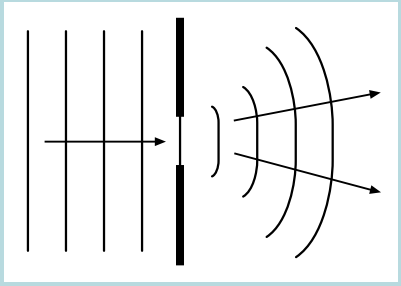


الشكل ٧-٣٣

٣ اذكر كيف سيتغير نمط الحيود في الشكل ٧-٣٤ عندما:

أ. يزداد الطول الموجي للموجة الساقطة.

ب. ينخفض الطول الموجي للموجة الساقطة.



الشكل ٧-٣٤

٤ اشرح: لماذا يمكن استقبال إشارات الراديو من أجهزة الإرسال الأرضية في المناطق الجبلية، في حين لا يمكن استقبال إشارات التلفزيون إلا من الإرسال عبر الأقمار الاصطناعية؟

تابع

٥ باستخدام مكبرَي صوت يتم إنتاج صوت بتردد ثابت. تفصل بين المكبّرَين مسافة (1.5 m). يسير طالب على بُعد (8.0 m) من مكبّرَي الصوت عبر خط موازٍ للخط الفاصل بين المكبّرَين، ثم يقيس المسافة بين المواضع المتتالية من الصوت العالي فيجدها (1.2 m). احسب:

أ. الطول الموجي للصوت.

ب. تردد الصوت (افترض أن سرعة الصوت تساوي $330\ m\ s^{-1}$).

٦ يزوّد مكبّرا صوت منفصلان بإشارتَين ترددهما مختلف قليلًا من مولّدَي إشارة. اذكر سبب استمرار الصوت المسموع بالارتفاع والانخفاض.

٧ الطول الموجي لأحد الخطوط الطيفية لمصباح تفريغ الهيدروجين يساوي (656 nm). يسقط هذا الضوء عموديًا على محزوز حيود له 5000 خط لكل سنتيمتر ($5000\ lines\ cm^{-1}$). احسب زاويتَي التداخل الأقصى ذي الرتبة الأولى والثانية لهذا الضوء.

٨ **أ.** اشرح المقصود بمصطلح تراكب الموجات.

ب. في تجربة الشق المزدوج، استُخدم ضوء أصفر طول موجته (590 nm) من أنبوب تفريغ الصوديوم. وضع طالب شاشة على بُعد (1.8 m) من الشق المزدوج، ثم قيست المسافة بين 12 هدبًا مضيئًا فكانت (16.8 mm). احسب المسافة الفاصلة بين الشقَّين.

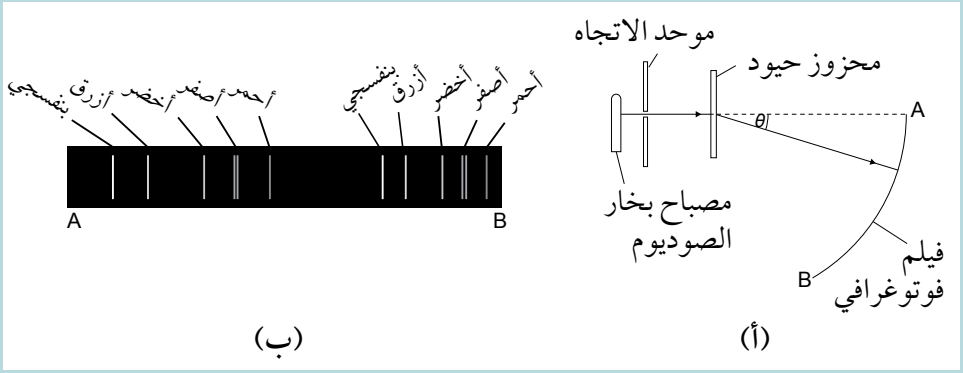
ج. صِف تأثير:

١. استخدام شقَّين ذوَي عرض أضيق، ولكن بينهما المسافة الفاصلة نفسها.

٢. استخدام شقَّين بمسافة فاصلة أصغر ولهما العرض نفسه.

٩ **أ.** يوصف ضوء الليزر بأنه ينتج ضوءًا عالي الترابط وأحادي اللون. اشرح المقصود بالعبارتَين مترابط وأحادي اللون.

ب. يبيّن الشكل ٧-٣٥ (أ) تجربة مستخدمة لتحليل طيف مصباح تفريغ بخار الصوديوم بواسطة محزوز حيود له 500 خط لكل مليمتر ($500\ lines\ mm^{-1}$)، والخطوط الطيفية التي لوحظت (الشكل ٧-٣٥ ب) على الفيلم الفوتوغرافي.



الشكل ٧-٣٥

تابع

١. اشرح سبب ملاحظة طيفَين.
٢. صِف اختلافَين بين هذين الطيفَين.
٣. يقع التداخل الأقصى الأخضر بالقرب من الطرف A وبزاوية θ مقدارها (19.5°). احسب الطول الموجي للضوء الأخضر.
٤. احسب الزاوية الناتجة عن الخط الأخضر الثاني.

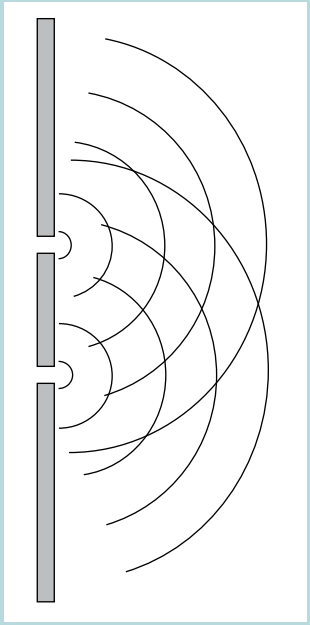
١٠ أ. اشرح المقصود بالتداخل الهدّام.

ب. يقوم طالب بإعداد تجربة لاستقصاء نمط التداخل الذي تشكله الموجات الميكروية التي طول موجتها (1.5 cm). تم إعداد الأدوات كما تظهر في الشكل ٧–١٢. المسافة بين مركزَي الشقَّين (12.5 cm)، وُضع كاشف مركزي على بُعد (1.2 m) من الألواح الفلزية بحيث يلتقط التداخلات القصوى، ثم حرّك الطالب الكاشف (45 cm) عبر المنضدة بموازاة الألواح. احسب عدد التداخلات القصوى التي سيمر بها الكاشف.

ج. احسب تردد هذه الموجات الميكروية.

١١ أ. اشرح المقصود بحيود الموجة.

ب. يبيّن الشكل ٧–٣٦ موجات تنتشر من شقَّين في حوض موجات.



الشكل ٧–٣٦

انسخ الشكل، وارسم عليه:
١. خطًا يبيّن النقاط الموجودة على طول التداخل الأقصى المركزي، وسمِّ هذا «خط 0».
٢. خطًا يبيّن النقاط الموجودة على طول التداخل الأقصى ذي الرتبة الأولى، وسمِّ هذا «خط 1».
٣. خطًا يبيّن النقاط الموجودة على طول التداخل الأدنى ذي الرتبة الأولى، وسمِّ هذا «خط أدنى».

تابع

ج. المسافة بين مركزَي الشقَّين (12 cm)، ويقعان على مسافة (60 cm) من الحاجز، ويقع التداخل الأقصى من الرتبة الأولى على مسافة (18 cm) على جانبَي التداخل الأقصى المركزي. احسب الطول الموجي للموجات (بافتراض أن معادلة الشق المزدوج التي تُستخدم للضوء يمكن أن تنطبق على الموجات في الحوض).

١٢ ما العبارة غير الصحيحة من العبارات الآتية حول الموجات المستقرة؟

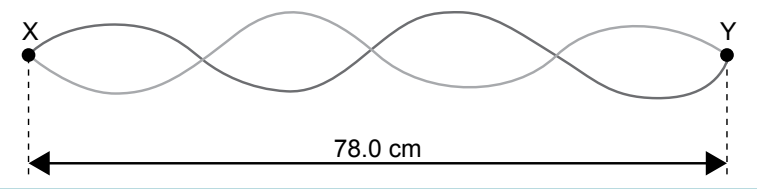
أ. للموجة المستقرة دائمًا اهتزازات مستعرضة.

ب. يجب أن يكون للموجة المستقرة عقدة واحدة على الأقل.

ج. المسافة الفاصلة بين عقدتَين متجاورتَين هي $\frac{\lambda}{2}$، حيث λ هي الطول الموجي للموجة المسافرة.

د. ينتج تراكب موجتَين مسافرتَين تنتقلان باتجاهَين متعاكسَين موجة مستقرة.

١٣ ثُبّت وترٌ بين نقطتَين X و Y. تَشكّل نمط موجة مستقرة في الوتر المشدود كما في الشكل ٧–٣٧. المسافة بين X و Y هي (78.0 cm)، ويهتز الوتر بتردد (120 Hz).

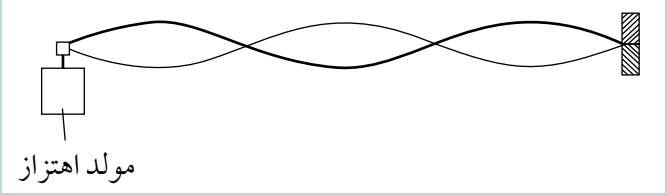


الشكل ٧–٣٧

ما سرعة الموجة المسافرة في الوتر؟

أ. $11.7\ m\ s^{-1}$ **ب.** $23.4\ m\ s^{-1}$ **ج.** $46.8\ m\ s^{-1}$ **د.** $93.6\ m\ s^{-1}$

١٤ يبيّن الشكل ٧–٣٨ موجة مستقرة في وتر.



الشكل ٧–٣٨

أ. على نسخة من الشكل، سمِّ عقدة واحدة (N) وبطنًا واحدًا (A).

ب. أشر إلى الطول الموجي للموجة المسافرة على الرسم وسمِّه (λ).

ج. إذا ضوعف تردد مولد الاهتزاز، فصِف التغيّرات في نمط الموجة المستقرة.

١٥ تُصدر شوكة رنانة نغمة ترددها (256 Hz)، وضعت فوق أنبوب ممتلئ بالماء تقريبًا، ثم قلّل مستوى الماء حتى سُمع الرنين لأول مرة.

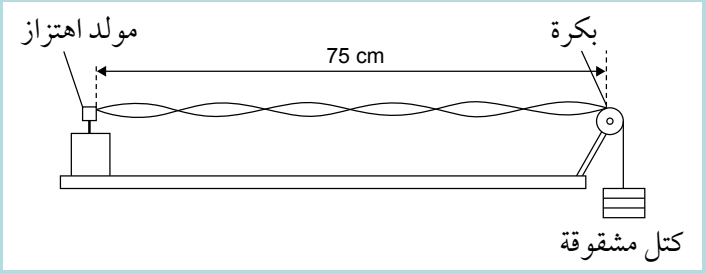
أ. اشرح المقصود بمصطلح الرنين.

ب. كان طول عمود الهواء فوق الماء عندما سُمع الرنين لأول مرة (31.2 cm)، احسب سرعة الموجة الصوتية.

تابع

١٦ **أ.** اذكر اثنين من أوجه التشابه واثنين من أوجه الاختلاف بين الموجات المسافرة والموجات المستقرة.

ب. يبيّن الشكل ٧-٣٩ تجربة لقياس سرعة الصوت في وتر، وضُبط تردد مولد الاهتزاز حتى تشكلت الموجة المستقرة المبيّنة.



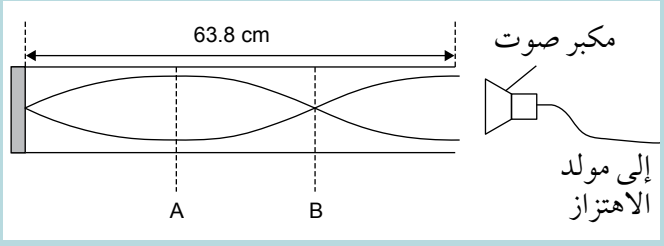
الشكل ٧-٣٩

١. ضَع على نسخة من الشكل ٧-٣٩ إشارة على عقدة وسمِّها (N)، وبطنًا وسمِّه (A).

٢. احسب السرعة التي تنتقل بها الموجة المسافرة على طول الوتر إذا كان تردد مولد الاهتزاز (120 Hz).

ج. تكرّرت التجربة مع خفض الحِمل (الثقل) على الوتر إلى النصف، ومن أجل الحصول على موجة مستقرة مماثلة، يجب أن ينخفض التردد إلى (30 Hz). اشرح، بدلالة سرعة الموجة في الوتر، سبب وجوب تعديل التردد.

١٧ يبيّن الشكل ٧-٤٠ موجة مستقرة، ترددها (400 Hz)، ينتجها مكبّر صوت في أنبوب مغلق من أحد الطرفين.



الشكل ٧-٤٠

أ. صِف حركة جسيمات الهواء عند:

١. A

٢. B

ب. احسب سرعة الصوت إذا علمت أن طول الأنبوب (63.8 cm).

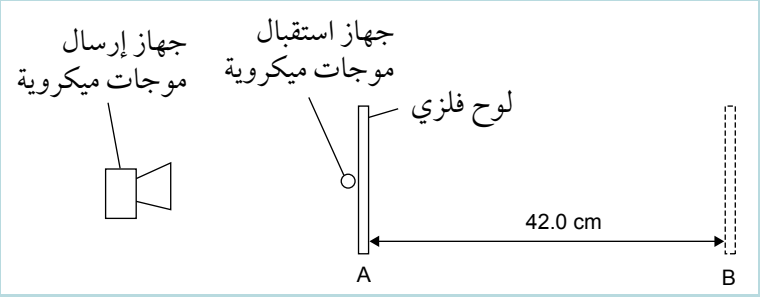
١٨ **أ.** اشرح المقصود بـ:

١. مصدر مترابط للموجات.

٢. فرق الطور.

تابع

ب. يجري يحيى تجربة على الموجات الميكروية، فيقوم بإعداد الترتيب المبيّن في الشكل ٧-٤١.



الشكل ٧-٤١

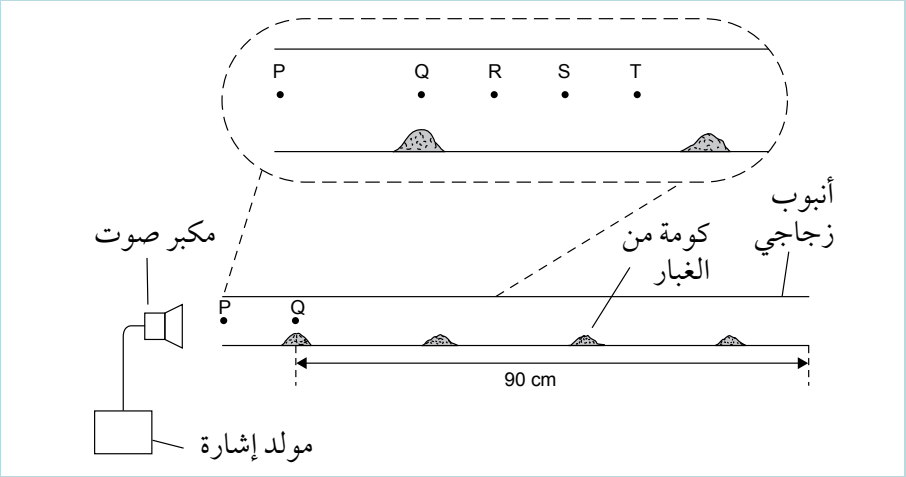
رُصدت إشارة صغيرة جدًا عند وجود اللوح الفلزي في الموضع A. حرّك يحيى اللوح إلى الخلف ببطء، تاركًا جهاز الاستقبال في الموضع نفسه، وفي أثناء ذلك وُجد أن الشدة تزداد بداية حتى تصل إلى الحد الأقصى، ثم تهبط إلى الحد الأدنى. تتكرّر هذه الدورة ما مجموعه خمس مرات حتى يصل اللوح إلى الموضع B، حيث يجد حدًا أدنى مرة أخرى.

١. اشرح سبب رصد سلسلة من التداخلات القصوى والدنيا.

٢. احسب تردد الموجات الميكروية.

ج. اشرح سبب وجود حد أدنى للشدة عندما كان اللوح في الموضع A بجانب جهاز الاستقبال (الكاشف).

١٩ يوضح الشكل ٧-٤٢ تجربة لقياس سرعة الصوت في الهواء.



الشكل ٧-٤٢

يُشغّل مكبّر الصوت فتنتشر كمية صغيرة من الغبار على طول الأنبوب، وعندما يُضبط التردد على (512 Hz)، يتجمّع الغبار بشكل كومات صغيرة كما هو مبيّن في الشكل.

أ. جِد الطول الموجي للموجة الصوتية واحسب سرعة الصوت في الأنبوب الهوائي.

ب. بيّن شكل حركة جسيمات الهواء عند المواضع P و Q و R و S و T على نسخة من الشكل.

ج. ضع إشارة عند نقطتَين على الرسم، بحيث يكون فرق الطور بين حركة جسيمات الهواء عندها يساوي 180°، وسمِّها A و B.

قائمة تقييم ذاتي

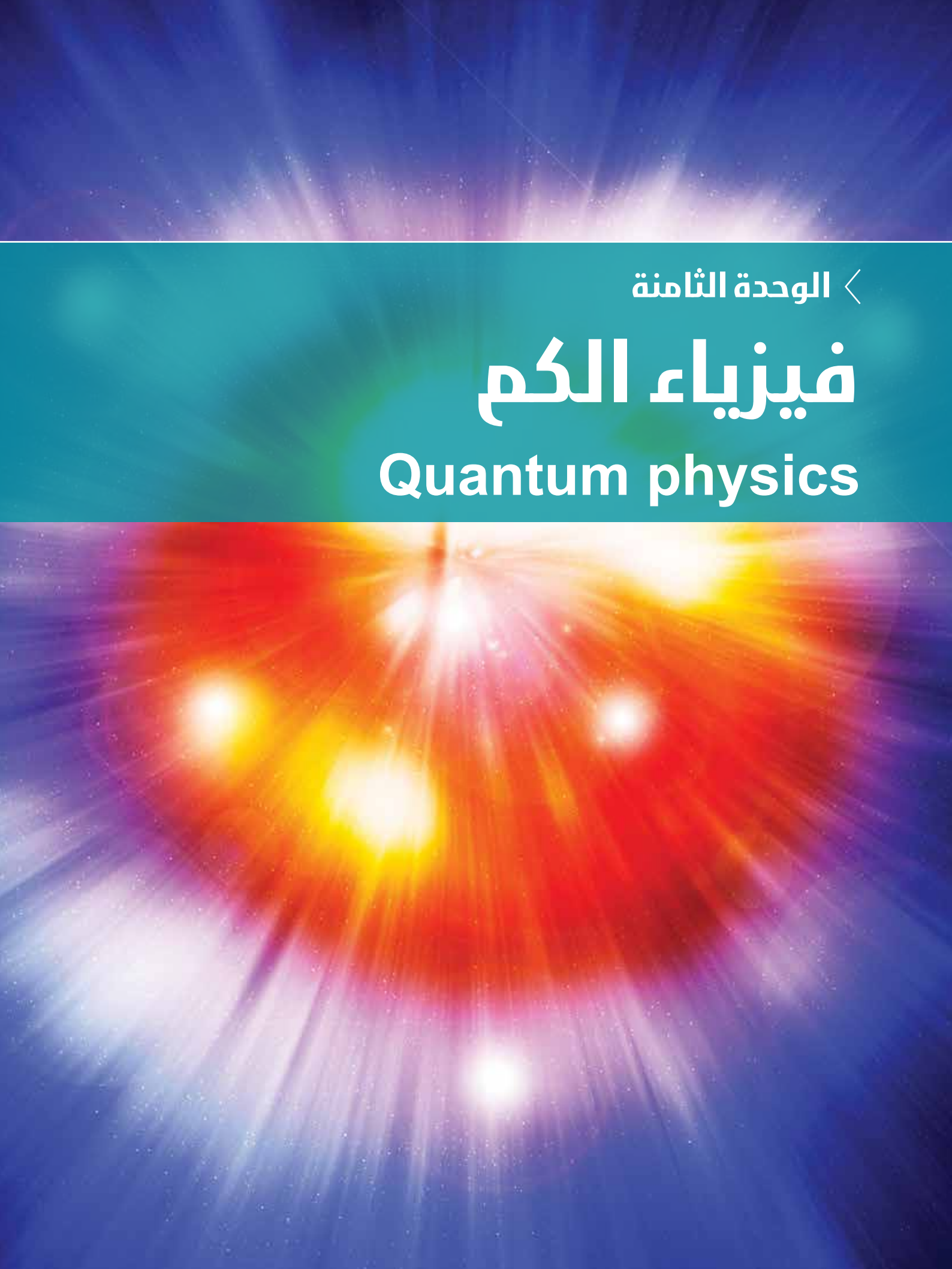
بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم مبدأ تراكب الموجات.	٧–١			
أفهم الحيود والتداخل وفرق المسار والترابط.	٧–٢، ٧–٣			
أفهم شروط كل من التداخل البنّاء والتداخل الهدّام.	٧–٣			
أفهم التجارب التي تشتمل على مصدرَين مترابطَين.	٧–٣			
أستخدم العلاقة $\lambda = \frac{ax}{D}$ للتداخل من شق مزدوج باستخدام الضوء.	٧–٤			
أستخدم العلاقة $d \sin\theta = n\lambda$ لمحزوز الحيود.	٧–٥			
أستخدم محزوز الحيود لإيجاد الطول الموجي لضوء ما.	٧–٥			
أذكر المقصود بالعقد والبطون.	٧–٦			
أشرح تشكيل الموجات المستقرة.	٧–٦، ٧–٧			
أصف التجارب التي تعرض الموجات المستقرة باستخدام الموجات الميكروية، والأوتار المشدودة والأعمدة الهوائية.	٧–٧			
أتذكّر المسافة الفاصلة بين العقد المتجاورة (أو البطون) بدلالة الطول الموجي للموجة المسافرة.	٧–٧			
أحدّد طول الموجة للصوت باستخدام الموجات المستقرة.	٧–٧			

الوحدة الثامنة

فيزياء الكم

Quantum physics



أهداف التعلّم

٨-١ يذكر أن الإشعاع الكهرومغناطيسي له طبيعة جسيمية.

٨-٢ يذكر أن الفوتون هو كمّة من الطاقة الكهرومغناطيسية.

٨-٣ يستخدم المعادلة: $E = hf$.

٨-٤ يستخدم الإلكترون فولت (eV) كوحدة للطاقة.

٨-٥ يذكر أن إلكترونات ضوئية تنبعث من سطح فلزي عندما يُسلّط عليه إشعاع كهرومغناطيسي مناسب.

٨-٦ يعرّف المصطلحَين تردد العتبة وطول موجة العتبة ويستخدمهما.

٨-٧ يشرح الانبعاث الكهروضوئي باستخدام طاقة الفوتون وطاقة دالة الشغل.

٨-٨ يستخدم المعادلة: $hf = \phi + \frac{1}{2} m v^2_{max}$.

٨-٩ يشرح أن طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية تعتمد على تردد الضوء الساقط ولا تعتمد على شدته، في حين أن شدة التيار الكهروضوئي تتناسب طرديًا مع شدة الضوء.

٨-١٠ يذكر أن الفوتون له كمية تحرك، ويستخدم المعادلة: $p = \frac{E}{c}$.

٨-١١ يذكر أن هناك مستويات طاقة منفصلة للإلكترون في الذرات (مثل ذرة الهيدروجين).

٨-١٢ يشرح مظهر خطوط أطياف الانبعاث وخطوط أطياف الامتصاص وتشكّلها.

٨-١٣ يستخدم المعادلة: $hf = E_1 - E_2$.

٨-١٤ يصف كيف أن الانبعاث الكهروضوئي دليل على الطبيعة الجسيمية للإشعاع الكهرومغناطيسي وأن التداخل والحيود دليل على الطبيعة الموجية له.

٨-١٥ يصف الأدلة التي يقدمها حيود الإلكترونات للطبيعة الموجية للجسيمات ويفسرها نوعيًا.

٨-١٦ يعرّف طول موجة دي بروي على أنها الطول الموجي المصاحب للجسيم المتحرك.

٨-١٧ يستخدم المعادلة: $\lambda = \frac{h}{p}$.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- يُعدّ مبدأ حفظ الطاقة مبدأً مهمًا في الفيزياء، اكتب قائمة ببعض الأمثلة على هذا المبدأ من موضوعات مختلفة في الفيزياء، وشارك القائمة التي كتبتها مع زميلك.
- ناقش مع زميلك مفهومَي كمية التحرّك وطاقة الحركة.

العلوم ضمن سياقها

ما الضوء؟

عندما صُنع أول ليزر عام 1960 م بدا وكأنه فكرة ذكية، وقد استغرق زمنًا طويلًا حتى استحدثت تطبيقات مفيدة لاستخدامه، أما في هذه الأيام فالليزر موجود في كل مكان، وهو يعمل في محركات أقراص الحاسوب CD و DVD، والماسحات الضوئية للرموز الشريطية (الباركود) في المحلات التجارية، كما أن له تطبيقات كثيرة في مجال الطب، وتبيّن الصورة ٨-١ أحد المرضى يخضع لجراحة في العين بواسطة الليزر.

لم يكن اختراع الليزر ممكنًا إلّا بعد أن فكّك العلماء لغز طبيعة الضوء. لقد درست سابقًا أن الضوء عبارة عن موجات فما الدليل التجريبي للسلوك الموجي لمثل هذه الموجات؟

سترى في هذه الوحدة أن الموجات الكهرومغناطيسية لها طبيعة ثنائية (مزدوجة)؛ فهي تتفاعل مع المادة كجسيمات وتنتقل عبر الفضاء كموجات.

الصورة ٨-١ عملية جراحية في العين بواسطة الليزر.

٨-١ النموذج الجسيمي والنموذج الموجي

سندرس في هذه الوحدة اثنين من أقوى النماذج العلمية وهما النموذج الجسيمي والنموذج الموجي، ولمعرفة كيف يمكن أن يساعد هذان النموذجان على فهم المزيد عن كل من الضوء والمادة، سنلقي أولاً نظرة فاحصة على هذين النموذجين كل على حدة.

النموذج الجسيمي

من أجل شرح خصائص مادة ما لا بدّ أن نفكر في الجسيمات التي تتكوّن منها تلك المادة، والطريقة التي تتصرف بها، فنتخيّل الجسيمات عبارة عن أشياء صلبة ذات كتلة، وتتحرك وفقًا لقوانين نيوتن في الحركة. فعندما يتصادم جسيمان يمكننا التنبؤ بكيفية تحركهما بعد التصادم بناءً على معرفة كتلتيهما وسرعتيهما المتجهة قبل التصادم. إذا لعبت السنوكر أو البلياردو من قبل فسيكون لديك فكرة جيدة عن كيفية سلوك الجسيمات (الصورة ٨-٢).

الصورة ٨-٢ تمثل كرات البلياردو نموذجًا جيدًا لسلوك الجسيمات ولكن بمقياس أكبر بكثير.

النموذج الجسيمي نموذج جهري، وأفكارنا عن الجسيمات تأتي ممّا نلاحظه على المقياس الجهري (العياني) عندما نسير في الشارع، أو نراقب حركة النجوم والكواكب، أو نتعامل مع العربات والكرات في المختبر، ولكن ما الذي يمكن أن نفسره أيضًا باستخدام النموذج الجسيمي؟

تكمن أهمية النموذج الجسيمي في أنه يُمكننا تطبيقه على العالم المجهري، ويمكّننا من تفسير المزيد من الظواهر.

يمكننا أن نتخيّل جزيئات الغاز على أنها جسيمات صغيرة صلبة، تندفع وترتد عشوائيًا بعضها عن بعض وعن جدران الوعاء الذي يحتويها؛ وهذا هو النموذج الحركي للغاز الذي تعمّقنا في دراسته في الصف الحادي عشر، ويمكننا تفسير الظواهر الجهرية (المقياس الأكبر) للضغط ودرجة الحرارة بدلالة كل من الكتل وسرعات الجسيمات المجهرية؛ فالنموذج الجسيمي نموذج قوي جدًا وقد نقّح لتفسير العديد من الجوانب الأخرى لسلوك الغازات.

يبيّن الجدول ٨-١ كيف يمكننا استخدام النموذج الجسيمي لتفسير ظواهر جهرية ووضع تنبؤات علمية في موضوعات معيّنة في العلوم.

الموضوع	النموذج	الظواهر الجهرية
الكهرباء	تدفق الإلكترونات	التيار الكهربائي
الغازات	النظرية الحركية	الضغط ودرجة الحرارة والحجم لغاز ما
المواد الصلبة	المواد البلورية	الخصائص الميكانيكية
النشاط الإشعاعي	النموذج النووي للذرة	الانحلال الإشعاعي وتفاعلات الانشطار والاندماج النووي
الكيمياء	البنية الذرية	التفاعلات الكيميائية

الجدول ٨-١ نماذج جسيمية في بعض موضوعات العلوم.

النموذج الموجي

يستعين الفيزيائيون بالصورة المثالية للموجة وهي على شكل منحنى جيبي، الأمر الذي مكّنهم من التعامل معها رياضيًا؛ فهي صورة مفيدة لأنه يمكن استخدامها لتمثيل بعض الظواهر البسيطة. قد تتكوّن الموجات الأكثر تعقيدًا من عدة موجات بسيطة (وهذا هو مبدأ تراكب الموجات الذي درسناه بالتفصيل في الوحدة السابعة).

الموجات طريقة تنتقل بها الطاقة من مكان إلى آخر، ففي أي موجة يتغير شيء ما بطريقة منتظمة أثناء انتقال الطاقة على طول الموجة، فعلى سبيل المثال في موجات الماء يتحرك سطح الماء إلى الأعلى وإلى الأسفل بشكل دوري في حين تنتقل الطاقة أفقيًا.

يبيّن الجدول ٨-٢ بعض الظواهر التي تُفسَّر باستخدام النموذج الموجي والكمية المتغيرة بانتظام المرتبطة بها.

الظاهرة	الكمية المتغيّرة
الصوت	الضغط (أو الكثافة)
الضوء والموجات الكهرومغناطيسية الأخرى	شدة المجال الكهربائي وكثافة الفيض المغناطيسي
الموجات في الأوتار	الإزاحة

الجدول ٨-٢ نماذج موجية في العلوم.

الخصائص المميزّة للموجات هي أن جميعها تُظهر انعكاسًا وانكسارًا وحيودًا وتداخلًا، وليس للموجات نفسها كتلة أو شحنة كهربائية، ونظرًا إلى أن النموذج الجسيمي يمكن أن يفسّر الانعكاس والانكسار (تخيّل جسيمًا يرتد عن حائط ومركبة تغير اتجاهها عندما تسير من طريق معبّد إلى طريق رملي)، إلا أن الحيود والتداخل هما ما نعتبره خصائص

مميّزة للموجات؛ ولهذا فإذا تمكّنا من ملاحظة الحيود والتداخل، نعلم أننا نتعامل مع موجات (الصورة ٨-٣).

الصورة ٨-٣ محزوز الحيود يحلّل الضوء إلى مكوّناته من الألوان المختلفة، ويمكن أن ينتج تأثيرات مدهشة في الصور الفوتوغرافية.

موجات أم جسيمات؟

يُعدّ النموذج الموجي والنموذج الجسيمي مفيدَين جدًا؛ إذ يمكن من خلالهما تفسير العديد من المشاهدات المختلفة، لكن ما النموذج الذي يجب أن نستخدمه في حالة معيّنة؟ وماذا لو بدا أن كِلا النموذجين يصلحان عندما نحاول تفسير شيء ما؟

هذه هي المشكلة تمامًا مع الضوء التي كافح الفيزيائيون لحلّها لأكثر من قرن، فهل ينتقل الضوء كموجات أم كجسيمات؟

لفترة طويلة سادت فكرة نيوتن بأن الضوء ينتقل كجسيمات، وتمكّن باستخدام هذا النموذج من شرح كل من الانعكاس والانكسار، كما اقترح نموذجه أن الضوء ينتقل في الماء **أسرع** ممّا هو عليه في الهواء، وفي عام 1801م أوضح عالم الفيزياء الإنجليزي توماس يونج (Thomas Young) أن الضوء يُظهِر تأثيرات حيود وتداخلًا لا يمكن لنظرية نيوتن الجسيمية أن تفسرها، كما أظهرت التجارب التي قام بها الفيزيائي الفرنسي ليون فوكو (Léon Foucault) عام 1853م، أن الضوء ينتقل في الماء **أبطأ** ممّا هو عليه في الهواء، وبعد تردد وجد معظم العلماء أن نموذج نيوتن كان في تناقض مباشر مع بعض النتائج التجريبية، لذلك قبلوا فكرة أن الضوء ينتقل كموجات.

الطبيعة الجسيمية للضوء

يسلك الضوء سلوك الموجات، ولكن هل يمكن للضوء أن يسلك سلوك الجسيمات أيضًا؟ الجواب نعم، هناك بعض الأدلة التي ربما تكون بالفعل مألوفة لديك، فإذا وضعت عداد جايجر Geiger بجوار مصدر إشعاع جاما، فستسمع سلسلة من النقرات غير المنتظمة، حيث يكشف العداد أشعة جاما-γ التي هي جزء من الطيف الكهرومغناطيسي، فهي تنتمي إلى عائلة الموجات نفسها مثل الضوء المرئي وموجات الراديو والأشعة السينية (أشعة-X) وغيرها، لذلك فإن الموجات هنا هي التي تتسبب في النقرات الفردية أو المنفصلة، والتي لا يمكن تمييزها من النقرات الناتجة عن جسيمات ألفا-α أو جسيمات بيتا-β، من هنا يمكننا أن نستنتج أن أشعة جاما تسلك سلوك الجسيمات عندما تتفاعل مع جسيمات الغاز داخل عداد جايجر. ويكون هذا التأثير واضحًا جدًا مع أشعة جاما؛ لأنها تقع في الطرف الأعلى طاقة من الطيف الكهرومغناطيسي، ويصعب إظهار التأثير نفسه للضوء المرئي.

الفوتونات

ظاهرة **التأثير الكهروضوئي** Photoelectric effect وتفسير أينشتاين لها أقنعت الفيزيائيين بأن الضوء يمكن أن يسلك سلوك الجسيمات التي سُمّيت فيما بعد **الفوتونات** Photons. وقبل أن نواصل دراسة ظاهرة التأثير الكهروضوئي بالتفصيل، سنحتاج إلى معرفة كيفية حساب طاقة الفوتونات.

لقد استخدم نيوتن كلمة corpuscule وتعني **كريات صغيرة** للجسيمات التي كان يعتقد أن الضوء يتكوّن منها؛ نسمي هذه الكريّات في الوقت الحاضر فوتونات، ويُعتبر أن جميع الإشعاعات الكهرومغناطيسية تتكوّن من فوتونات، والفوتون هو «حزمة من الطاقة» أو كمة من الطاقة الكهرومغناطيسية، **والكمة** Quantum تعني ببساطة كمية منفصلة أو محدّدة من شيء ما. وتعدّ فوتونات أشعة جاما (فوتونات γ) أكثر الفوتونات طاقة، ووفقًا لألبرت أينشتاين الذي بنى أفكاره استنادًا إلى عمل عالم فيزياء ألماني آخر هو ماكس بلانك (Max Planck)، فإن الطاقة (E) **لفوتون واحد** بوحدة الجول (J) ترتبط بالتردد (f) بوحدة الهرتز (Hz) للإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يمثّل جزءٌ منه بالمعادلة:

$$E = hf$$

يسمى الثابت (h) **ثابت بلانك** Planck constant، ووحدته جول ثانية (J s) وله قيمة تجريبية تساوي (6.63×10^{-34} J s)، يُلاحَظ من المعادلة السابقة أن وحدة «جول ثانية» تكافئ «جول لكل هرتز»، وأن طاقة الفوتون تتناسب طرديًا مع تردد الموجات الكهرومغناطيسية.

لذلك فإن الإشعاع عالي التردد يعني أن طاقة فوتوناته عالية.

لاحظ أن المعادلة $E = hf$ تبيّن لنا أيضًا العلاقة بين خاصية جسيمية (طاقة الفوتون E) وخاصية موجية (التردد f) ويُطلق عليها علاقة أينشتاين، وهي تنطبق على جميع الموجات الكهرومغناطيسية.

يرتبط التردد (f) وطول الموجة (λ) للموجة الكهرومغناطيسية بسرعة الموجة (c) بواسطة معادلة الموجة $c = f\lambda$، لذلك يمكننا كتابة هذه المعادلة على النحو الآتي أيضًا:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

حيث (h): ثابت بلانك، و (c): سرعة الضوء في الفراغ، و (λ): طول الموجة.

علاقة أينشتاين:

$$E = hf$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

مصطلحات علمية

التأثير الكهروضوئي Photoelectric effect: تفاعل بين فوتون وإلكترون في فلز ما، حيث يتحرّر الإلكترون من سطح هذا الفلز.

الفوتون Photon: كمة من الطاقة الكهرومغناطيسية.

الكمة Quantum: كمية محددة من شيء ما (الطاقة في هذه الحالة) موجودة بشكل منفصل.

يُلاحَظ من المعادلات أيضًا أن طاقة الفوتون تتناسب عكسيًا مع طول الموجة، ومن هنا فإن فوتون الأشعة السينية (أشعة-X) ذا الطول الموجي القصير طاقته أكبر بكثير من فوتون الضوء المرئي ذي الطول الموجي الكبير نسبيًا.

يمكننا الآن حساب طاقة فوتون-γ، فعادةً ما يكون لأشعة جاما ترددات أكبر من (10^{20} Hz)، وبالتالي فإن طاقة فوتون-γ تكون أكبر من ($6.63 \times 10^{-34} \times 10^{20} \approx 10^{-13}$ J)، وهذه كمية صغيرة جدًا من الطاقة، لذلك نحن لا نلاحظ تأثيرات الفوتونات الفردية لأشعة-γ، لكن بعض رواد الفضاء أبلغوا عن رؤيتهم لومضات من الضوء والتي هي عبارة عن فوتونات أشعة-γ عالية الطاقة.

قد تكون طاقة الفوتونات الفردية صغيرة جدًا، ولكن قد يكون المعدل الذي تنبعث به الفوتونات من المصدر هائلًا، سيُوضّح هذا في المثال ١ الذي يدور حول فوتونات الضوء المنبعث من الوصلة الثنائية الضوئية (LED).

مثال

١. تبعث وصلة ثنائية ضوئية (LED) ضوءًا بطول موجة (670 nm)، احسب طاقة الفوتون الواحد لهذا الضوء، ثم احسب معدل انبعاث الفوتونات من هذه الوصلة إذا علمت أن القدرة الإشعاعية للضوء الصادر من الوصلة الثنائية تبلغ (50.0 mW).

سرعة الضوء في الفراغ: $c = 3.00 \times 10^8$ m s^{-1}

ثابت بلانك: $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J s

الخطوة ١: احسب الطاقة (E) لفوتون واحد.

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{670 \times 10^{-9}}$$

$$= 2.97 \times 10^{-19} \text{ J}$$

وتُعدّ طاقة الفوتون هذه صغيرة جدًا.

(تذكّر أن تعوض عن الطول الموجي بوحدة المتر حيث أنّ: 1 nm = 10^{-9} m).

الخطوة ٢: احسب معدل الفوتونات المنبعثة.

معدل الفوتونات المنبعثة هو عدد الفوتونات المنبعثة في الثانية. بالنظر إلى أن القدرة هي إجمالي الطاقة المنتقلة في الثانية، فإن قسمة القدرة على طاقة الفوتون الواحد تجعلنا نحصل على عدد الفوتونات المنبعثة في الثانية.

$$\text{معدل الفوتونات المنبعثة} = \frac{\text{القدرة}}{\text{طاقة الفوتون الواحد}}$$

$$= \frac{50.0 \times 10^{-3}}{2.97 \times 10^{-19}} = 1.68 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$$

(لاحظ أن: 1 mW = 10^{-3} W).

أي أن هناك نحو 1.7×10^{17} فوتونًا ينبعث من الوصلة الثنائية الضوئية (LED) في الثانية الواحدة، وهو عدد كبير جدًا من الفوتونات.

أسئلة

للإجابة عن الأسئلة من ١ إلى ٤، ستحتاج إلى هذه القيم:

سرعة الضوء في الفراغ: $c = 3.00 \times 10^8$ m s^{-1}؛

ثابت بلانك: $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J s.

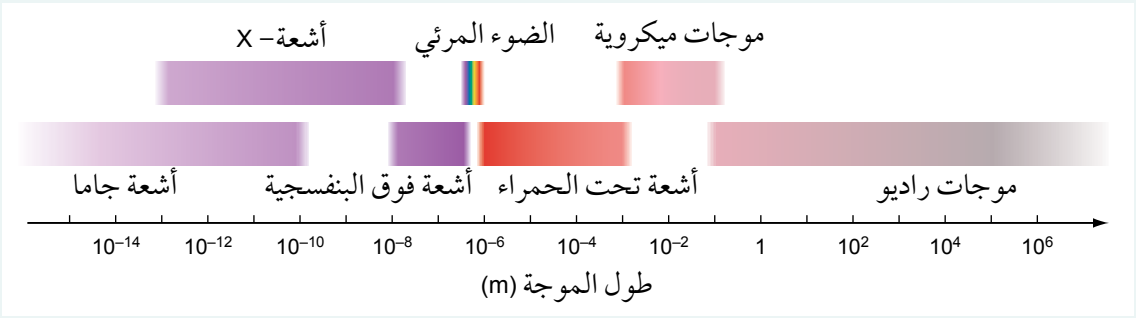
(١) احسب طاقة فوتون-γ عالي الطاقة الذي تردده (1.0×10^{26} Hz).

(٢) الأطوال الموجية للضوء المرئي في المدى (400 nm) (بنفسجي) إلى (700 nm) (أحمر). احسب طاقة فوتون من الضوء الأحمر وفوتون من الضوء البنفسجي.

(٣) احسب طول الموجة للموجات الكهرومغناطيسية لكل فوتون من (أ) إلى (هـ) فيما يأتي، ثم استخدم الشكل ٨-١ لتحديد المنطقة في الطيف الكهرومغناطيسي التي ينتمي إليها كل فوتون.
طاقة الفوتونات هي:

أ. 10^{-12} J
ب. 10^{-15} J
ج. 10^{-18} J
د. 10^{-20} J
هـ. 10^{-25} J

(٤) ليزر قدرته (1.0 mW) ينتج ضوءًا أحمرَ طول موجته (6.48×10^{-7} m). احسب عدد الفوتونات التي ينتجها الليزر في الثانية.



الشكل ٨-١ الأطوال الموجية للطيف الكهرومغناطيسي (الحدود بين بعض المناطق غير واضحة).

الإلكترون فولت (eV)

طاقة الفوتون صغيرة جدًا وأقل بكثير من الجول، لذلك فإن الجول ليس مناسبًا كوحدة قياس لطاقة الفوتون؛ لذا نستخدم في فيزياء الكم وحدة طاقة أخرى هي **الإلكترون فولت Electronvolt (eV)**، وذلك عندما نتعامل مع كميات من الطاقة تكون أصغر بكثير من الجول.

عندما ينتقل إلكترون بواسطة فرق جهد يحدث انتقال طاقة؛ فإذا انتقل إلكترون شحنته (1.60×10^{-19} C)، بواسطة فرق جهد (1 V)، فإن الشغل المبذول (أو الطاقة المنتقلة) (W) يُعطى بواسطة العلاقة:

$$W = QV = 1.60 \times 10^{-19} \times 1 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

وهذا المقدار من الطاقة يساوي واحد إلكترون فولت، لذلك فإن:

الإلكترون فولت الواحد (1 eV) هو الطاقة التي يكتسبها إلكترون عندما ينتقل بواسطة فرق جهد مقداره واحد فولت.

لذلك:

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

مصطلحات علمية

الإلكترون فولت Electronvolt (eV): الطاقة التي يكتسبها إلكترون عندما ينتقل بواسطة فرق جهد مقداره (1 V).

مهمّ

- للتحويل من (eV) إلى (J) اضرب في (1.60×10^{-19}).
- للتحويل من (J) إلى (eV) اقسم على (1.60×10^{-19}).

وبالتالي عندما يتحرك إلكترون بواسطة فرق جهد (1 V)، فإن (1 eV) من الطاقة يكتسبها هذا الإلكترون أو تُنقل إليه، أو عندما تتحرك خمسة إلكترونات خلال فرق جهد مقداره (10 V)، فإن الطاقة الكلية المكتسبة تساوي (50 eV) وهكذا.

عندما يُسرّع جسيم مشحون إلى سرعة (v)، بواسطة فرق جهد (V) فإن طاقة حركته تزداد، وبالنسبة إلى إلكترون (شحنته e) الذي يسرّع من السكون بواسطة فرق جهد (V)، فإنه يمكننا أن نكتب:

$$eV = \frac{1}{2} m v^2$$

حيث (v) سرعة الإلكترون النهائية.

بإعادة ترتيب المعادلة نحصل على سرعة الإلكترون:

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

تنطبق هذه المعادلة على أي نوع من الجسيمات المشحونة، بما في ذلك البروتونات (الشحنة e+) والأيونات.

أسئلة

للإجابة عن الأسئلة من ٥ إلى ٧ ستحتاج إلى هذه القيم:

سرعة الضوء في الفراغ: $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

ثابت بلانك: $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$

٥ ينتقل إلكترون عبر خلية قوتها الدافعة الكهربائية (1.2 V)، احسب الطاقة المنقولة إلى الإلكترون، واكتب إجابتك بوحدَتي الإلكترون فولت (eV) والجول (J).

٦ احسب الطاقة بوحدة (eV) لفوتون أشعة-X (الأشعة السينية) الذي تردده ($3.0 \times 10^{18} \text{ Hz}$).

٧ مستعينًا بالعمليات الحسابية، حدّد المنطقة من الطيف الكهرومغناطيسي (الشكل ٨-١) التي ينتمي إليها فوتون طاقته (10 eV).

٨ يتسارع بروتون من السكون بواسطة فرق جهد مقداره (1500 V). شحنة البروتون ($+1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$) وكتلته ($1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$)؛ احسب:

أ. طاقة حركته النهائية بوحدة الجول (J).

ب. سرعته النهائية.

مهارة عملية ٨-١

تقدير ثابت بلانك *h*

يمكنك الحصول على تقدير لقيمة ثابت بلانك *h* عن طريق تجربة بسيطة تُستخدم فيها وصلات ثنائية ضوئية (LED) بألوان مختلفة (الصورة ٨-٤) (الوصلة الثنائية الضوئية وهي مكوّن كهربائي يعمل باتجاه واحد فقط هو (الاتجاه الأمامي)). عندما تكون الوصلة الثنائية الضوئية (LED) موصلة في دائرة كهربائية بحيث تقوم بتوصيل تيار كهربائي، يشار إليه على أنه متصل في **الانحياز الأمامي forward bias**، والوصلة الثنائية تتطلب حدًا أدنى من فرق الجهد الكهربائي يُعرف **بجهد العتبة Threshold voltage**، ليطبق على الوصلة بهذا الاتجاه قبل أن تسمح الوصلة للتيار الكهربائي بالمرور عبرها.

تعتمد هذه التجربة على حقيقة أن مصابيح الوصلات الثنائية الضوئية ذات الألوان المختلفة لها قيم مختلفة لجهد العتبة.

- تعطي الوصلة الثنائية الضوئية (LED) الباعثة للضوء الأحمر فوتونات منخفضة الطاقة؛ فهي تتطلب جهد عتبة منخفضًا لجعلها في حالة توصيل.
- تعطي الوصلة الثنائية الضوئية (LED) الباعثة للضوء الأزرق فوتونات عالية الطاقة؛ فهي تتطلب جهد عتبة مرتفعًا لجعلها في حالة توصيل.

تابع

الصورة ٨-٤ الوصلات الثنائية الضوئية (LED) تأتي بألوان مختلفة.

ما الذي يحدث لإنتاج فوتونات من الضوء عندما تكون الوصلة الثنائية الضوئية موصلة؟ إن أبسط طريقة للتفكير في ذلك هي القول بأن الطاقة الكهربائية لإلكترون واحد يمر عبر الوصلة الثنائية تنتقل لتصبح طاقة فوتون واحد.

لذلك:

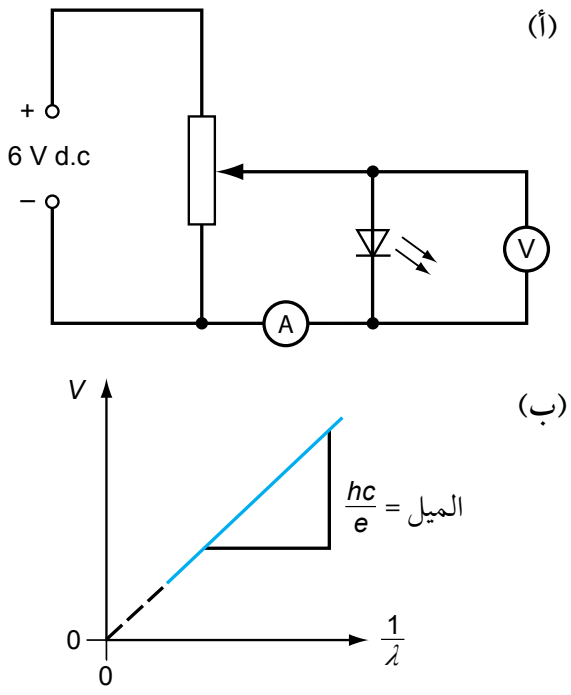
الطاقة المنقولة بواسطة الإلكترون = طاقة الفوتون

$$eV = \frac{hc}{\lambda}$$

حيث (V): جهد العتبة للوصلة الثنائية الضوئية، وقيم الثوابت (e) و (c) هي القيم المعروفة لشحنة الإلكترون وسرعة الضوء على التوالي، تسمح لك قياسات كل من (V) و (λ) بحساب (h)؛ لذلك القياسات المطلوبة هي:

- فرق الجهد الكهربائي (V) بين طرفَي الوصلة الثنائية الضوئية عندما تبدأ بتوصيل التيار الكهربائي (عند جهد العتبة لها)، يمكن الحصول عليه باستخدام دائرة مثل المبيّنة في الشكل ٨-٢ (أ).
- طول الموجة (λ) للضوء المنبعث من الوصلة الثنائية، يمكن الحصول عليه من خلال القياسات باستخدام تجربة محزوز الحيود أو من طول الموجة المكتوب من قبل الشركة المصنّعة للوصلة الثنائية الضوئية.

في حالة توفر عدة وصلات ثنائية بألوان مختلفة، فإن (V) و (λ) يمكن تحديدها لرسم تمثيل بياني لـ (V) مقابل $\frac{1}{\lambda}$ (انظر الشكل ٨-٢ ب). يمر خط التمثيل البياني عبر نقطة الأصل ويكون ميله $\frac{hc}{e}$، وبالتالي يمكن تقدير قيمة (h).



الشكل ٨-٢ (أ) دائرة كهربائية لتحديد جهد العتبة المطلوب لجعل الوصلة الثنائية الضوئية في حالة توصيل أمامي. يساعد الأميتر في إظهار متى يحدث ذلك، (ب) التمثيل البياني المستخدم لتحديد قيمة *h* من هذه التجربة.

مصطلحات علمية

جهد العتبة **Threshold voltage**: الحد الأدنى لفرق الجهد عبر الوصلة الثنائية الضوئية (LED) عندما تبدأ بالتوصيل وبعث الضوء.

سؤال

(٩) أُستُخدمت في تجربة لتحديد ثابت بلانك (h) وصلات ثنائية ضوئية ذات ألوان مختلفة، وحُدّد الجهد المطلوب لجعل كل من هذه الوصلات في حالة توصيل، وأُخذ طول الموجة للضوء من كُتيّب الشركة المصنّعة، والنتائج مبيّنة في الجدول ٨-٣ لكل وصلة ثنائية. احسب القيمة التجريبية لثابت بلانك (h)، ثم حدّد متوسط قيمة ثابت بلانك.

لون الوصلة الثنائية	طول الموجة (10^{-9} m)	جهد العتبة (V)
الأشعة تحت الحمراء	910	1.35
الضوء الأحمر	670	1.70
الضوء الكهرماني (amber)	610	2.00
الضوء الأخضر	560	2.30

الجدول ٨-٣ نتائج من تجربة ما لتحديد قيمة h.

٨-٢ التأثير الكهروضوئي

ظاهرة انطلاق إلكترونات من سطح فلزي عندما يُسلط عليه ضوء مناسب تسمى بالتأثير الكهروضوئي، إذ أنّ الكلمة اليونانية للضوء هي فوتو (photo)، من هنا جاءت كلمة 'photoelectric' أي «كهروضوئي»، وغالبًا ما تُعرف الإلكترونات التي يتم إزالتها من اللوح الفلزي بهذه الطريقة باسم الإلكترونات الضوئية.

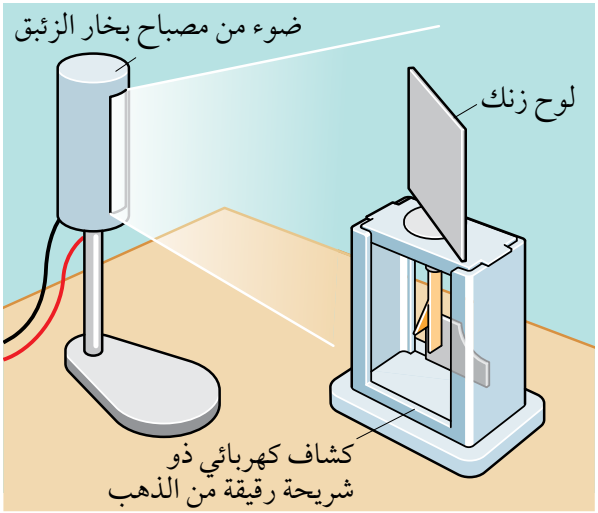
يمكن ملاحظة التأثير الكهروضوئي من خلال الأداة الموضحة في المهارة العملية ٨-٢، حيث يُسلّط الضوء من مصباح على لوح فلزي سالب الشحنة فتنبعث منه بعض الإلكترونات الموجودة في الفلز، وتفسير ذلك بسيط وهو أن الضوء عبارة عن موجات تحمل طاقة، وهذه الطاقة تحرّر إلكترونات من سطح الفلز، ومع ذلك فهناك ملاحظات دقيقة حول هذه الظاهرة كان من الصعب تفسيرها في البداية وخاصة أن هناك حدًا أدنى لتردد الضوء الساقط لا يمكن لظاهرة التأثيرالكهروضوئي أن تلاحظ عند قيم أقل منه.

مهارة عملية ٨-٢

ملاحظة التأثير الكهروضوئي

يمكنك ملاحظة التأثير الكهروضوئي بنفسك بواسطة تثبيت لوح زنك نظيف في الجزء العلوي من كشاف كهربائي ذي شريحة رقيقة من الذهب (الشكل ٨-٣). اشحن الكشاف الكهربائي بشحنة سالبة لتلاحظ انفراج الرقاقة، ثم سلّط إشعاعًا كهرومغناطيسيًا من مصباح بخار الزئبق على لوح الزنك، وستلاحظ أن انفراج الرقاقة يقل تدريجيًا (يبعث مصباح بخار الزئبق أشعة فوق بنفسجية شديدة)، وتفسير ذلك أن شحن الكشاف أدى إلى زيادة مقدار شحنة الإلكترونات عليه، ثم وبطريقة ما فقد ساعد الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من مصباح بخار الزئبق الإلكترونات على التحرر من سطح الفلز، لذا يقل عدد الإلكترونات على الشريحة الرقيقة فيقل الانفراج.

يؤدي تقريب مصباح بخار الزئبق أكثر من الكشاف إلى أن انفراج الشريحة الرقيقة يقل بسرعة أكبر، وهذا ليس مفاجئًا؛ أما إذا أدخلت لوحًا زجاجيًا بين المصباح ولوح الزنك، فإن الإشعاع الصادر من المصباح لن يبقى فعّالًا، حيث لا يقل انفراج شريحة الذهب الرقيقة؛ فالزجاج يمتص الأشعة فوق البنفسجية التي تُعدّ الجزء الفعال من الإشعاع الصادر عن المصباح.



الشكل ٨-٣ تجربة بسيطة لملاحظة التأثير الكهروضوئي.

تردد العتبة وطول موجة العتبة

إذا حاولت تنفيذ التجربة في المهارة العملية ٨-٢ بمصباح ذي فتيل ساطع، فستجد أن ليس له تأثير كهروضوئي، فالمصباح ذو الفتيل لا يصدر أشعة فوق بنفسجية وإنما موجات ذات تردد أقل، وأن هناك حدًا أدنى من التردد الذي يجب أن يكون للإشعاع الساقط من أجل تحرير إلكترونات من الفلز، وهذا التردد يسمى **تردد العتبة** **Threshold frequency**، فتردد العتبة هو خاصية للّوح الفلزي الذي يتعرض للإشعاع الكهرومغناطيسي، ويُعرّف تردد العتبة بأنه أدنى تردد للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط اللازم لتحرير إلكترونات من سطح فلز ما.

مصطلحات علمية

تردد العتبة **Threshold frequency**: أدنى تردد للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط الذي يحرّر إلكترونات من سطح فلز ما.

طول موجة العتبة **Threshold wavelength**: أقصى طول موجة للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط الذي يحرّر إلكترونات من سطح فلز ما.

وبما أن $c = f\lambda$، فهذا يعني أن تردد العتبة يقابله أطول طول موجة يلزم لتحرير إلكترونات من سطح فلز، وطول الموجة هذا يسمى **طول موجة العتبة** **Threshold wavelength**، وهو أقصى طول موجة للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط الذي يحرّر إلكترونات من سطح فلز ما.

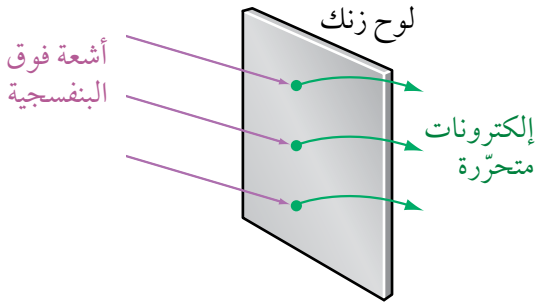
لقد وجد الفيزيائيون صعوبة في تفسير تأثير الأشعة فوق البنفسجية ضعيفة الشدة على الإلكترونات في الفلز، في حين أن الضوء الساطع جدًا ذا التردد المنخفض لم يكن له أي تأثير، وقد تخيّلوا أن موجات الضوء عندما تصل إلى الفلز تنتشر على سطحه، ولم يتمكنوا من تفسير أن الموجات فوق البنفسجية منخفضة الشدة يمكن أن تكون أكثر فاعلية من موجات الضوء المرئي الشديدة، حتى توصل ألبرت أينشتاين في عام 1905 م إلى تفسير يعتمد على فكرة الفوتونات.

تحتوي الفلزات (مثل الزنك) على إلكترونات ضعيفة الارتباط داخل الفلز وتسمّى إلكترونات التوصيل، وهي حرّة في التحرّك داخل الفلز؛ فعندما تصطدم فوتونات الإشعاع الكهرومغناطيسي بالفلز، تتحرّر بعض الإلكترونات من سطحه (الشكل ٨-٤)، فهي تحتاج إلى كمية صغيرة من الطاقة فقط (10^{-19} J تقريبًا) للتحرر من سطح الفلز.

مصطلحات علمية

(طاقة) دالة الشغل **Work function (energy)**: أدنى طاقة يحتاج إليها إلكترون للتحرر من سطح فلز ما.

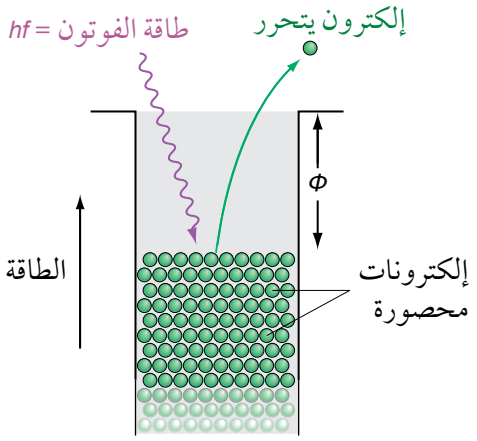
دالة الشغل (وكذلك تردد العتبة وطول موجة العتبة) هي خاصية للفلز.



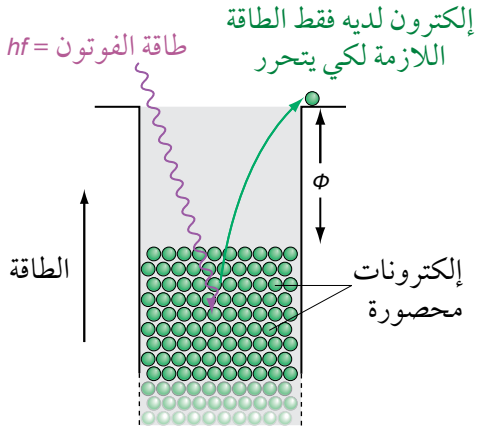
الشكل ٨-٤ التأثير الكهروضوئي يحدث عندما يصطدم فوتون من الأشعة فوق البنفسجية باللوح الفلزي، وتكون طاقته كافية لتحرير إلكترون.

يمكننا تصوّر الإلكترونات كأنها محصورة في «بئر» طاقة (الشكل ٨-٥)، ويحتاج الإلكترون الواحد إلى حدّ أدنى من الطاقة (Φ) (الحرف اليوناني فاي) للتحرر من سطح الفلز. **طاقة دالة الشغل** **Work function energy**، أو ببساطة

دالة الشغل Work function لفلز ما هي أدنى كمية طاقة يحتاج إليها إلكترون ما للتحرر من سطح الفلز. هناك حاجة إلى هذه الطاقة لتحرير إلكترونات السطح؛ لأن هذه الإلكترونات منجذبة إلى الفلز بواسطة القوى الكهروستاتيكية الناتجة عن أيونات الفلز الموجبة.



الشكل ٨-٥ قد يتفاعل فوتون واحد مع إلكترون واحد لتحريره وانطلاقه بطاقة حركة عظمى.



الشكل ٨-٦ يحتاج الإلكترون المرتبط بشدة في أسفل سطح الفلز إلى مزيد من الطاقة لتحريره من الفلز.

افترض أينشتاين أن الموجات الكهرومغناطيسية لا تتفاعل مع جميع الإلكترونات في الفلز، بل أن فوتونًا واحدًا يمكن أن يوفّر الطاقة التي يحتاج إليها إلكترون واحد للتحرر، ويجب أن تكون طاقة الفوتون على الأقل بمقدار (Φ) نفسها. وقد تمكن أينشتاين بهذه الطريقة أن يشرح تردد العتبة، فطاقة فوتون الضوء المرئي أقل من الطاقة التي تلزم الإلكترون للتحرر (Φ) من سطح الفلز، لذلك لا يمكنه تحرير إلكترون من سطحه.

عندما يصل فوتون إلى اللوح الفلزي فقد يمتّصه أحد الإلكترونات ويكتسب كل طاقة الفوتون فلا يعود الفوتون موجودًا. ويحتاج الإلكترون إلى بعض هذه الطاقة للتحرر من بئر الطاقة، أما الباقي فسيكون طاقة حركة للإلكترون.

يمكننا الآن أن نرى فاعلية نموذج الفوتون للضوء في نمذجة الموجات الكهرومغناطيسية على أنها «حزم» مركّزة من الطاقة، كل واحدة منها قادرة على تحرير إلكترون من الفلز.

فيما يأتي بعض القواعد الخاصة بالتأثير الكهروضوئي:

- تُحرّر الإلكترونات من سطح الفلز.
- يمكن لفوتون واحد فقط أن يتفاعل مع إلكترون واحد، وبالتالي يتبادل طاقته معه (تفاعل واحد لواحد).
- يتحرّر الإلكترون السطحي **لحظيًا** (مباشرة من دون تأخير وفي اللحظة نفسها) من السطح الفلزي عندما تكون طاقة الفوتون الساقط **أكبر من أو تساوي** دالة الشغل (Φ) للفلز (تردد الإشعاع الساقط **أكبر من أو يساوي** تردد العتبة للفلز، كما يمكن القول إن طول الموجة للإشعاع الساقط **أقل من أو يساوي** طول موجة العتبة للفلز).
- يجب أن تكون الطاقة محفوظة عندما يتفاعل الفوتون مع الإلكترون.
- عندما يكون تردد الإشعاع الساقط أقل من تردد العتبة، فإن زيادة شدة الإشعاع لن تحرر أي إلكترون؛ إذ تتناسب شدة الإشعاع الساقط طرديًا مع معدل الفوتونات التي تصل إلى اللوح، ولكن تبقى طاقة كل فوتون أقل من دالة الشغل.

أظهرت التجارب الكهروضوئية أن للإلكترونات التي تتحرّر مدًى من طاقات الحركة قد تصل بعضها إلى قيمة قصوى $K.E_{max}$، والإلكترونات الأسرع حركة هي تلك التي تكون أقل ارتباطًا في الفلز.

تخيّل أن فوتونًا واحدًا يتفاعل مع إلكترون سطحي واحد ويحرّره؛ فوفقًا لأينشتاين تكون:

طاقة الفوتون = دالة الشغل + طاقة الحركة القصوى للإلكترون

$$hf = \Phi + K.E_{max}$$

$$hf = \Phi + \frac{1}{2} mv^2_{max}$$

حيث (hf): طاقة الفوتون، و (Φ): دالة الشغل للفلز، و $\frac{1}{2} mv^2_{max}$: طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي المنبعث.

تُعرف هذه المعادلة باسم **معادلة أينشتاين للكهروضوئية** **Einstein's photoelectric equation**، ويمكن كتابتها على النحو الآتي أيضًا:

$$\frac{hc}{\lambda} = \Phi + \frac{1}{2} mv^2_{max}$$

معادلة أينشتاين للكهروضوئية:

$$hf = \Phi + \frac{1}{2} mv^2_{max}$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \Phi + \frac{1}{2} mv^2_{max}$$

يمكن فهم المعادلة الكهروضوئية كما يأتي:

- نبدأ بفوتون ساقط طاقته (hf).
- يُمتص الفوتون بواسطة إلكترون ويكتسب طاقته.
- بعض الطاقة تستخدم لتحرير إلكترون من الفلز (Φ)، ويستخدم الباقي (إن وُجِد) كطاقة حركة للإلكترون.
- إذا تم امتصاص فوتون ما من قِبل إلكترون في منطقة منخفضة من بئر الطاقة فإن الإلكترون المتحرّر سيكون له طاقة حركة أقل من $K.E_{max}$ أو بدون طاقة حركة (الشكل ٨-٦).

ماذا يحدث عندما يكون للإشعاع الساقط تردد يساوي تردد العتبة (f_0) للفلز؟

عندها تكون طاقة الحركة للإلكترون صفرًا، لذلك وفقًا لمعادلة أينشتاين للكهروضوئية:

$$hf_0 = \Phi$$

ومن هنا يمكن التعبير عن تردد العتبة (f_0) من خلال المعادلة:

$$f_0 = \frac{\Phi}{h}$$

ويُعطى طول موجة العتبة (λ_0) من خلال المعادلة:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\Phi}$$

ماذا يحدث عندما يسقط إشعاع تردده أقل من تردد العتبة؟

يكون بإمكان الفوتون الواحد أن يعطي طاقته لإلكترون واحد، ولكن هذا الإلكترون لا يمكنه التحرر من قوى التجاذب مع أيونات الفلز الموجبة، وتظهر هنا طاقة الفوتونات التي امتصتها الإلكترونات كطاقة حركة للإلكترونات، وتفقد هذه الإلكترونات طاقة حركتها لأيونات الفلز عندما تتصادم معها، فيسخّن الفلز، فعلى سبيل المثال يسخن اللوح الفلزي الموضوع بالقرب من مصباح طاولة.

للفلزات المختلفة ترددات عتبة مختلفة، وبالتالي دوّال شغل مختلفة؛ فعلى سبيل المثال الفلزات القلوية مثل الصوديوم والبوتاسيوم والروبيديوم لها ترددات عتبة في المنطقة المرئية من الطيف الكهرومغناطيسي، أما في الزنك فإن إلكترونات التوصيل ترتبط ارتباطًا قويًا بالفلز، ولهذا يكون له تردد عتبة في منطقة الأشعة فوق البنفسجية من الطيف الكهرومغناطيسي.

يوضح الجدول ٨-٤ تفسير نموذج الفوتون لملاحظات التأثير الكهروضوئي.

الملاحظة	التفسير
يحدث انبعاث الإلكترونات بمجرد سقوط الإشعاع الكهرومغناطيسي المناسب على الفلز.	يتفاعل فوتون واحد مع إلكترون واحد، فإذا كانت طاقة الفوتون الساقط مساوية أو أكبر من دالة الشغل للفلز، فستتحرّر الإلكترونات لحظيًا.
يعدّ الإشعاع الكهرومغناطيسي الضعيف (منخفض الشدة) فعّالًا.	تعني الشدة المنخفضة معدّلًا أقل لسقوط الفوتونات على سطح الفلز، إذ تعتمد طاقة كل فوتون على التردد أو طول الموجة وليس على الشدة. ما دام لكل فوتون طاقة مساوية أو أكبر من دالة الشغل للفلز، فستتحرّر إلكترونات. قد تعني الشدة المنخفضة معدّل انبعاث أقل للإلكترونات.
تؤدي زيادة شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي المناسب إلى زيادة معدل انبعاث الإلكترونات من الفلز.	الشدة الأكبر تعني زيادة معدّل سقوط الفوتونات على سطح الفلز. فإذا جُمعت الإلكترونات المنبعثة كجزء من دائرة خارجية، عندها ستتناسب شدة التيار الكهروضوئي تناسبًا طرديًا مع شدة الإشعاع الساقط، **شريطة أن يتجاوز تردد الفوتونات تردد العتبة للفلز.**
زيادة الشدة ليس لها تأثير على طاقة الحركة للإلكترونات.	الشدة الأكبر لا تعني أن الفوتونات لها طاقة أعلى، لذلك لا يمكن للإلكترونات أن تمتلك طاقة حركة أكبر، فطاقة الحركة القصوى للإلكترونات تُعطى بالعلاقة: $K.E_{max} = hf - \Phi$؛ ولذلك فهي لا تعتمد عن الشدة.
هناك حاجة إلى أدنى تردد لانبعاث الإلكترونات.	تنبعث الإلكترونات من سطح الفلز عندما يكون للإشعاع الساقط تردد مساوٍ أو أكبر من تردد العتبة.
زيادة تردد الإشعاع الكهرومغناطيسي يزيد من طاقة الحركة القصوى للإلكترونات.	التردد الأعلى يعني فوتونات أعلى طاقة؛ لذلك تكتسب الإلكترونات مزيدًا من طاقة الحركة ويمكن أن تتحرك بشكل أسرع، ومرة أخرى يمكنك استخدام العلاقة: $K.E_{max} = hf - \Phi$ لشرح الملاحظة.

الجدول ٨-٤ نجاح نموذج الفوتون في تفسير ملاحظات التأثير الكهروضوئي.

أسئلة

للإجابة عن الأسئلة من ١٠ إلى ١٣، ستحتاج إلى هذه القيم:

سرعة الضوء في الفراغ: $c = 3.00 \times 10^{8}\ \text{m s}^{-1}$

ثابت بلانك: $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J s}$

كتلة الإلكترون: $m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}$

شحنة الإلكترون: $e = 1.60 \times 10^{-19}\ \text{C}$

(١٠) فوتونات طاقتها (1.0 eV) و (2.0 eV) و (3.0 eV) تسقط على سطح فلزي دالة الشغل له (1.8 eV).

أ. أيّ من هذه الفوتونات يمكن أن تسبب تحرر إلكترون من الفلز؟

ب. احسب طاقات الحركة القصوى للإلكترونات المتحرّرة في كل حالة بوحدة (eV) و (J).

(١١) يبيّن الجدول ٨–٥ دوال الشغل لعدة فلزات مختلفة.

الفلز	دالة الشغل Φ (J)	دالة الشغل Φ (eV)
السيزيوم	3.4×10^{-19}	2.1
الكالسيوم	4.6×10^{-19}	2.9
الذهب	8.2×10^{-19}	5.1
البوتاسيوم	3.7×10^{-19}	2.3
الزنك	6.9×10^{-19}	4.3

الجدول ٨–٥ دوال الشغل لبعض الفلزات المختلفة.

أ. ما الفلز الذي يتطلب أعلى تردد من الموجات الكهرومغناطيسية لتحرير إلكترونات منه؟

ب. ما الفلز الذي سيحرّر إلكترونات عندما يسقط عليه أدنى تردد للموجات الكهرومغناطيسية؟

ج. احسب تردد العتبة للزنك.

د. احسب طول موجة العتبة للبوتاسيوم.

(١٢) سقطت موجات كهرومغناطيسية طولها الموجي (2.4×10^{-7} m) على سطح فلز دالة الشغل له (2.8×10^{-19} J). احسب:

أ. طاقة فوتون واحد.

ب. طاقة الحركة القصوى للإلكترونات المتحرّرة من الفلز.

ج. السرعة القصوى للإلكترونات الضوئية المنبعثة.

(١٣) عند سقوط إشعاع كهرومغناطيسي طول موجته (2000 nm) على سطح فلزي، وُجد أن طاقة الحركة القصوى للإلكترونات المنبعثة تساوي (4.0×10^{-20} J). احسب دالة الشغل للفلز بالجول (J).

٣-٨ للفوتونات كمية تحرّك أيضًا

يقدم التأثير الكهروضوئي دليلًا على أن سلوك الفوتونات شبيه بالجسيمات، فهل هناك أي دليل آخر على هذا النوع من سلوك الإشعاع الكهرومغناطيسي؟ افترض عالم الرياضيات والفلك الألماني يوهان كبلر (Johann Kepler) في عام 1619 م أن الذيل الطويل للمذنب يتجه بعيدًا عن الشمس؛ لأن ضوء الشمس يمارس ضغطًا على هذا الذيل. تبيّن الصورة ٨–٥ ذيل المذنب هياكوتاكي في السماء ليلًا.

الصورة ٨–٥ المذنب هياكوتاكي.

كان كبلر محقًا إلى حد ما في افتراضه، فقد بيّن ألبرت أينشتاين في عام 1905 م كجزء من نظريته النسبية الخاصة أن الفوتون الذي ينتقل في الفراغ له كمية تحرّك على الرغم من عدم وجود كتلة له، فالتدفق المستمر لفوتونات ضوء الشمس الحاملة لكمية تحرّك مسؤولة عن التاثير بضغط (أو قوة) على الأجسام في الفضاء، ويجب أن تأخذ الأقمار الاصطناعية التي تدور حول الأرض أو المسابير الفضائية المرسلة لاستكشاف الكواكب في نظامنا الشمسي بالحسبان

تلك الضغوط الصغيرة التي تؤثر بها الفوتونات الصادمة، فأي قمر اصطناعي يدور حول الأرض سيواجه ضغطًا مقداره ($9\ \mu N\ m^{-2}$) تقريبًا من ضوء الشمس.

بيّن أينشتاين أن كمية التحرّك (p) للفوتون مرتبطة بطاقته (E) من خلال المعادلة:

$$p = \frac{E}{c}$$

حيث (c): سرعة الضوء في الفراغ.

تذكّر أن الطاقة (E) للفوتون تُكتب على النحو الآتي:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{أو} \quad E = hf$$

يبيّن المثال ٢ كيف يمكنك تقدير الضغط الذي تؤثر به الفوتونات عند سقوطها على لوح فلزي.

مثال

٢. يسقط شعاع ليزر قدرته (2.0 mW) عموديًا على لوح فلزي ثابت، مساحة المقطع العرضي للشعاع ($4.0 \times 10^{-6}\ m^2$) وتردد ضوء الليزر يساوي ($4.7 \times 10^{14}\ Hz$). احسب كمية تحرّك الفوتون والضغط الذي يمارسه شعاع الليزر على لوح الفلز. افترض أن اللوح يمتص جميع الفوتونات.

الخطوة ١: احسب كمية التحرّك لكل فوتون.

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 4.7 \times 10^{14}}{3.00 \times 10^{8}}$$

$$= 1.04 \times 10^{-27} \approx 1.0 \times 10^{-27}\ N\ s$$

(ملاحظة: يمكن كتابة الوحدة إما $kg\ m\ s^{-1}$ أو $N\ s$).

الخطوة ٢: احسب عدد الفوتونات الساقطة على اللوح في الثانية.

$$\text{عدد الفوتونات في الثانية} = \frac{\text{القدرة}}{\text{طاقة كل فوتون}}$$

$$= \frac{2.0 \times 10^{-3}}{hf}$$

$$= \frac{2.0 \times 10^{-3}}{6.63 \times 10^{-34} \times 4.7 \times 10^{14}}$$

$$= 6.4 \times 10^{15}\ s^{-1}$$

الخطوة ٣: احسب القوة المؤثرة على اللوح، بافتراض أنه يمكننا استخدام القانون الثاني لنيوتن، ضع في اعتبارك فترة زمنية قدرها (1.0 s).

القوة = معدل التغيّر في كمية تحرّك الفوتونات

= عدد الفوتونات في الثانية × كمية التحرّك لكل فوتون

$$= 6.4 \times 10^{15} \times 1.04 \times 10^{-27}$$

$$= 6.7 \times 10^{-12}\ N$$

الخطوة ٤: احسب الضغط.

$$\text{الضغط} = \frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}}$$

$$= \frac{6.7 \times 10^{-12}}{4.0 \times 10^{-6}} = 1.7 \times 10^{-6}\ Pa$$

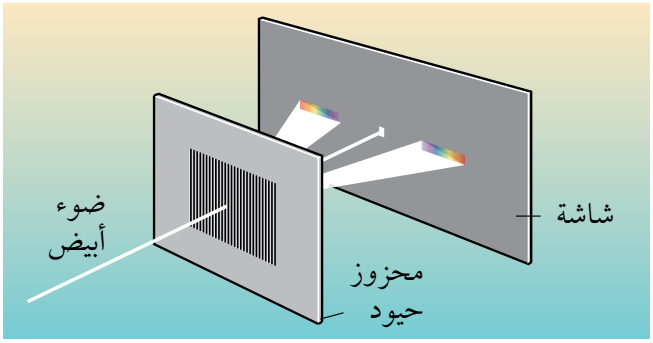
هذا المقدار من الضغط ضئيل مقارنة مع الضغط الجوي الذي يُقدّر بـ 100 kPa، ولن يكون قابلًا للملاحظة على اللوح الفلزي الثابت، ومع ذلك فإذا كان هذا اللوح في الفضاء البعيد، فسيُظهر بعض الحركة بعد مرور فترة من الزمن؛ بسبب عدم وجود أي ضغط جوي.

٨-٤ الأطياف الخطية

سننظر الآن في ظاهرة أخرى نستطيع تفسيرها باعتبار الضوء كفوتونات، فنحن نعتمد كثيرًا على الضوء لنستدل على ما يحيط بنا، إذ يمكننا باستخدام أعيننا التعرّف على العديد من الألوان المختلفة، لكن العلماء ذهبوا إلى أبعد من ذلك من خلال تحليل الضوء بواسطة تجزئته إلى أطياف، ولقد درست سابقًا أن تجزئة الضوء إلى مكوّناته يعرف **بالتشتت**، وقد عرفت بعض الطرائق التي يمكن بواسطتها القيام بذلك، كاستخدام المنشور أو محزوز الحيود (الشكل ٨-٧).

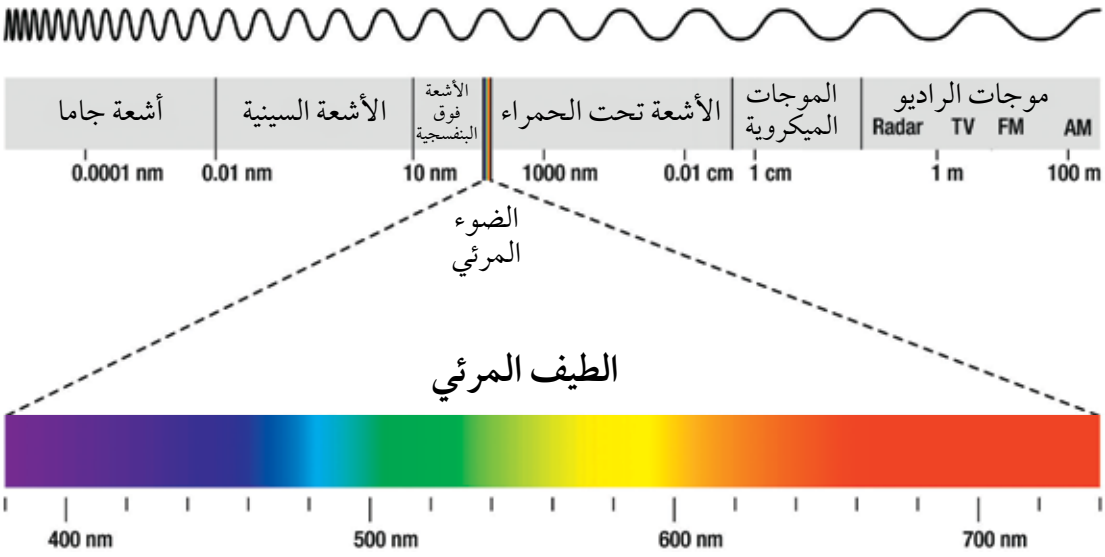
مصطلحات علمية

الطيف المستمر Continuous spectrum: طيف انبعاث يتكوّن من سلسلة متصلة من الأطوال الموجية.



الشكل ٨-٧ يتجزأ الضوء الأبيض إلى طيف مستمر عندما يمر عبر محزوز الحيود.

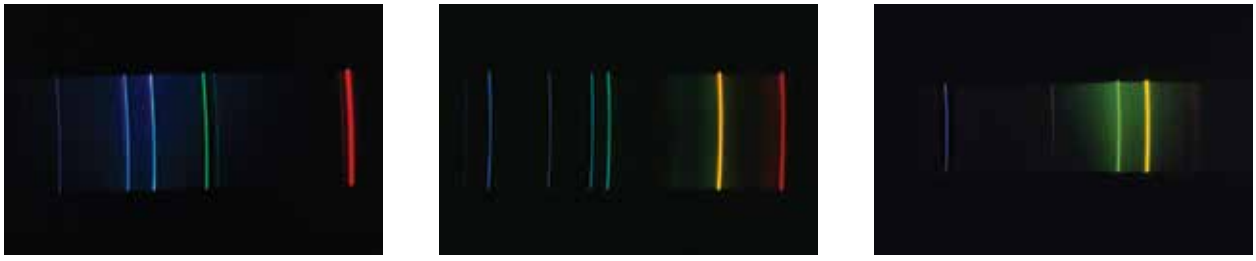
يبيّن طيف الضوء الأبيض أنه يتكوّن من مدى من الأطوال الموجية، من (400 nm) تقريبًا (البنفسجي) إلى (700 nm) تقريبًا (الأحمر)، كما في الشكل ٨-٨، وهذا هو **الطيف المستمر** Continuous spectrum.



الشكل ٨-٨ طيف الضوء الأبيض.

ما يثير الاهتمام أكثر هو عند النظر إلى الطيف من خلال غاز ساخن؛ فإذا نظرت إلى مصباح يحتوي على غاز مثل النيون أو الصوديوم، فإنك سترى أن ألوانًا معيّنة فقط موجودة، وكل لون له طول موجة محدّد؛ وإذا كانت هناك حزمة من الضوء من مصدر ضيق ويُنظر إليه من خلال محزوز حيود، فإنه سيُرى **كطيف خطي**.

تبيّن الصورة ٨-٦ أطياف الغازات الساخنة الخطية لعناصر الزئبق والهيليوم والكادميوم، وكل عنصر له طيف فيه مجموعة محدّدة من الأطوال الموجية، لذلك يمكن استخدام الأطياف الخطية للتعرّف على العناصر، وهذا ما فعله بالضبط عالم الفلك البريطاني ويليام هجينز (William Huggins) عندما استنتج العناصر الأكثر شيوعًا في النجوم.



(أ) (ب) (ج)

الصورة ٨-٦ أطياف الضوء الخطية لكلٍ من: (أ) بخار الزئبق (ب) غاز الهيليوم (ج) بخار الكادميوم.

هذه الأطياف الخطية التي تُظهر مكوّنات الضوء المنبعثة من الغازات الساخنة، تسمى **أطياف الانبعاث الخطي Emission line spectra**.

هناك نوع آخر من الأطياف تسمى **أطياف الامتصاص الخطي Absorption line spectra**، وهي التي تُلاحظ عند مرور الضوء الأبيض من خلال الغازات الباردة. فقد وُجد أنه بعد مرور الضوء من خلال محزوز الحيود، فإن طيف الضوء الأبيض المستمر يكون قد تخلّلته خطوط سوداء (الشكل ٨-٩)، إذ امتُصَّت أطوال موجية معيّنة من الضوء الأبيض في أثناء مروره من خلال الغاز البارد.

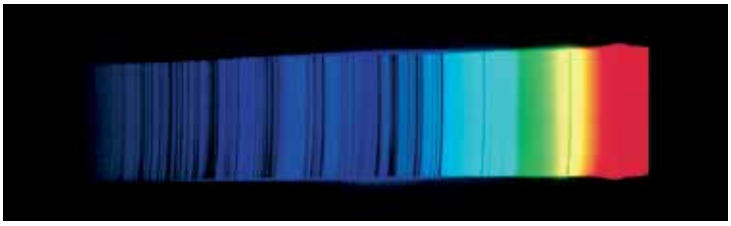
مصطلحات علمية

طيف الانبعاث الخطي Emission line spectrum: طيف بخطوط ملونة ساطعة متوازية ذات أطوال موجية محددة.

طيف الامتصاص الخطي Absorption line spectrum: طيف به خطوط سوداء متوازية ذات أطوال موجية محددة تُرى على خلفية طيف مستمر.

الشكل ٨-٩ طيف امتصاص خطي تشكّل عند مرور الضوء الأبيض عبر بخار الزئبق البارد.

وُجدت أطياف الامتصاص الخطية عند تحليل الضوء القادم من النجوم؛ فالنجم من الداخل ساخن جدًا ويبعث ضوءًا أبيضَ بجميع الأطوال الموجية في النطاق المرئي، إلّا أن هذا الضوء لا بد أن يمر عبر طبقات النجم الخارجية الباردة، ونتيجة لذلك فإن بعض الأطوال الموجية تُمتص، وتبيّن الصورة ٨-٧ طيف الشمس.



الصورة ٨-٧ يُظهر طيف الشمس خطوطًا سوداء، وتظهر هذه الخطوط السوداء عندما تُمتص أطوالٌ موجية معيّنة من الضوء القادم من باطن الشمس الساخن بواسطة غلاف الشمس الجوي الأبرد.

شرح أصل الأطياف الخطية

يمكن لذرات عنصر معيّن (على سبيل المثال الهيليوم) أن تبعث أو تمتص ضوءًا بأطوال موجية معيّنة فقط، والعناصر المختلفة تبعث وتمتص أطوالًا موجية مختلفة. فكيف يمكن أن يحدث هذا؟

لفهم الموضوع نحتاج إلى ذكر نقطتَين:

- أولًا: كما هي الحال مع التأثير الكهروضوئي، فنحن هنا نتعامل مع ضوء (موجات كهرومغناطيسية) والضوء يتفاعل مع المادة، ولذلك نحن بحاجة إلى اعتبار أن الضوء يتكوّن من فوتونات، وبالنسبة إلى ضوء له طول موجة محدّد (λ) وتردد (f)، فإن الطاقة (E) لكل فوتون تُعطى بالمعادلة:

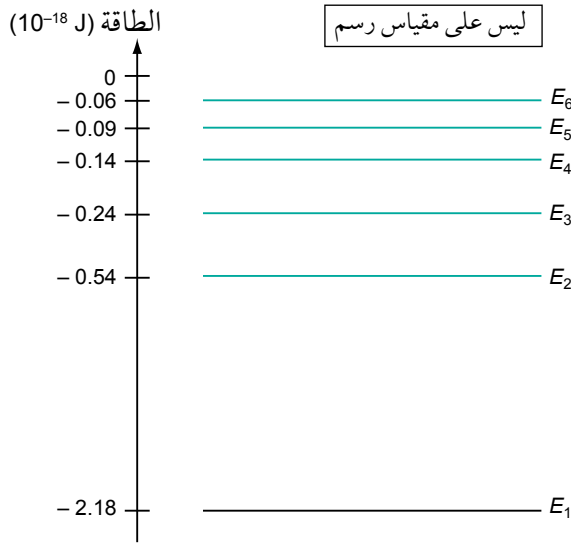
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{أو} \quad E = hf$$

- ثانيًا: عندما يتفاعل الضوء مع المادة، فإن الإلكترونات هي من يمتصّ الطاقة من الفوتونات الساقطة، وعندما تفقد الإلكترونات طاقة، فإن ضوءًا ينبعث من المادة على شكل فوتونات.

ماذا يخبرنا مظهر الأطياف الخطية عن الإلكترونات في الذرات؟

يخبرنا أنه يمكنها أن تمتص أو تبعث فوتونات ذات طاقات معيّنة فقط، من هذا نستنتج أنه يمكن للإلكترونات الموجودة في الذرات أن تمتلك قيمًا ثابتة معيّنة من الطاقة فقط، وقد بدت هذه الفكرة غريبة جدًا للعلماء منذ مئة عام.

يبيّن الشكل ٨-١٠ مخططًا **لمستويات الطاقة Energy levels** (أو **حالات الطاقة Energy states**) المسموح بها للإلكترون في ذرّة الهيدروجين، إذ يمكن أن يكون للإلكترون في ذرّة الهيدروجين قيمة واحدة فقط من قيم الطاقة هذه، ولا يمكنه أن يمتلك طاقة بين مستويات الطاقة تلك. يمكن تشبيه مستويات طاقة الإلكترون بدرجات السلّم، والسبب في ذلك هو أن الإلكترونات يمكن أن يكون لديها فقط طاقة مقابلة لكل مستوى طاقة، مثلما أن شخصًا ما لا يمكنه الوقوف إلّا على ارتفاعات محددة (الدرجات) على سلم ما.



الشكل ٨-١٠ بعض مستويات الطاقة لذرّة الهيدروجين.

لمستويات الطاقة **قيم سالبة**، إذ يجب توفير طاقة خارجية لإزالة إلكترون من الذرّة، وتعني الطاقة السالبة أن الإلكترون محاصر داخل الذرّة بواسطة قوى الجاذبية للنواة الذرّية، والإلكترون بطاقة صفر يكون حرًا من الذرّة.

يُشار إلى طاقة الإلكترون في الذرّة على أنها **مكمّمة Quantised**؛ لأن طاقة الإلكترون يمكنها فقط أن تكون قيمًا منفصلة (محددة)، وهذه واحدة من أهم العبارات في فيزياء الكم.

مصطلحات علمية

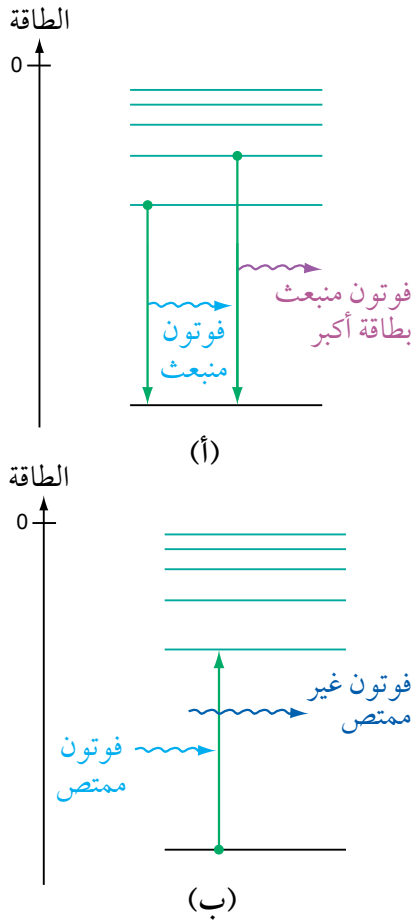
مستويات الطاقة (حالات الطاقة) Energy levels (Energy states): حالات طاقة مكمّمة للإلكترون في الذرة.

مكمّمة Quantised: كمية مكمّمة تعني كمية يمكن ملاحظتها بقيم منفصلة (محددة).

يمكننا الآن شرح ما يحدث عندما تبعث ذرة ضوءًا ما، إذ يسقط أحد إلكتروناتها من مستوى طاقة عالٍ إلى مستوى طاقة أقل (الشكل ٨-١١ أ)، حيث يقوم الإلكترون **بالانتقال Transition** إلى مستوى طاقة أقل، ومن المهم أن نلاحظ أنه حتى على هذا المقياس المجهري فإن الطاقة يجب أن تكون محفوظة، إذ يؤدي فقدان طاقة الإلكترون إلى انبعاث فوتون واحد من الضوء، فقاعدة التفاعل واحد لواحد في فيزياء الكم أمر بالغ الأهمية؛ لأن **انتقال إلكترون واحد مسؤول عن إنتاج فوتون واحد، وطاقة هذا الفوتون تساوي تمامًا فرق الطاقة بين مستويَي الطاقة**، فكلما انتقل الإلكترون من مستوى طاقة أعلى، فإن الطاقة التي يفقدها الإلكترون ستكون أكبر، وهذا يؤدي إلى انبعاث فوتون بطاقة أكبر، فمستويات الطاقة المميّزة للذرّة تعني أن طاقة الفوتونات المنبعثة -وبالتالي الأطوال الموجية المنبعثة- ستكون محددة لتلك الذرّة، وهذا يفسّر سبب وجود أطوال موجية معيّنة فقط في طيف الانبعاث الخطي للغاز الساخن.

ذرات العناصر المختلفة لها أطياف خطية مختلفة؛ لأن بين مستويات طاقتها مسافات مختلفة تعبّر عن فروق الطاقة بينها.

وبالمثل يمكننا شرح أصل أطياف الامتصاص الخطية، إذ يتكوّن الضوء الأبيض من فوتونات عديدة ذات طاقات مختلفة، وحتى يُمتص الفوتون يجب أن يمتلك الطاقة المناسبة تمامًا لرفع الإلكترون من مستوى طاقة معيّن إلى مستوى طاقة آخر أعلى (الشكل ٨-١١ ب). هذا الإلكترون «المثار»، عند مستوى طاقة أعلى، سينتقل في النهاية إلى مستوى طاقة أقل، ولكن هذه المرة، سيعاد إرسال الفوتون بأي اتجاه، وليس بالضرورة بالاتجاه الأصلي للضوء الأبيض، وهذا يؤدي إلى أن شدة الفوتونات ذات طول موجة محدّد ستقل في الاتجاه الأصلي، في حين ستستمر فوتونات الضوء الأبيض ذات الطاقة التي لا تتطابق مع الفرق بين مستويات الطاقة في التحرك بالاتجاه الأصلي، والنتيجة النهائية لكل هذا الأمر هي ظهور خط امتصاص معتم (أسود) على خلفية طيف مستمر.



الشكل ٨-١١ (أ) عندما يسقط إلكترون إلى مستوى طاقة أقل، فإنه يبعث فوتونًا واحدًا. (ب) يجب أن يمتلك الفوتون الطاقة المناسبة تمامًا إذا كان سيُمتص بواسطة إلكترون.

مصطلحات علمية

الانتقال Transition: هو قفزة الإلكترون بين مستويَين من الطاقة.

طاقات الفوتونات

عندما يغيّر الإلكترون طاقته من مستوى (E_1) إلى مستوى آخر (E_2)، فإنه إما أن يبعث فوتونًا واحدًا أو أن يمتصه، وطاقة الفوتون (hf) تساوي ببساطة الفرق في الطاقة بين المستويَين:

$$\text{طاقة الفوتون} = \Delta E$$

$$hf = E_1 - E_2$$

أو

$$\frac{hc}{\lambda} = E_1 - E_2$$

لاحظ أن مقدار الفرق في الطاقة هو فقط ما يهمّنا عادةً عند حساب طاقة فوتون ما، وبالرجوع إلى مخطط مستويات الطاقة للهيدروجين (الشكل ٨-١٠)، يمكنك أن ترى أنه إذا سقط إلكترون من المستوى الثاني إلى أدنى مستوى للطاقة (المعروف باسم **الحالة الأرضية** **ground state** أو المستوى الأول $n = 1$)، فسينبعث منه فوتون طاقته:

مصطلحات علمية

الحالة الأرضية **Ground state**: أدنى حالة (مستوى) طاقة يمكن أن يشغلها إلكترون في ذرّة.

$$\text{طاقة الفوتون} = \Delta E$$

$$hf = ((-0.54) - (-2.18)) \times 10^{-18}\ \text{J}$$

$$= 1.64 \times 10^{-18}\ \text{J}$$

ويمكننا حساب التردد (f) وطول الموجة (λ) للإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من خلال الآتي:

التردد هو:

$$f = \frac{\Delta E}{h}$$

$$= \frac{1.64 \times 10^{-18}}{6.63 \times 10^{-34}}$$

$$= 2.47 \times 10^{15}\ \text{Hz}$$

وطول موجة الضوء المنبعث:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$= \frac{3.00 \times 10^{8}}{2.47 \times 10^{15}}$$

$$= 1.21 \times 10^{-7}\ \text{m} = 121\ \text{nm}$$

طول الموجة هذا يقع في منطقة الأشعة فوق البنفسجية من الطيف الكهرومغناطيسي.

طاقة الفوتون الممتص أو المنبعث نتيجة انتقال الإلكترون بين اثنين من مستويات الطاقة E_1 و E_2 تُعطى بالعلاقة:

$$hf = E_1 - E_2$$

$$\frac{hc}{\lambda} = E_1 - E_2$$

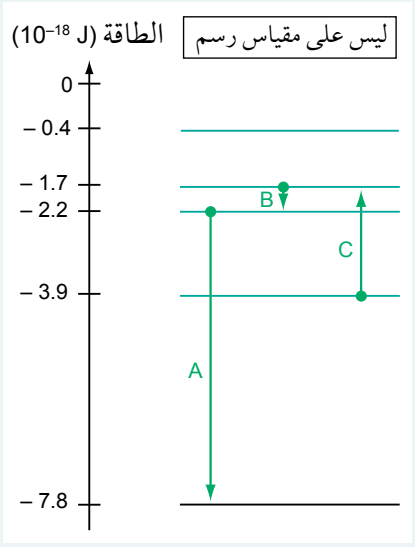
أسئلة

(١٤) يبيّن الشكل ٨–١٢ جزءًا من مخطط مستويات الطاقة للإلكترونات في ذرّة افتراضية، وتمثل الأسهم (A، B، C) ثلاثة انتقالات بين مستويات الطاقة. لكل من هذه الانتقالات:

أ. احسب طاقة الفوتون.

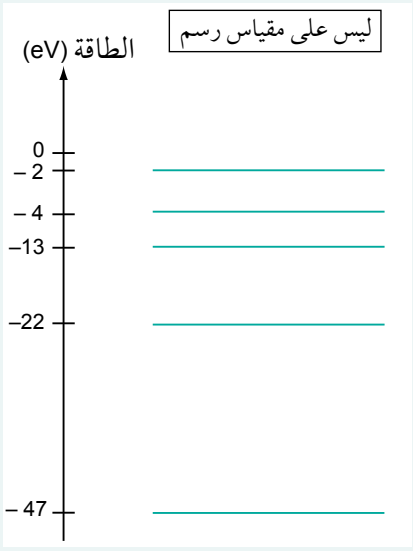
ب. احسب التردد وطول الموجة للإشعاع الكهرومغناطيسي (المنبعث أو الممتص).

ج. اذكر فيما إذا كان الانتقال يُسهم في حدوث طيف انبعاث خطي أم طيف امتصاص خطي.



الشكل ٨–١٢ يبيّن المخطط مستويات الطاقة لثلاثة انتقالات للإلكترون A، B، C.

(١٥) يبيّن الشكل ٨–١٣ مخططًا آخر لمستويات الطاقة، وفي هذه الحالة أُعطيت الطاقة بوحدة الإلكترون فولت (eV).



الشكل ٨–١٣ مخطط مستويات الطاقة.

يبيّن الجدول ٨–٦ طاقات بعض الفوتونات:

45 eV	34 eV	25 eV	20 eV	11 eV	9.0 eV	6.0 eV

الجدول ٨–٦

اذكر أيًا من هذه الفوتونات ستمتصه الإلكترونات واشرح السبب.

(١٦) وُجد أن الطيف الخطي لنوع معيّن من الذرات يتضمن الأطوال الموجية الآتية:

83 nm، 50 nm، 25 nm

أ. احسب طاقات الفوتون لكل طول موجي بوحدة (eV).

ب. ارسم مخطط مستويات الطاقة التي يمكن أن تؤدي إلى ظهور هذه الفوتونات، ثم أشر على المخطط إلى انتقالات الإلكترون المسؤولة عن هذه الخطوط الطيفية الثلاثة (اعتبر المستوى الأرضي 59.7 eV–).

٨-٥ ثنائية (ازدواجية) الموجة والجسيم

لشرح التأثير الكهروضوئي، يجب أن نستخدم فكرة أن الضوء (وجميع الإشعاعات الكهرومغناطيسية) تسلك سلوك الجسيمات (فوتونات)، وبالمثل تشرح الفوتونات أيضًا مظهر الأطياف الخطية، ولكن لشرح الحيود والتداخل، فإنه يجب أن نستخدم النموذج الموجي، فكيف يمكننا حلّ هذه المعضلة؟

يجب أن نستنتج مما سبق أن الضوء يسلك سلوك الموجة، وفي أوقات أخرى يسلك سلوك الجسيمات. على وجه الخصوص عندما يُمتص الضوء من قبل سطح فلزي فإنه يسلك سلوك الجسيمات، إذ تُمتص الفوتونات الفردية

بواسطة إلكترونات فردية في الفلز. وبطريقة مماثلة، عندما يكشف عداد جايجر إشعاع جاما (إشعاع-γ)، نسمع نقرات الفوتونات الفردية لإشعاع-γ وهي تُمتص في أنبوب عدّاد جايجر.

إذًا ما الضوء؟ هل هو موجة أم جسيم؟ اتفق الفيزيائيون على مصطلح **الطبيعة الثنائية (المزدوجة)** للضوء، وهذه الثنائية تشير إلى ثنائية الموجة والجسيم للضوء، بعبارات بسيطة:

- يتفاعل الضوء كجسيم (الفوتون) مع المادة (مثل الإلكترونات)، ومن الأدلة على ذلك ظاهرة التأثير الكهروضوئي.
- ينتشر الضوء عبر الفضاء كموجة، ويأتي الدليل على ذلك من حيود الضوء وتداخله باستخدام الشقوق.

موجات الإلكترونات

للضوء -كما لجميع الإشعاعات الكهرومغناطيسية- طبيعة ثنائية.

هل من الممكن أن تكون للجسيمات مثل الإلكترونات طبيعة ثنائية أيضًا؟ بحث في هذا السؤال المثير للاهتمام لأول مرة العالم لويس دي بروي (Louis de Broglie) في عام 1924 م (الصورة ٨-٨).

الصورة ٨-٨ قدّم لويس دي بروي وجهة نظر بديلة لسلوك الجسيمات.

تخيّل دي بروي أن الإلكترونات تنتقل عبر الفضاء كموجة، واقترح أن الخاصية الموجية للجسيم مثل الإلكترون يمكن التعبير عنها بطول موجته (λ) والتي ترتبط بكمية تحرك الجسيم (p) من خلال المعادلة:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

حيث (h): ثابت بلانك، يشار إلى طول الموجة (λ) غالبًا بمسمّى **طول موجة دي بروي De Broglie wavelength**، ويشار إلى الموجات المصاحبة للإلكترون بمسمّى موجات المادة.

كمية التحرّك (p) لجسيم ما، هي حاصل ضرب كتلته (m) وسرعته (v)، لذلك فإن معادلة دي بروي يمكن كتابتها على النحو الآتي أيضًا:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

ثابت بلانك (h) هو الثابت نفسه الذي يظهر في المعادلة $E = hf$ لطاقة الفوتون، ويمكنك ملاحظة أن ثابت بلانك يشترك مع سلوك كل من المادة كموجات (مثل الإلكترونات) والموجات الكهرومغناطيسية كـ «جسيمات» (فوتونات).

مصطلحات علمية

طول موجة دي بروي De Broglie wavelength: طول الموجة المصاحب لجسيم متحرك، يعطى بالمعادلة:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

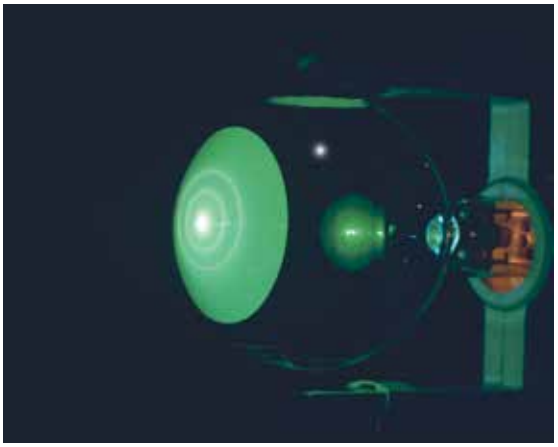
تم تأكيد الخاصية الموجية للإلكترونات في النهاية عام 1927 م من قبل باحثين في أمريكا وفي انجلترا؛ فالأمريكيان كلينتون دافيسون (Clinton Davisson) وإدموند جيرمر (Edmund Germer) أثبتا تجريبيًا أن الإلكترونات تحيد بواسطة بلورات النيكل، وبحيود الإلكترونات تأكّدت خصائصها الموجية؛ وفي تجربة أخرى قام بها جورج توسون (George Thomson) في إنجلترا حين قذف إلكترونات على صفائح رقيقة من فلز في أنبوب مفرّغ، فقدم دليلًا آخر على حيود الإلكترونات عن ذرات الفلز أيضًا.

حصل لويس دي بروي على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1929م، وتشارك كلينتون دافيسون وجورج تومسون جائزة نوبل في الفيزياء عام 1937م.

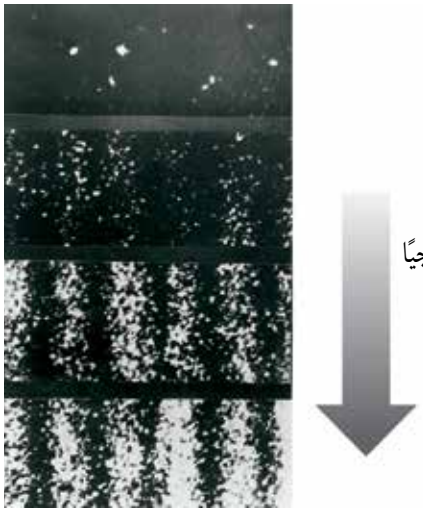
حيود الإلكترونات

يمكننا الحصول على نتائج الحيود نفسها كدافيسون وتومسون في المختبر باستخدام أنبوب حيود الإلكترونات (الصورة ٨-٩)، إذ تسرّع الإلكترونات من الفتيل المسخّن في أنبوب حيود الإلكترونات إلى سرعات عالية بواسطة تطبيق فرق جهد كهربائي عالٍ بين المهبط المسخّن السالب (الكاثود) وقطب المصعد الموجب (الأنود)، فتمرّ حزمة من الإلكترونات عبر عيّنة رقيقة من الجرافيت متعدّد البلورات، وتتكوّن هذه العيّنة من العديد من البلورات الصغيرة، كل منها يتكوّن من أعداد كبيرة من ذرات الكربون (الجرافيت) مرتبة في طبقات ذرّية منتظمة. ثم تنفذ الإلكترونات من شريحة الجرافيت وينتج عنها حلقات حيود على شاشة الفوسفور، تشبه تلك التي ينتجها الضوء (الموجات) الذي يمر عبر ثقب دائري. لا يمكن تفسير الحلقات بدلالة السلوك الجسيمي للإلكترونات؛ لأن الحيود خاصية للموجات، لذلك لا يمكن تفسير الحلقات إلا إذا كانت الإلكترونات تنتقل عبر شريحة الجرافيت كموجات، إذ تحيد الإلكترونات بواسطة ذرات الكربون الفردية والمسافات بين طبقات ذرات الكربون، فتسلك الطبقات الذرية للكربون سلوك محزوز الحيود عديد الشقوق، فتُظهر الإلكترونات تأثيرات الحيود؛ لأن طول موجة دي بروي (λ) يساوي تقريبًا المسافات بين الطبقات الذرّية.

تظهر هذه التجربة أن الإلكترونات تبدو وكأنها تنتقل كموجات، وإذا نظرنا عن قرب إلى نتائج التجربة، وجدنا شيئًا أكثر إثارة للدهشة، وهو أن الشاشة الفسفورية تعطي وميضًا من الضوء لكل إلكترون يصطدم بها، وتتراكم هذه الومضات لتعطي نمط الحيود (الصورة ٨-١٠)، لكن إذا كنا نرى ومضات في نقاط معيّنة على الشاشة، فهل نحن نرى إلكترونات فردية؟ وبعبارة أخرى، هل نحن نلاحظ جسيمات؟



الصورة ٨-٩ عندما تمر حزمة من الإلكترونات عبر شريحة رقيقة من الجرافيت، كما هي الحال في الأنبوب المفرغ هذا، فإن نمط حيود ينتج على شاشة الفوسفور.

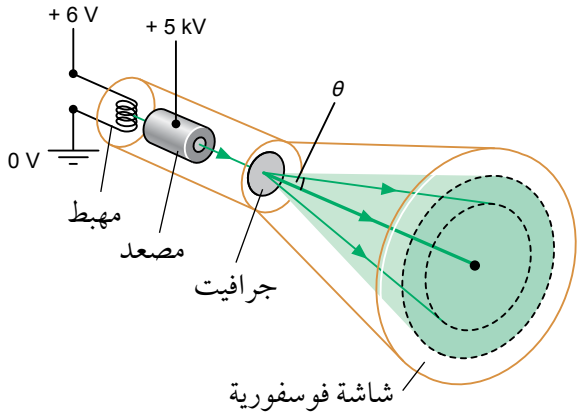


الصورة ٨-١٠ يبيّن نمط الحيود المبقّع (على شكل بقع) أنه ينشأ من العديد من الإلكترونات الفردية التي تصطدم بالشاشة.

مهارة عملية ٨-٣

استقصاء حيود الإلكترونات

يمكنك أن ترى بنفسك إذا توفر لك أنبوب حيود الإلكترونات (الشكل ٨-١٤)، كيف يحيد شعاع من الإلكترونات، إذ يُنتج مسرع الإلكترونات في أحد نهايتَي الأنبوب حزمةً من الإلكترونات. ويمكنك تغيير طاقة الإلكترونات بواسطة تغيير فرق الجهد الكهربائي المطبق بين المصعد والمهبط، وبالتالي تغيير سرعة الإلكترونات. تصطدم الحزمة بالهدف (الجرافيت)، ويظهر نمط حيود على الشاشة في الطرف الآخر من الأنبوب.



الشكل ٨-١٤ تُسرّع الإلكترونات من المهبط إلى المصعد، فتشكّل حزمةً تحيد في أثناء مرورها عبر شريحة رقيقة من الجرافيت.

يمكنك استخدام أنبوب حيود الإلكترونات لاستقصاء كيف يعتمد طول الموجة للإلكترونات على سرعتها، ويجب أن تلاحظ أن زيادة فرق الجهد الكهربائي بين المصعد والمهبط ينشأ عنه نمط حلقات حيود منكمش، عندها تمتلك الإلكترونات طاقة حركة أكبر (تكون أسرع)، ويظهر نمط الانكماش أن طول موجتها قد انخفض، ويمكنك معرفة طول الموجة (λ) للإلكترونات بواسطة قياس الزاوية (θ) التي تحيد عندها الإلكترونات:

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

حيث (d): مسافة التباعد بين الطبقات الذرية للجرافيت. (لاحظ أن هذه المعادلة تنطبق على أنماط الحيود الدائري وهي ليست جزءًا من هذا الموضوع).

يمكنك معرفة سرعة الإلكترونات من فرق الجهد الكهربائي (V) المطبق بين المصعد والمهبط:

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV$$

مثال

٣. احسب طول موجة دي بروي لإلكترون ينتقل عبر الفضاء بسرعة (1.0×10^7 m s^{-1}). اذكر ما إذا كانت هذه الإلكترونات يمكن أن تحيد بواسطة المواد الصلبة أم لا.

(المسافة بين الذرات في المواد الصلبة 10^{-10} m تقريبًا).

الخطوة ١: وفقًا لمعادلة دي بروي يكون لدينا:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

كتلة الإلكترون تساوي (9.11×10^{-31} kg). لذلك:

$$\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 1.0 \times 10^7}$$

$$= 7.3 \times 10^{-11} \text{ m}$$

تمتلك الإلكترونات التي تتحرك بسرعة (10^7 m s^{-1}) طول موجة دي بروي مقدارًا من رتبة (10^{-10} m)، وهذا المقدار يساوي تقريبًا المسافة بين الذرات، ومن هنا فإن هذه الإلكترونات يمكن أن تحيد بواسطة المادة الصلبة.

سؤال

(١٧) تُستخدم أشعة-X (الأشعة السينية) لمعرفة المسافة بين الذرات في المواد البلورية.

أ. صِف كيف يمكن استخدام حزم من الإلكترونات للغرض نفسه.

ب. كيف يمكن استخدام حيود الإلكترونات للتعرّف إلى عيّنة من فلز ما؟

الموجات المصاحبة للبشر

تنطبق معادلة دي بروي على كل المواد وعلى كل ما له كتلة، إذ يمكن تطبيقها على أشياء مثل كرات الجولف، وكذلك على البشر أيضًا!

تخيّل شخصًا كتلته (65 kg) يركض بسرعة ($3.0\ m\ s^{-1}$) من خلال فتحة بعرض (0.80 m)؛ وفقًا لمعادلة دي بروي يكون طول الموجة لهذا الشخص هو:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$
$$= \frac{6.63 \times 10^{-34}}{65 \times 3.0}$$
$$= 3.4 \times 10^{-36}\ m$$

طول الموجة هذا صغير جدًا مقارنةً بعرض الفتحة، وبالتالي لن تتمّ ملاحظة آثار للحيود؛ لأنه لا يمكن أن يحيد الناس من خلال الفجوات التي يواجهونها يوميًا، فطول موجة دي بروي لهذا الشخص أصغر بكثير من أي فتحة يحتمل اختراقها! لهذا السبب لا نستخدم النموذج الموجي لوصف سلوك الناس، بل نحصل على نتائج أفضل بكثير من خلال اعتبار الناس أجسامًا كبيرة.

سؤال

(١٨) تُسرّع حزمة إلكترونات من السكون بواسطة فرق جهد (1.0 kV).

أ. احسب الطاقة (بوحدة eV) لإلكترون في الحزمة.

ب. احسب السرعة ومن ثم كمية التحرك (p) للإلكترون.

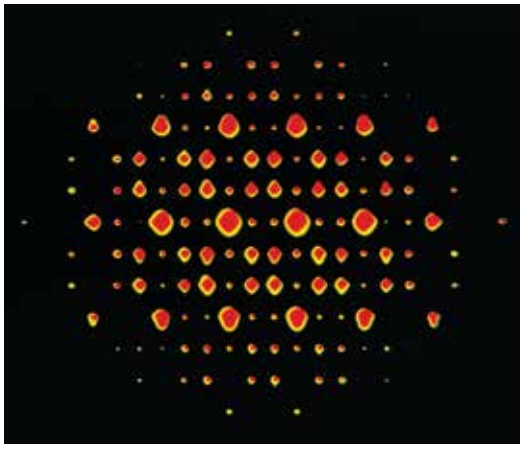
ج. احسب طول موجة دي بروي للإلكترون.

د. هل تتوقع أن تحيد الحزمة بشكل كبير بواسطة شريحة فلزية المسافة الفاصلة بين ذراتها ($0.25 \times 10^{-9}\ m$)؟ أعطِ سببًا لإجابتك.

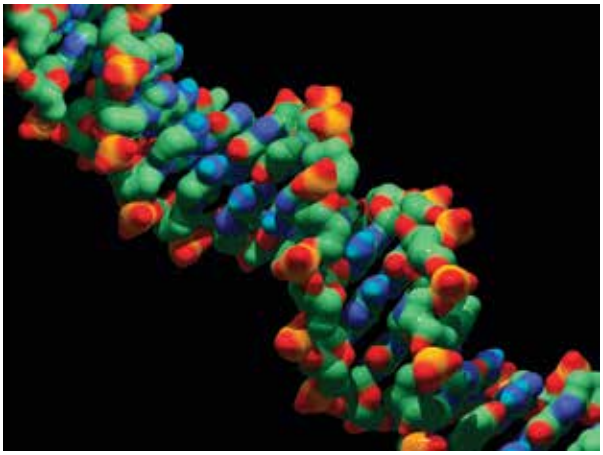
استقصاء بنية المادة

جميع الجسيمات المتحركة لها طول موجة دي بروي، ويمكن استقصاء بنية المادة باستخدام حيود الجسيمات، حيث يستخدم حيود النيوترونات بطيئة الحركة (المعروفة بالنيوترونات الحرارية) من المفاعلات النووية في دراسة كيف تترتب الذرات في الفلزات والمواد الأخرى، فطول الموجة لهذه النيوترونات ($10^{-10}\ m$) تقريبًا، وهو يساوي المسافة الفاصلة بين الذرات تقريبًا.

يستخدم حيود الإلكترونات بطيئة الحركة للكشف عن ترتيب الذرات في الفلزات (الصورة ٨–١١)، وبنية الجزيئات المعقّدة مثل الحمض النووي DNA (الصورة ٨–١٢)، ومن الممكن تسريع الإلكترونات إلى السرعة المناسبة بحيث يكون طول موجتها مماثلًا لمسافة التباعد بين الذرات، أي ($10^{-10}\ m$) تقريبًا.



الصورة ٨-١١ نمط حيود الإلكترون لسبائك التيتانيوم والنيكل، من هذا النمط يمكننا استنتاج ترتيب الذرات والمسافات الفاصلة بينها.



الصورة ٨-١٢ بنية جزيء الحمض النووي DNA، التي تم الحصول عليها من حيود الإلكترون.

تستخدم الإلكترونات عالية السرعة في مسرعات الجسيمات لتحديد قطر الأنوية الذرية؛ وهذا ممكن لأن الإلكترونات عالية السرعة لها أطوال موجية من رتبة (10^{-15} m)، وطول الموجة هذا مماثل لأبعاد أنوية الذرات، حيث تستخدم الإلكترونات التي تنتقل بسرعة تقارب سرعة الضوء لاستقصاء بنية النواة من الداخل، ويجب أن تكون هذه الإلكترونات مسرّعة بفرق جهد كهربائي يصل إلى (10^{9} V).

طبيعة الإلكترون: موجية أم جسيمية؟

للإلكترون طبيعة ثنائية (مزدوجة) تمامًا مثل الموجات الكهرومغناطيسية، ويشار إلى هذه الثنائية باسم **الثنائية الموجية الجسيمية** للإلكترون، ويمكن التعبير عنها بعبارات بسيطة:

- يتفاعل الإلكترون مع المادة كجسيم، والدليل على ذلك ما قدمته ميكانيكا نيوتن.
- ينتقل الإلكترون عبر الفضاء كموجة، إذ يأتي الدليل على ذلك من حيود الإلكترونات.

نظرة أخرى على الفوتونات

من المفيد إنهاء هذا الموضوع في فيزياء الكم بالنظر إلى الفوتون الذي له كمية تحرّك (p) وطاقة (E).

المعادلتان الرئيسيتان للفوتون هما:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{و} \quad p = \frac{E}{c}$$

لذلك:

$$p = \frac{E}{c}$$

$$= \frac{hc}{\lambda c}$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

هذه المعادلة مطابقة لمعادلة دي بروي لكمية تحرّك الجسيم وطول موجته، لذلك يبدو أنه يمكن استخدام المعادلة في السلوك الجسيمي (الفوتونات) للإشعاع الكهرومغناطيسي والسلوك الموجي للجسيمات.

ملخّص

لكل فوتون في الموجات الكهرومغناطيسية تردد (f) وطول موجة (λ)، وطاقة (E) تُعطى بواسطة المعادلات:

$$E = hf$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

حيث (h): ثابت بلانك.

الإلكترون ڤولت الواحد هو الطاقة المنقولة عندما يتحرّك إلكترون خلال فرق جهد مقداره (1 V):

$$1\ \text{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

تُعطى طاقة الحركة لجسيم شحنته (e) ويتسارع بواسطة فرق جهد كهربائي (V) بالمعادلة:

$$eV = \frac{1}{2} mv^2$$

التأثير الكهروضوئي هو مثال لظاهرة فسّرت بدلالة السلوك الجسيمي (الفوتونات) للإشعاع الكهرومغناطيسي.

معادلة أينشتاين للكهروضوئية هي:

$$hf = \Phi + \frac{1}{2} mv_{max}^2$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \Phi + \frac{1}{2} mv_{max}^2$$

حيث (Φ) هي دالة الشغل للفلز.

تردد العتبة (f_0) هو **أدنى** تردد للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط الذي يحرّر إلكترونًا من سطح الفلز.

طول موجة العتبة (λ_0) هو **أقصى** طول موجة للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط الذي يحرّر إلكترونًا من سطح الفلز.

حيود الإلكترونات هو مثال لظاهرة فسّرت بدلالة السلوك الموجي للمادة.

يرتبط طول الموجة لدي بروي (λ) للجسيم بكمية تحرّكه (p) بمعادلة دي بروي:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

حيث (p) هي كمية تحرّك الجسيم وتساوي (mv).

يُظهر كل من الإشعاع الكهرومغناطيسي (مثل الضوء) والمادة (مثل الإلكترونات) ثنائية (ازدواجية) الموجة والجسيم، أي أنها تظهر سلوكًا موجيًا وسلوكًا جسيميًا، اعتمادًا على الظروف المحيطة، ففي ثنائية الموجة والجسيم:

- يُشرح **التفاعل** بدلالة **الجسيمات**.
- يُشرح **الانتقال** عبر الفضاء بدلالة **الموجات**.

ليس للفوتونات كتلة، لكن لها كمية تحرّك، وتُعطى كمية التحرّك (p) لفوتون طاقته (E) بالمعادلة:

$$p = \frac{E}{c}$$

تظهر أطياف خطية للذرات.

تكون طاقة الإلكترون في ذرّة ما مكمّمة، ويُسمح للإلكترون بالبقاء في حالة طاقة محدّدة وهي المعروفة بمستويات الطاقة.

يفقد الإلكترون طاقته عندما ينتقل من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أدنى، وينبعث فوتون من الإشعاع الكهرومغناطيسي بسبب فقدان هذه الطاقة، والنتيجة هي طيف انبعاث خطي.

تنشأ أطياف الامتصاص الخطية عندما يُمتص فوتون من الإشعاع الكهرومغناطيسي بواسطة إلكترون في الذرات، حيث يمتص الإلكترون فوتونًا بطاقة مناسبة ليسمح له بالانتقال إلى مستوى طاقة أعلى.

يرتبط التردد (f) وطول الموجة (λ) للإشعاع المنبعث أو الممتص بمستويات الطاقة (E_1) و (E_2) بالمعادلات:

$$hf = E_1 - E_2$$

$$\frac{hc}{\lambda} = E_1 - E_2$$

أسئلة نهاية الوحدة

١ في أيّ مما يأتي يمكنك استخدام مصطلح دالة الشغل؟

أ. حيود الإلكترونات بواسطة الجرافيت.

ب. تداخل الضوء من محزوز الحيود.

ج. التأثير الكهروضوئي.

د. انعكاس الضوء.

٢ يُجري باحث تجربة على التأثير الكهروضوئي، فيُسقط إشعاعًا كهرومغناطيسيًا بترددات مختلفة على فلز، ويحدّد طاقة الحركة القصوى للإلكترونات المنبعثة، ثم يرسم تمثيلًا بيانيًا بخط مستقيم لأقصى طاقة حركة للإلكترونات ($K.E_{max}$) مقابل تردد الإشعاع (f). أيّ صَف في الجدول ٨–٧ صحيح؟

	ميل المنحنى (الخط المستقيم)	نقطة تقاطع منحنى التمثيل البياني مع المحور (y)
أ	ثابت بلانك	سالب دالة الشغل للفلز
ب	تردد العتبة	ثابت بلانك
ج	طول موجة العتبة	تردد العتبة
د	دالة الشغل للفلز	طول موجة العتبة

الجدول ٨–٧

٣ احسب طاقة فوتون تردده (4.0×10^{18} Hz).

٤ الأطوال الموجية لمنطقة الموجات الميكروية من الطيف الكهرومغناطيسي تتراوح من (5 mm) إلى (50 cm)؛ احسب مدى الطاقة لفوتونات الموجات الميكروية.

٥ تُستخدم الفوتونات في فرن الميكروويف لتسخين الطعام، وتكون طاقة الفوتون (1.02×10^{-5} eV). احسب:

أ. طاقة الفوتون بالجول (J).

ب. تردد الفوتونات.

ج. طول الموجة للفوتونات.

٦ **أ.** تنبعث جسيمات ألفا في الانحلال الإشعاعي للراديوم بطاقة (5.0 MeV)؛ عبّر عن هذه الطاقة بوحدة الجول.

ب. تتسارع الإلكترونات الموجودة في أنبوب أشعة المهبط بواسطة فرق جهد كهربائي مقداره (10 kV). احسب طاقة الإلكترون بوحدة:

١. الإلكترون فولت.

٢. الجول.

ج. يتم إبطاء النيوترونات في مفاعل نووي لتصبح طاقتها (6.0×10^{-21} J). احسب هذه الطاقة بوحدة (eV).

تابع

٧ تم تسريع نواة هيليوم (شحنتها = $+3.2 \times 10^{-19}$ C ، كتلتها = 6.6×10^{-27} kg) بواسطة فرق جهد كهربائي مقداره (7500 V)؛ احسب:

أ. طاقة حركتها بالإلكترون فولت.

ب. طاقة حركتها بالجول.

ج. سرعتها.

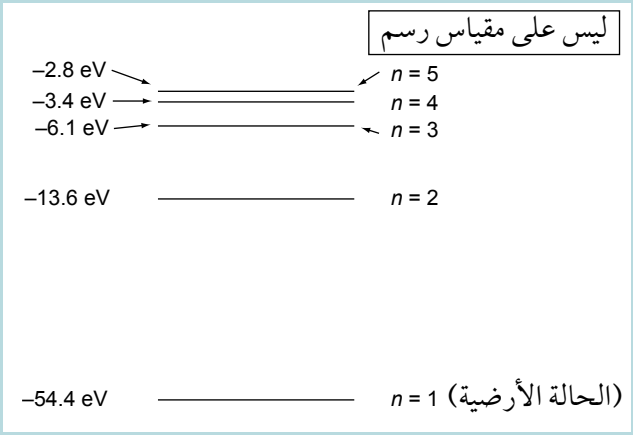
٨ سُلّط ضوء فوق بنفسجي طاقة فوتوناته (2.5×10^{-18} J) على لوح زنك، ودالة الشغل للزنك تساوي (4.3 eV). احسب طاقة الحركة القصوى التي يمكن أن ينبعث بها إلكترون من لوح الزنك بوحدة:

أ. eV

ب. J

٩ احسب أدنى تردد للإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يتسبب بانبعاث إلكترونات ضوئية من سطح فلز الذهب (دالة الشغل للذهب = 5.1 eV).

١٠ يبيّن الشكل ٨–١٥ خمسة مستويات للطاقة في **أيون** الهيليوم، ويُعرف أدنى مستوى للطاقة بالحالة الأرضية.



الشكل ٨–١٥

أ. حدّد الطاقة المطلوبة بالجول لإزالة الإلكترون المتبقي من أيون الهيليوم عندما يكون في حالته الأرضية.

ب. جِد تردد الإشعاع المنبعث عندما يهبط الإلكترون من المستوى $n = 3$ إلى $n = 2$، واذكر منطقة الطيف الكهرومغناطيسي التي ينتمي إليها هذا الإشعاع.

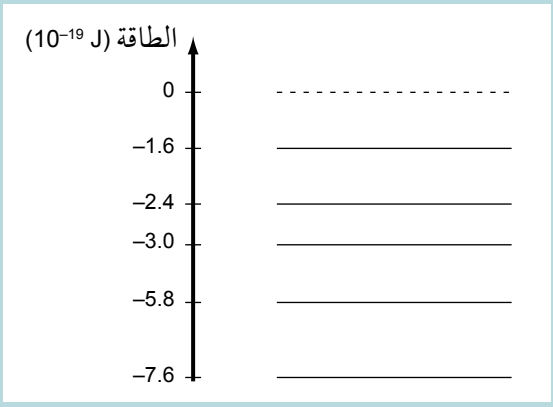
ج. بدون إجراء مزيد من العمليات الحسابية، قارن بين تردد الإشعاع المنبعث عندما يهبط الإلكترون من المستوى $n = 2$ إلى $n = 1$ بتردد الإشعاع المنبعث عندما يهبط الإلكترون من المستوى $n = 3$ إلى $n = 2$.

تابع

١١ لِطيف ضوء الشمس خطوط معتمة (سوداء) ناتجة عن امتصاص أطوال موجية معيّنة من الضوء في الغازات الأكثر برودة للغلاف الجوي للشمس.

أ. يبلغ طول الموجة لخط طيف معيّن معتم (590 nm)؛ احسب طاقة الفوتون لهذا الطول الموجي.

ب. يبيّن الشكل ٨–١٦ بعض مستويات الطاقة لذرّة الهيليوم.



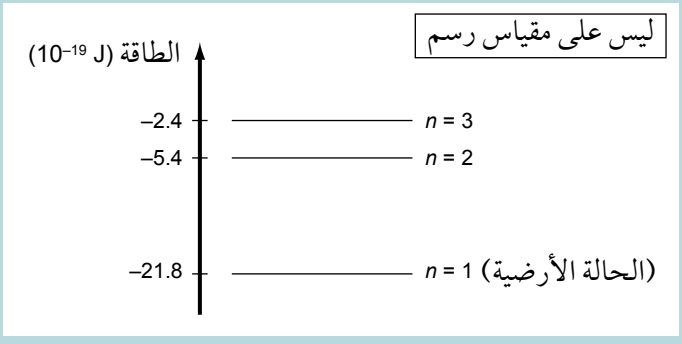
الشكل ٨–١٦

١. ما السبب في أن مستويات الطاقة لها قيم سالبة؟

٢. اشرح بالرجوع إلى مخطط مستويات الطاقة، كيف يمكن أن يكون الخط المعتم في الطيف ناتجًا عن وجود الهيليوم في الغلاف الجوي للشمس.

٣. جميع الأضواء التي تمتصها الذرات في الغلاف الجوي للشمس يُعاد انبعاثها؛ اقترح السبب في أنه لا يزال بالإمكان ملاحظة الخط الطيفي المعتم ذو طول الموجة (590 nm) من الأرض.

١٢ يبيّن الشكل ٨–١٧ ثلاثة مستويات للطاقة في ذرة هيدروجين.



الشكل ٨–١٧

أ. اشرح ما سيحدث للإلكترون في الحالة الأرضية عندما يمتص فوتون طاقته (21.8×10^{-19} J).

ب. ١. اشرح سبب انبعاث فوتون عندما ينتقل إلكترون بين مستويَي الطاقة $n = 3$ و $n = 2$.

٢. احسب طول الموجة للإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث عندما يقفز إلكترون بين مستويَي الطاقة $n = 3$ و $n = 2$.

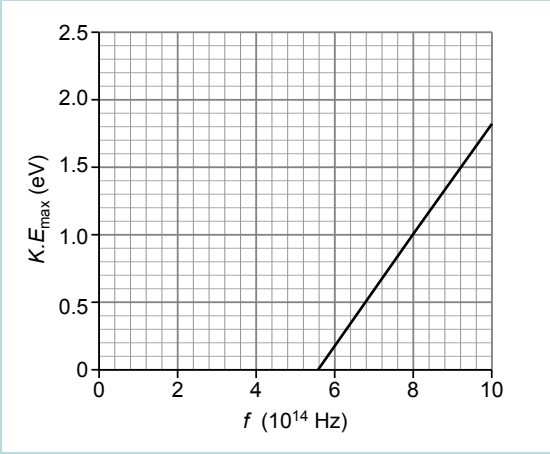
تابع

٣. يُشار إلى كل مستوى من مستويات الطاقة في المخطط بقيمة (n)، استخدم مخطط مستويات الطاقة لتثبت أن الطاقة (E) لمستوى طاقة ما تتناسب عكسيًا مع (n^2).

١٣ **أ.** ١. اشرح المقصود بثنائية الموجة والجسيم للإشعاع الكهرومغناطيسي.

٢. اشرح كيف يعطي التأثير الكهروضوئي دليلًا على هذه الظاهرة.

ب. يبيّن التمثيل البياني في الشكل ٨–١٨ طاقة الحركة القصوى ($K.E_{max}$) للإلكترونات الضوئية المنبعثة عندما يتغيّر التردد (f) للإشعاع الساقط على لوح من الصوديوم.



الشكل ٨–١٨

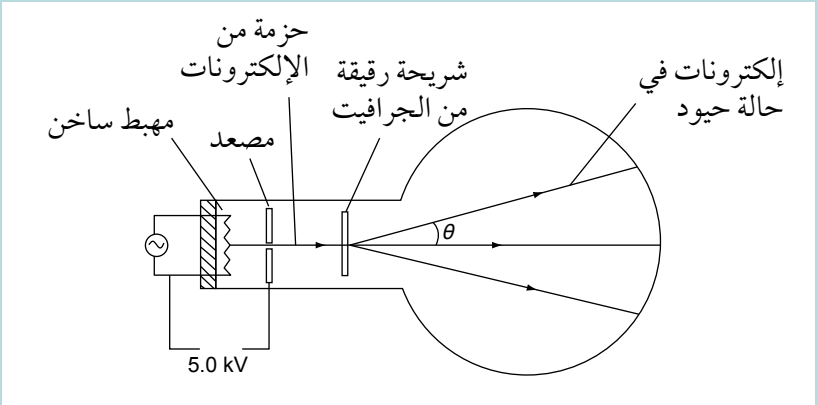
١. اشرح سبب عدم انبعاث إلكترونات ضوئية عندما يكون تردد الضوء الساقط أقل من (5.6×10^{14} Hz).

٢. حدّد دالة الشغل للصوديوم، واشرح إجابتك.

٣. استخدم التمثيل البياني لتحديد قيمة ثابت بلانك، واشرح إجابتك.

١٤ **أ.** ما المقصود بطول موجة دي بروي للإلكترون؟

ب. يبيّن الشكل ٨–١٩ الأجزاء الأساسية لأنبوب الإلكترونات المستخدم لتوضيح حيود الإلكترون.



الشكل ٨–١٩

تابع

١. احسب طاقة الحركة ($K.E$) (بالجول) للإلكترونات الساقطة على شريحة رقيقة من الجرافيت.
٢. بيّن أن كمية تحرّك الإلكترون تساوي $\sqrt{2K.E.m_e}$، حيث (m_e) هي كتلة الإلكترون، ثم احسب كمية تحرّك الإلكترون. ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg)
٣. احسب طول موجة دي بروي للإلكترونات.

ج. اشرح كيف يمكن مقارنة الأطوال الموجية للنيوترونات والإلكترونات التي تتحرك بالطاقة نفسها.

١٥ **أ.** وضّح أهمية ثابت بلانك (h) في وصف سلوك كل من الإشعاع الكهرومغناطيسي والإلكترونات.

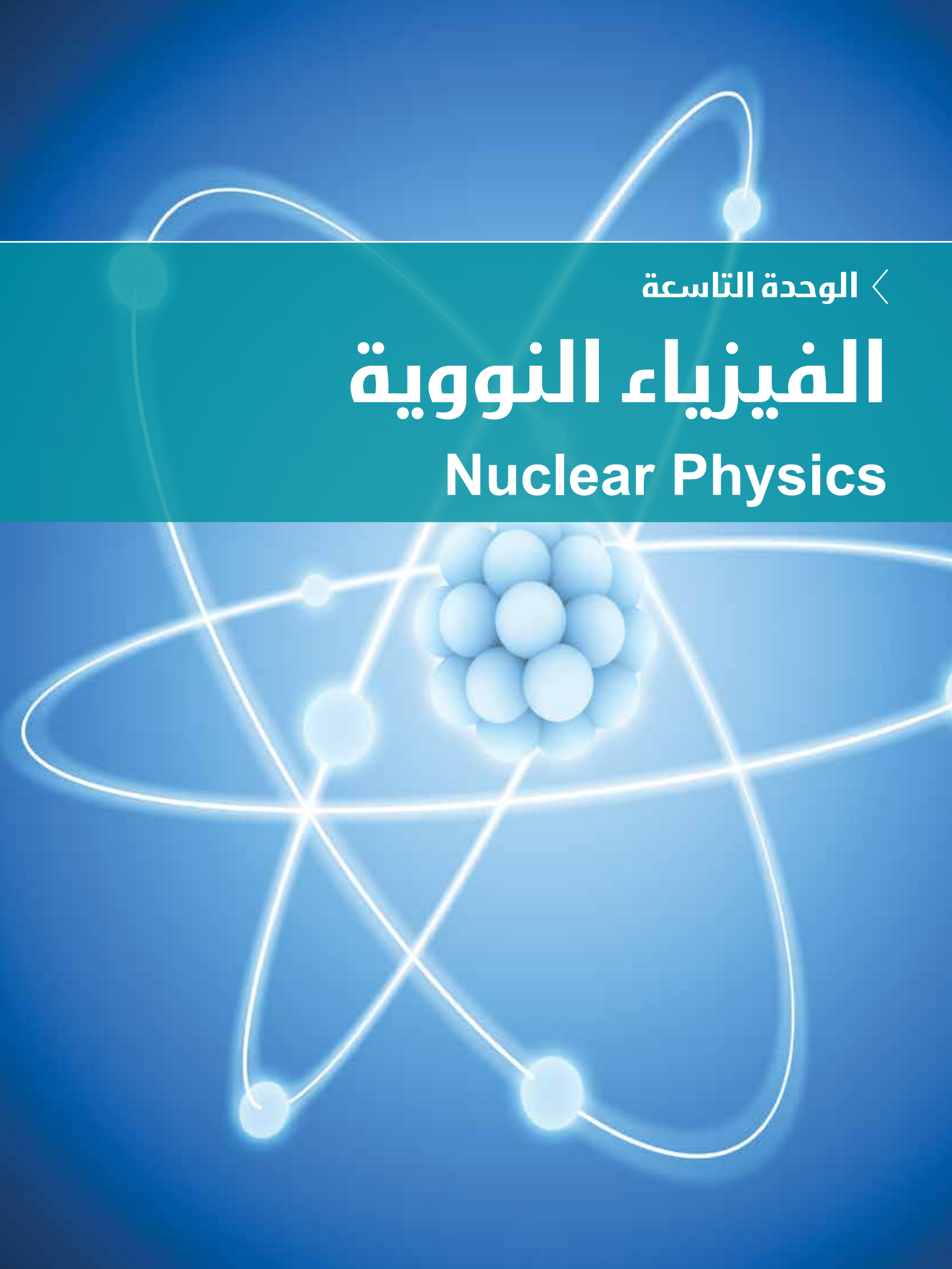
ب. لوح فلزي أبعاده (5.0 cm × 5.0 cm) يسقط عليه عموديًا ضوء طول موجته (550 nm) وشدته ($800\ W\ m^{-2}$)، ويُمتص كل الضوء الساقط بواسطة اللوح الفلزي.

١. اشرح كيف يُؤثر الضوء بقوة على اللوح الذي يصطدم به.
٢. احسب كمية تحرّك فوتون الضوء.
٣. احسب القوة المؤثرة على اللوح بسبب الضوء.

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم أن الإشعاع الكهرومغناطيسي يتفاعل مع المادة كفوتونات.	٨–١			
أفهم أن الفوتون هو كمّة من الطاقة الكهرومغناطيسية وطاقته تعطى بواسطة المعادلة: $E = hf$	٨–١			
أستخدم الإلكترون فولت (eV) كوحدة للطاقة، حيث: $1\ \text{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\ \text{J}$	٨–١			
أفهم التأثير الكهروضوئي.	٨–١، ٨–٢			
أفهم تردد العتبة، وطول موجة العتبة ودالة الشغل.	٨–٢			
استخدم معادلة أينشتاين للكهروضوئية: $\frac{hc}{\lambda} = \Phi + \frac{1}{2}mv^2_{max}$ أو $hf = \Phi + \frac{1}{2}mv^2_{max}$	٨–٢			
أفهم السبب في أن طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية لا تعتمد على شدة الضوء، في حين تتناسب شدة التيار الكهروضوئي طرديًا مع شدة الضوء.	٨–٢			
أفهم أن التأثير الكهروضوئي يقدم دليلًا على الطبيعة الجسيمية للإشعاع الكهرومغناطيسي.	٨–٢			
أفهم أن الفوتون له كمية تحرّك تُعطى بواسطة المعادلة: $p = \frac{E}{c}$	٨–٣			
أفهم أن هناك مستويات طاقة منفصلة للإلكترونات في الذرات المعزولة (مثل ذرة الهيدروجين).	٨–٤			
أفهم مظاهر كل من أطياف الانبعاث الخطي وأطياف الامتصاص الخطي وتشكلّها.	٨–٤			
أستخدم المعادلة: $hf = E_1 - E_2$.	٨–٤			
أفهم أن الحيود يقدم دليلًا على السلوك الموجي للجسيمات (الإلكترونات).	٨–٥			
أفهم أن الجسيم المتحرك له طول موجة دي بروي وتُعطى بواسطة المعادلة: $\lambda = \frac{h}{p}$	٨–٥			



الوحدة التاسعة

الفيزياء النووية

Nuclear Physics

أهداف التعلّم

٩-١ يعبّر عن تفاعلات نووية بسيطة بمعادلات نووية موزونة.

٩-٢ يستخدم معادلة تكافؤ الطاقة والكتلة $E = mc^2$.

٩-٣ يعرّف مصطلحَي النقص في الكتلة Δm وطاقة الربط النووي ΔE ويستخدمهما.

٩-٤ يحسب الطاقة المتحرّرة في التفاعلات النووية باستخدام المعادلة: $\Delta E = \Delta mc^2$.

٩-٥ يمثل برسم تخطيطي ويصف تباين طاقة الربط النووي لكل نيوكليون مع عدد النيوكليونات في النوى.

٩-٦ يقارن أوجه التشابه والاختلاف بين الاندماج النووي والانشطار النووي.

٩-٧ يشرح أهمية طاقة الربط النووي لكل نيوكليون في التفاعلات النووية، بما في ذلك الاندماج النووي والانشطار النووي.

٩-٨ يصف الدليل على الطبيعة العشوائية للانحلال الإشعاعي، بدلالة معدّل العدّ.

٩-٩ يذكر أسباب اعتبار أن الانحلال الإشعاعي يكون تلقائيًا وعشوائيًا.

٩-١٠ يعرّف النشاط الإشعاعي وثابت الانحلال، ويستخدم المعادلتين: $A = \lambda N$ و $A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$.

٩-١١ يعرّف عمر النصف ويستخدم المعادلة: $\lambda = \frac{0.693}{t_{\frac{1}{2}}}$.

٩-١٢ يصف الطبيعة الأُسية للانحلال الإشعاعي، ويمثّل بيانيًا العلاقة $x = x_0 e^{-\lambda t}$ ويستخدمها، حيث يمكن أن تمثّل x النشاط الإشعاعي أو عدد النوى غير المنحلة أو معدّل العدّ المسجل.

قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة

- المعرفة الأساسية بالنشاط الإشعاعي التي درستها في الصف العاشر مفيدة في دراسة هذه الوحدة، اكتب مع زميلك ملخصًا لما تعرفه عن النشاط الإشعاعي.
- حاول أن تتذكر الجسيمات التي تتكوّن منها النواة والقوى المؤثرة على تلك الجسيمات، ثم اكتبها.
- ناقش: لماذا يكون من المناسب التعبير عن كتلة الجسيمات بوحدة الكتلة الذرية (u)؟

العلوم ضمن سياقها

الطاقة والنواة

الشمس من نِعَم الله العظيمة علينا حيث تعتمد الكائنات الحية على سطح الأرض – ومنها البشر – على ضوء الشمس وحرارتها، ومن دون الشمس يصبح كوكبنا صخرة هامدة في الفضاء.

تُدفئ الشمس محيطاتنا، وتُحرّك غلافنا الجوي، وهي أساس مناخنا، والأهم من ذلك كله أنها تعطي الطاقة للنباتات التي توفر الغذاء والأكسجين للحياة على الأرض.

كيف تنتج الشمس طاقتها؟ الشمس كرة غاز نشطة وساخنة، تحوّل كتلتها إلى طاقة، فتولّد 10^{26} W تقريبًا من الطاقة المشعة بواسطة تحويل أكثر من مليار كيلوغرام من المادة إلى طاقة في كل ثانية، وعليه فبإمكانها الاستمرار في تزويد الأرض بالطاقة إلى أن يشاء الله، فكتلتها كبيرة وتساوي 10^{30} kg تقريبًا، هل يمكنك تقدير عمر الشمس؟

سندرس في هذه الوحدة كيف تُنتج التفاعلات النووية الطاقة، وسننظر في استقرار الأنوية أيضًا، وكيف يمكننا توضيح انحلال الأنوية غير المستقرة باستخدام المعادلات الرياضية.

الصورة ٩-١ فهمنا للفيزياء النووية مهم لجميع أشكال الحياة على الأرض.

٩-١ المعادلات النووية

عندما تخضع نواة غير مستقرة للانحلال الإشعاعي، فغالبًا ما يشار إلى النواة قبل الانحلال باسم النواة **الأم**، وتُعرف النواة الجديدة التي تشكّلت بعد عملية الانحلال باسم النواة **الوليدة**. يمكن تمثيل عمليات الانحلال الإشعاعي بواسطة معادلات موزونة، كما هي الحال مع جميع المعادلات التي تمثل العمليات النووية، حيث يكون كل من عدد النيوكليونات (A) (مجموع عدد البروتونات والنيوترونات) وعدد البروتونات (Z) محفوظًا، ويشار أيضًا إلى عدد النيوكليونات على أنه العدد الكتلي.

مهمّ

إن عدد النيوكليونات (العدد الكتلي) هو مجموع عدد البروتونات والنيوترونات في نواة ذرة ما.

- **في انحلال ألفا (α)** ينخفض عدد النيوكليونات بمقدار 4، وينخفض عدد البروتونات بمقدار 2. الرمز (He) يمكن أن يُستخدم أيضًا لجسيم ألفا.

الصيغة العامة: $${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

- **في انحلال بيتا السالب (β^-)** لا يتغيّر عدد النيوكليونات، ولكن يزيد عدد البروتونات بمقدار 1. يمكن أن يُرمز إلى جسيم بيتا السالب أيضًا بـ (e^-) لأنه عبارة عن إلكترون.

الصيغة العامة: $${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$$

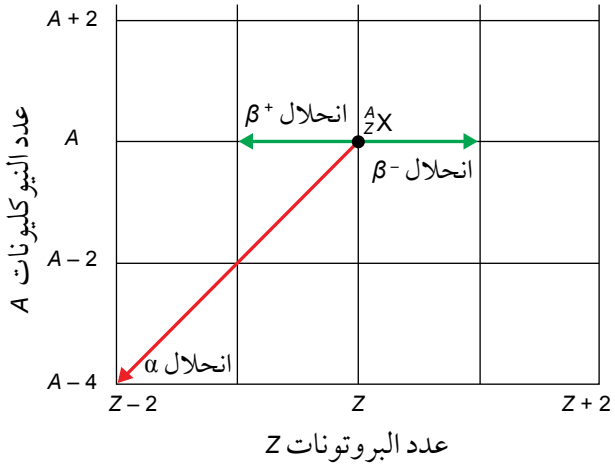
- **في انحلال بيتا الموجب (β^+)** لا يتغير عدد النيوكليونات ولكن يقل عدد البروتونات بمقدار 1. يمكن أن يُرمز إلى جسيم بيتا الموجب أيضًا بـ (e^+) ويُطلق عليه بوزيترون.

الصيغة العامة: $${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e$$

- **في إشعاع جاما (γ)** لا يوجد تغيير في أي من عدد النيوكليونات أو عدد البروتونات.

الصيغة العامة: $${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{0}\gamma$$

يظهر انبعاث جسيمات ألفا وبيتا على التمثيل البياني لعدد النيوكليونات (A) مقابل عدد البروتونات (Z)، كما هو مبيّن في الشكل ٩-١، وسيظهر التمثيل البياني مختلفًا إذا رُسم عدد النيوترونات مقابل عدد البروتونات.



الشكل ٩-١ انبعاث جسيمات ألفا وبيتا.

أمثلة

١. غاز الرادون (Rn) غاز مشع؛ ينحل نظير الرادون-222 بانبعاث ألفا ليصبح نواة بولونيوم (Po)، وهذه معادلة انحلال أحد نظائر الرادون-222:

$$^{222}_{86}Rn \longrightarrow {}^{218}_{84}Po + {}^{4}_{2}He$$

أثبت أن A و Z محفوظَين.

قارن بين عدد النيوكليونات والبروتونات في طرفَي معادلة الانحلال:

عدد النيوكليونات A في الطرف الأيمن:

$218 + 4 = 222$

وهو مساوٍ للطرف الأيسر (222).

عدد البروتونات Z في الطرف الأيمن:

$84 + 2 = 86$

وهو مساوٍ للطرف الأيسر (86).

(تذكّر أنه في حالة انحلال α ينقص A بمقدار أربعة وينقص Z بمقدار اثنين. لا تخلط بين عدد النيوكليونات A وعدد النيوترونات N).

يكون الرادون-222 في هذه الحالة هو النواة الأم، والبولونيوم-218 هو النواة الوليدة.

٢. تنحلّ نواة كربون-14 ($^{14}_{6}C$) (الأم) بانبعاث β^- لتصبح نظير النيتروجين (الوليدة)؛ وفيما يأتي المعادلة التي يمثلها هذا الانحلال:

$$^{14}_{6}C \longrightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$$

أثبت أن كلًا من عدد النيوكليونات وعدد البروتونات محفوظ.

قارن بين عدد النيوكليونات والبروتونات في طرفَي معادلة الانحلال:

عدد النيوكليونات A في الطرف الأيمن:

$14 + 0 = 14$

وهو مساوٍ للطرف الأيسر (14).

عدد البروتونات Z في الطرف الأيمن:

$7 - 1 = 6$

وهو مساوٍ للطرف الأيسر (7).

(تذكّر أنه في حالة انحلال β^- تبقى A نفسها ويزيد Z بمقدار 1).

أسئلة

(١) ادرس معادلتَي الانحلال الواردتَين في المثالَين ١ و ٢ واكتب معادلتَين موزونتين للآتي:

أ. تنحل نواة اليورانيوم-238 ($^{238}_{92}U$) بانبعاث α لتشكيل نظير الثوريوم (Th).

ب. تنحل نواة نظير الصوديوم-25 ($^{25}_{11}Na$) بانبعاث β^- لتشكيل نظير المغنيسيوم (Mg).

(٢) انسخ هذه المعادلة وأكملها لانحلال β^- لنواة الأرجون (Ar).

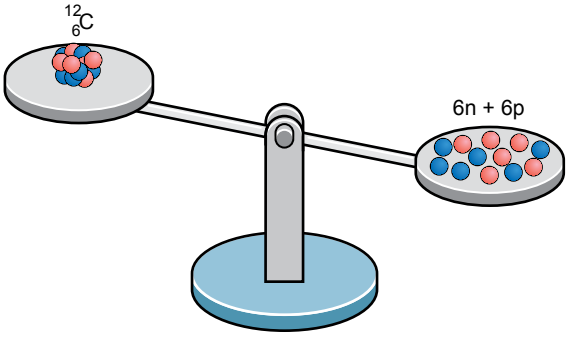
$$^{41}_{18}Ar \longrightarrow K + ?$$

٢-٩ الكتلة والطاقة

تتحرّر طاقة عندما تنحل نواة ذرّة غير مستقرة، فكيف نحسب كمية الطاقة المنبعثة من الانحلال الإشعاعي؟ للحصول على إجابة عن هذا السؤال، علينا التفكير أولًا في كتل الجسيمات المتضمنة.

سنبدأ بالنظر في نواة مستقرة مثل نواة ذرة الكربون $^{12}_{6}C$ حيث تتكوّن هذه النواة من ستة بروتونات وستة نيوترونات، ومن نِعَم الله علينا أنها نواة مستقرة جدًا فالكثير من هذا النوع من الكربون موجود في أجسامنا، ولأن النواة مستقرة فهذا يعني أن النيوكليونات مرتبطة بعضها ببعض بإحكام بواسطة القوة النووية القوية، لذلك فهي تتطلب الكثير من الطاقة لتفكيكها.

يبيّن الشكل ٩-٢ نتائج تجربة خيالية قمنا خلالها بفصل نيوكليونات نواة كربون-12 ($^{12}_{6}C$) بعضها عن بعض. على الجانب الأيسر من الميزان نواة $^{12}_{6}C$ مفردة، وعلى الجانب الأيمن ستة بروتونات وستة نيوترونات ناتجة من تفكيك النواة. الشيء المدهش هو أن كفة الميزان تميل إلى اليمين، أي أن النيوكليونات المنفصلة لها كتلة أكبر من النواة نفسها، وكأن هذا يعني أن قانون حفظ الكتلة لا ينطبق؛ فهل انتهكنا ما كان يُعتقد أنه قانون أساسي للطبيعة، القانون الذي بقي صحيحًا مئات السنين؟



الشكل ٩-٢ كتلة النواة أقل من الكتلة الكلية لمكوناتها من البروتونات والنيوترونات.

يجب أن تعرف أنه عند تفكيك نواة $^{12}_{6}C$، فإنه علينا أن نبذل شغلًا ضدّ القوة النووية القوية؛ فالنيوكليونات تجذب بعضها بعضًا بالقوة النووية القوية عندما نحاول تفكيكها؛ لذلك نزوّد النواة بطاقة لتفكيكها، وهذه الطاقة تزيد من طاقة الوضع لكل نيوكليون. يمكننا التفكير في النيوكليونات داخل النواة على أنها توجد في بئر طاقة عميقة ناتجة عن القوى النووية القوية التي تربط نيوكليونات النواة بعضها ببعض، وعندما نفصل النيوكليونات فإننا نرفعها لتخرج من بئر الطاقة هذه، وذلك بإعطائها مزيدًا من طاقة الوضع النووية، إن بئر الطاقة هذه تشبه بئر الطاقة الناتجة عن المجال الكهربائي حول النواة، وتلك البئر هي المكان الذي تكون فيه إلكترونات الذرة، ولكن بئر طاقة النواة أعمق بكثير جدًا، الأمر الذي يفسر سبب سهولة إزالة إلكترون من الذرة مقارنة بإزالة نيوكليون (بروتون أو نيوترون) من النواة.

ولكن مشكلة **تغير** الكتلة ما زالت قائمة، ولإيجاد حل لها وضع أينشتاين فرضية حول الطاقة والكتلة، فافترض أنهما متكافئتَين، وهذه ليست فكرة سهلة، فهي تعني أنه عندما تكون الأجسام في حالة الطاقة الأعلى، فإن كتلتها أكبر من كتلتها وهي في حالة الطاقة الأدنى؛ فدلو من الماء على قمة تلّ تكون له كتلة أكبر ممّا هي عليه كتلته عندما يكون في أسفل التل؛ وذلك بسبب نقل الطاقة إليه عند حمله إلى أعلى التل، وكرة التنس التي تتحرك بسرعة ($50\ m\ s^{-1}$) ستكون لها كتلة أكبر من كتلتها وهي ساكنة. في هذه الأمثلة التي كثيرًا ما نراها في حياتنا اليومية يكون مقدار الزيادة في الكتلة متناهي جدًا في الصغر بحيث لا يمكن ملاحظته، ومع ذلك فإن التغيرات الكبيرة في الطاقة التي تحدث في الفيزياء النووية وفيزياء الطاقة العالية (على سبيل المثال في مسرّع الجسيمات) تجعل التغيرات في الكتلة مهمة ولا يمكن إهمالها.

هناك طريقة أخرى للتعبير عن هذا الموضوع، وهي التعامل مع الكتلة والطاقة كجانبَين للشيء نفسه؛ وبدلًا من وجود قانونَين منفصلَين لحفظ الكتلة وحفظ الطاقة، يمكننا الجمع بين هذين القانونَين على أن المقدار الكلي للكتلة والطاقة في النظام ثابت، وقد تكون هناك تحوّلات من إحداهما إلى الآخر، ولكن المقدار الكلي «الكتلة والطاقة» يبقى ثابتًا.

معادلة الكتلة-الطاقة لأينشتاين

توصل ألبرت أينشتاين إلى المعادلة الشهيرة لتكافؤ «الكتلة – الطاقة» التي تربط الطاقة (E) والكتلة (m) وهي:

$$E = mc^2$$

حيث (c) هي سرعة الضوء في الفراغ (الفضاء الحرّ)، إذ تبلغ قيمة (c) تقريبًا ($3.00 \times 10^8\ m\ s^{-1}$)، إلّا أن قيمتها الدقيقة حدّدت بـ ($c = 299792458\ m\ s^{-1}$).

بشكل عام، سنهتم بالتغيّرات في الكتلة نتيجة التغيّرات في الطاقة، وعندها تكون المعادلة بالصيغة:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

قد تجد هذه المعادلة مكتوبة بأشكال مختلفة مثل:

$$E = c^2 \Delta m$$

$$E = mc^2$$

حيث (ΔE): التغيّر في الطاقة المقابل للتغيّر في الكتلة (Δm)، و (c): سرعة الضوء في الفراغ.

وفقًا لمعادلة أينشتاين فإن:

- كتلة النظام **تزداد** عندما **يزوّد** بالطاقة.
- كتلة النظام **تتناقص** عندما **تنبعث** الطاقة منه.

والآن إذا عرفنا الكتلة الكلية للجسيمات قبل التفاعل النووي وكتلتها الكلية بعد التفاعل، فإنه يمكننا حساب مقدار الطاقة المنبعثة، ويوضح الجدول ٩–١ الكتلة بالكيلوغرام لكل من الجسيمات المبيّنة في الشكل ٩–٢، لاحظ أن هذه الكتلة توصف بأنها **كتلة السكون** للجسيم، وهي كتلته عندما يكون ساكنًا، وكتلة الجسيم ستكون أكبر عندما يكون متحركًا بسبب زيادة طاقته، وتُقاس الكتل النووية بدرجة عالية من الدقة باستخدام جهاز مطياف الكتلة، وتصل هذه الدقة غالبًا إلى سبعة أو ثمانية أرقام معنوية، ويمكننا استخدام قيم الكتلة من الجدول ٩–١ لحساب الكتلة التي تنبعث كطاقة عندما تتحد النيوكليونات لتشكّل نواة، فبالنسبة إلى الجسيمات الواردة في الشكل ٩–٢، فإنه يكون لدينا:

الجسيم	كتلة السكون (10^{-27} kg)
البروتون ^1_1p	1.672623
النيوترون ^1_0n	1.674928
نواة $^{12}_6C$	19.926483

الجدول ٩–١ الكتل السكونية لبعض الجسيمات.

من المهم ذكر أن كتلة النيوترون أكبر قليلًا (بـ 0.1% تقريبًا) من كتلة البروتون.

كتلة النظام قبل اتحاد النيوكليونات (m) = كتلة جميع النيوكليونات المنفصلة

$$m = (6 \times 1.672623 + 6 \times 1.674928) \times 10^{-27}\ kg$$

$$m = 20.085306 \times 10^{-27}\ kg$$

كتلة النظام بعد اتحاد النيوكليونات = كتلة نواة الكربون–12

$$m = 19.926483 \times 10^{-27}\ kg$$

مقدار النقص في كتلة النظام:

$$\Delta m = (20.085306 - 19.926483) \times 10^{-27}\ kg$$

$$= 0.158823 \times 10^{-27}\ kg$$

عندما تتحد ستة بروتونات وستة نيوترونات لتشكيل نواة الكربون–12، يكون هناك فقدان صغير جدًا في الكتلة (Δm)، والمعروف باسم **النقص في الكتلة Mass defect** ويساوي الفرق بين مجموع كتل النيوكليونات منفردةً وكتلة النواة، ويشير **النقص** في الكتلة إلى أن طاقة ما **تحرّرت** في هذه العملية، وتُحسب الطاقة المنبعثة (ΔE) بواسطة معادلة (الكتلة–الطاقة) لأينشتاين:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.158823 \times 10^{-27} \times (3.00 \times 10^8)^2$$

$$\approx 1.43 \times 10^{-11}\ \text{J}$$

مصطلحات علمية

النقص في الكتلة Mass defect: الفرق بين مجموع كتل النيوكليونات منفردةً وكتلة النواة.

قد تبدو هذه كمية صغيرة جدًا من الطاقة، ولكنها كبيرة على المستوى الذري، وللمقارنة فإن كمية الطاقة المنبعثة في تفاعل كيميائي يتضمن ذرة كربون واحدة تكون عادةً (10^{-18} J) تقريبًا، أي أقل بملايين المرات من الطاقة النووية التي تجمع جميع النيوكليونات الموجودة في نواة الكربون معًا.

مثال

٣. استخدم البيانات الآتية لتحديد أدنى طاقة مطلوبة لتفكيك نواة الأكسجين–16 ($^{16}_{8}O$) إلى نيوكليونات منفصلة، معطيًا إجابتك بالجول (J).

كتلة البروتون = 1.672623×10^{-27} kg

كتلة النيوترون = 1.674928×10^{-27} kg

كتلة نواة الأكسجين = $26.551559 \times 10^{-27}$ kg

سرعة الضوء: $c = 3.00 \times 10^8\ \text{m s}^{-1}$

الخطوة ١: جِد الفرق (Δm) بوحدة الـ kg بين كتلة نواة الأكسجين وكتلة النيوكليونات الفردية: لنواة الأكسجين ($^{16}_{8}O$) (8 بروتونات و 8 نيوترونات).

النقص في الكتلة = مجموع كتل النيوكليونات منفردة – كتلة النواة

$$\Delta m = ((8 \times 1.672623 + 8 \times 1.674928) - 26.551559) \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

$$\approx 2.29 \times 10^{-28}\ \text{kg}$$

هناك زيادة في كتلة هذا النظام، لذلك يجب توفير طاقة خارجية لتفكيك نواة الأكسجين–16 إلى نيوكليونات حرّة تمامًا.

الخطوة ٢: استخدم معادلة الكتلة–الطاقة لأينشتاين لتحدّد الطاقة المطلوبة:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

الطاقة المطلوبة:

$$= 2.29 \times 10^{-28} \times (3.00 \times 10^8)^2$$

$$\approx 2.06 \times 10^{-11}\ \text{J}$$

هذه القيمة هي أدنى طاقة، فإذا كانت الطاقة أكبر من هذه القيمة، فستظهر الطاقة الإضافية على شكل طاقة حركة للنيوكليونات.

حفظ الكتلة-الطاقة

أشار أينشتاين إلى أن معادلته $\Delta E = \Delta mc^2$ تنطبق على **جميع** تغيّرات الطاقة، وليس فقط على العمليات النووية، لذلك وعلى سبيل المثال فهي تنطبق على التغيّرات الكيميائية أيضًا، فإذا حرقنا بعض الكربون، فإنه يكون لدينا في البداية الكربون والأكسجين، ويكون لدينا في النهاية ثاني أكسيد الكربون؛ وإذا قِسنا كتلة ثاني أكسيد الكربون فسنجد أنها أقل بمقدار ضئيل جدًا من مجموع كتلة الكربون والأكسجين التي كانت في بداية التجربة، وستكون طاقة الوضع الكلية للنظام أقل ممّا كانت عليه في بداية التجربة، وبالتالي تكون الكتلة أقل، لذا يكون التغيّر في الكتلة في تفاعل كيميائي كهذا صغيرًا جدًا، ويصل إلى أقل من ميكروغرام إذا ما بدأنا بكتلة (1 kg) من الكربون والأكسجين، وعند مقارنة هذا التغير بالتغيّر في الكتلة الذي يحدث أثناء انشطار (1 kg) من اليورانيوم – والذي سيعرض لاحقًا في هذه الوحدة – سنجد أن التغيّر في الكتلة في مادة كيميائية يشكل مقدارًا ضئيلًا جدًا من الكتلة الأصلية، ولهذا السبب لا نلاحظه.

أسئلة

(٣) تحرّر الشمس كميات هائلة من الطاقة، فالقدرة الناتجة من الشمس تساوي (4.0×10^{26} W). قدّر مقدار النقص في كتلتها في كل ثانية بسبب فقدان هذه الطاقة.

(٤) **أ.** احسب الطاقة المنبعثة إذا تشكّلت نواة ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ من بروتونات ونيوترونات منفصلة وساكنة. استخدم كتل الجسيمات المعطاة في الجدول ٩–٢.

ب. احسب الطاقة المنبعثة لكل نيوكليون.

الجسيم	الكتلة ($\times 10^{-27}$ kg)
البروتون ${}^{1}_{1}\mathrm{p}$	1.672623
النيوترون ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$	1.674928
نواة ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$	6.644661

الجدول ٩–٢ كتل بعض الجسيمات.

(٥) إذا علمت أن الكتلة السكونية لكرة جولف تساوي (150 g)، فاحسب الزيادة في كتلتها عندما تنتقل بسرعة ($50\ \mathrm{m\ s^{-1}}$). ما نسبة هذه الزيادة في الكتلة كنسبة مئوية من الكتلة السكونية؟

وحدة أخرى للكتلة

عند حساب قيم الطاقة باستخدام المعادلة $\Delta E = \Delta m c^2$، من الضروري استخدام قيم الكتلة بوحدة الـ (kg)، وهي وحدة الكتلة في النظام الدولي للوحدات (SI)، ومع ذلك فإن كتلة النواة صغيرة جدًا ربما (10^{-25} kg)، وهذه الأرقام غير ملائمة؛ وكبديل عنها غالبًا ما تُعطى الكتل الذرية والنووية بوحدة مختلفة، وهي **وحدة الكتلة الذرية** **Atomic mass unit** (رمزها u).

مصطلحات علمية

وحدة الكتلة الذرية

Atomic mass unit:

$\frac{1}{12}$ من كتلة ذرة كربون–12

معامل التحويل من وحدة كتلة ذرية (u) إلى كيلوغرام (kg) هو:

$$1\ \mathrm{u} = 1.660538922 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

لتحويل كتلة جسيم من وحدة (u) إلى وحدة (kg)، ما عليك سوى الضرب في معامل التحويل المبيّن أعلاه، عادةً (1.6605×10^{-27}) وهو دقيق بما فيه الكفاية.

يبيّن الجدول ٩–٣ كتل البروتون والنيوترون وبعض الأنوية بوحدة (u)، ومن المفيد ذكر أن الكتلة بوحدة (u) قريبة جدًا من عدد النيوكليونات (A)، على سبيل المثال كتلة نواة اليورانيوم–235 بوحدة (u) هي (235 u) تقريبًا.

النواة	الرمز	الكتلة بوحدة (u)
البروتون	${}^{1}_{1}\mathrm{p}$	1.007276
النيوترون	${}^{1}_{0}\mathrm{n}$	1.008665
الهيليوم–4	${}^{4}_{2}\mathrm{He}$	4.001506
الكربون–12	${}^{12}_{6}\mathrm{C}$	12.000000
البوتاسيوم–40	${}^{40}_{19}\mathrm{K}$	39.963998
اليورانيوم–235	${}^{235}_{92}\mathrm{U}$	235.043930

الجدول ٩–٣ كتل بعض الجسيمات بوحدة الكتلة الذرية u، قيست بعضها إلى عدة منازل عشرية أكثر مما هو مبيّن هنا.

أسئلة

٦ أ. كتلة ذرة الحديد $^{56}_{26}Fe$ تساوي (55.934937 u). احسب كتلتها بوحدة الـ kg.

ب. كتلة ذرة الأكسجين $^{16}_{8}O$ تساوي (2.656015×10^{-26} kg). احسب كتلتها بوحدة الكتلة الذرية u.

٧ يعطي الجدول ٩-٣ كتل عدة جسيمات (بوحدة الكتلة الذرية u). استخدم الجدول لتحديد ما يأتي (بثلاثة أرقام معنوية):

أ. كتلة نواة الهيليوم-4 بالكيلوغرام (kg).

ب. كتلة (1.0 mole) من أنوية اليورانيوم-235 بالغرام (g).

(عدد أفوجادرو: $N_A = 6.02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$)

٩-٣ الطاقة المنبعثة في الانحلال الإشعاعي

قد تبعث الأنوية غير المستقرة جسيمات ألفا (α) وجسيمات بيتا (β^-) ويكون لتلك الجسيمات مقدارًا كبيرًا من طاقة الحركة، ويمكننا استخدام معادلة الكتلة-الطاقة لأينشتاين $\Delta E = \Delta m c^2$ لشرح مصدر هذه الطاقة، فعلى سبيل المثال انحلال نواة اليورانيوم-238، فهي تنحل بواسطة انبعاث جسيم ألفا وتتحوّل إلى نظير الثوريوم، كما في المعادلة:

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

تكون نواة اليورانيوم في حالة طاقة عالية وغير مستقرة نسبيًا، فتبعث جسيم ألفا وتكون نواة الثوريوم المتبقية في حالة طاقة أقل لكن أكثر استقرارًا، سيكون هناك نقص في كتلة النظام، حيث تكون الكتلة الكلّية المكوّنة من نواة الثوريوم وجسيم ألفا أقل من كتلة نواة اليورانيوم، ووفقًا لمعادلة (الكتلة-الطاقة) لأينشتاين، يكافئ هذا الفرق في الكتلة (Δm) الطاقة المنبعثة كطاقة حركة للنواتج، وباستخدام أكثر القيم المتوفرة ضبطًا:

كتلة نواة اليورانيوم $(^{238}_{92}U) = 3.95283 \times 10^{-25}$ kg

الكتلة الكلية لنواة الثوريوم $(^{234}_{90}Th)$ وجسيم ألفا $(^{4}_{2}He) = 3.95276 \times 10^{-25}$ kg

التغيّر في الكتلة:

$$\Delta m = (3.95276 - 3.95283) \times 10^{-25}\ kg$$

$$\approx -7.0 \times 10^{-30}\ kg$$

تُظهِر إشارة السالب نقصًا في الكتلة، وبالتالي ووفقًا للمعادلة $\Delta E = \Delta m c^2$، تتحرّر طاقة في عملية الانحلال:

الطاقة المنبعثة:

$$E \approx 7.0 \times 10^{-30} \times (3.00 \times 10^{8})^2$$

$$\approx 6.3 \times 10^{-13}\ J$$

هذه كمية هائلة من الطاقة لانحلال نواة واحدة. المول الواحد من اليورانيوم-238 يحتوي على عدد أفوجادرو من الأنوية (6.02×10^{23} نواة)، فيكون لديه القدرة على تحرير طاقة كلية تساوي (10^{11} J) تقريبًا.

يمكننا حساب الطاقة المنبعثة في كل انحلال، بما في ذلك انحلال β باستخدام الطريقة نفسها.

سؤال

(٨) تتحل نواة البريليوم–10 ($^{10}_{4}Be$) إلى نظير البورون B بانبعاث β^-.

أ. اكتب معادلة الانحلال النووي لنواة البريليوم–10.

ب. احسب الطاقة المنبعثة في هذا الانحلال واذكر شكلها.

(كتلة نواة البريليوم–10 ($^{10}_{4}Be$) = 1.66238×10^{-26} kg

كتلة نظير البورون = 1.66219×10^{-26} kg

كتلة الإلكترون = 9.10938×10^{-31} kg)

٤-٩ طاقة الربط النووي واستقرار النواة

يمكننا الآن أن نعرف لماذا تكون بعض الأنوية أكثر استقرارًا من غيرها، فعند تشكّل نواة ما من نيوكليونات منفصلة فإن طاقة ما ستنبعث، ولتفكيك النواة يجب تزويدها بالطاقة، بعبارة أخرى يجب بذل شغل ضد القوة النووية القوية التي تربط النيوكليونات معًا. وكلما ازدادت الطاقة اللازمة لحدوث ذلك، ازداد استقرار النواة.

أدنى طاقة مطلوبة لتفكيك نواة ما كليًا إلى نيوكليونات منفصلة تُعرف باسم **طاقة الربط النووي** **Nuclear binding energy**.

مصطلحات علمية

طاقة الربط النووي Nuclear binding energy: أدنى طاقة خارجية مطلوبة لفصل جميع نيوترونات وبروتونات نواة ما تمامًا إلى ما لا نهاية.

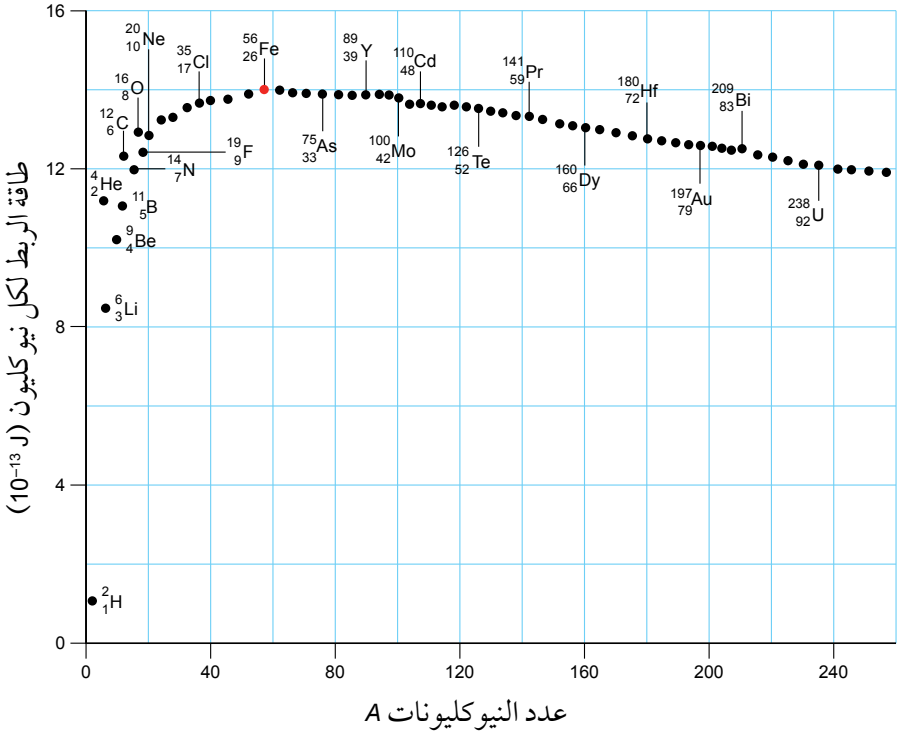
انتبه: هذه ليست طاقة مخزّنة في النواة بل على العكس من ذلك، فهي الطاقة التي يجب أن تُعطى للنواة من أجل تفكيكها. في مثال الـ $^{12}_{6}C$ الذي تمّت مناقشته سابقًا، حسبنا طاقة الربط النووي من الفرق في الكتلة بين كتلة نواة $^{12}_{6}C$ ومجموع كتل البروتونات والنيوترونات المنفصلة المكوّنة لها.

من أجل مقارنة استقرار الأنوية المختلفة نحتاج إلى النظر في **طاقة الربط لكل نيوكليون**.

يمكننا تحديد طاقة الربط لكل نيوكليون للأنوية على النحو الآتي:

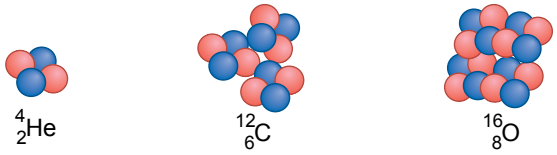
- حساب النقص في كتلة النواة.
- استخدام معادلة (الكتلة–الطاقة) لأينشتاين لحساب طاقة الربط النووي بضرب النقص في الكتلة في (c^2).
- قسمة طاقة الربط النووي على عدد النيوكليونات لحساب طاقة الربط لكل نيوكليون.

يبيّن الشكل ٩–٣ تغيّر طاقة الربط لكل نيوكليون مع عدد النيوكليونات (A) للأنوية، إذ تمثل النقطة الحمراء موقع نواة الحديد–56 في التمثيل البياني النقطي (انظر المثال ٤)، فكلما ازدادت قيمة طاقة الربط لكل نيوكليون، ازداد ارتباط النيوكليونات التي تتكوّن منها النواة، والملاحظة الأكثر لفتًا للانتباه هي أن الأنوية ليست متماثلة، فبعض الأنوية ترتبط بإحكام أكثر من غيرها.



الشكل ٩-٣ يبيّن هذا التمثيل البياني طاقة الربط لكل نيوكليون لعدد من الأنوية، حيث تصبح الأنوية أكثر استقرارًا مع زيادة طاقة الربط لكل نيوكليون.

إذا تمعّنت في هذا التمثيل البياني أكثر فسترى الاتجاه العام يميل إلى أن الأنوية الخفيفة تكون لها طاقة ربط لكل نيوكليون منخفضة؛ ومع ذلك لاحظ أن للهيليوم طاقة ربط لكل نيوكليون أعلى بكثير مما كان متوقع بناءً على موقعه في الجدول الدوري، فطاقة الربط لكل نيوكليون العالية تعني أن النواة مستقرة جدًا، ومن الأنوية المستقرة الأخرى الشائعة $^{12}_{6}C$ و $^{16}_{8}O$، التي يمكن التفكير فيها على أنها على التوالي تتكوّن من ثلاثة أو أربعة جسيمات ألفا مرتبطة معًا (الشكل ٩-٤).



الشكل ٩-٤ تتشكل أنوية أكثر استقرارًا عندما ترتبط «جسيمات ألفا» بعضها ببعض؛ وفي النواتين $^{12}_{6}C$ و $^{16}_{8}O$ لا تبقى «جسيمات ألفا» منفصلة، كما هو مبيّن في الشكل هنا، بل ترتبط البروتونات والنيوترونات معًا بإحكام.

بالنسبة إلى الأنوية التي تحتوي على $A > 20$ تقريبًا، فإنه لا يوجد تباين كبير في طاقة الربط لكل نيوكليون بينها، وقد وجد أن أكبر قيمة لطاقة الربط لكل نيوكليون هي لنواة $^{56}_{26}Fe$؛ إذ يتطلب نظير الحديد هذا أكبر قدر من الطاقة لكل نيوكليون لتفكيكه إلى نيوكليونات منفصلة، ولهذا فإن الحديد-56 هو أكثر النظائر استقرارًا في الطبيعة.

مثال

٤. استخدم البيانات الآتية لحساب طاقة الربط لكل نيوكليون لنواة الحديد $^{56}_{26}Fe$.

كتلة البروتون = 1.673×10^{-27} kg

كتلة النيوترون = 1.675×10^{-27} kg

كتلة نواة الحديد = 9.288×10^{-26} kg

الخطوة ١: احسب النقص في الكتلة.

عدد النيوترونات = $56 - 26 = 30$

النقص في الكتلة:

$$\Delta m = (30 \times 1.675 \times 10^{-27} + 26 \times 1.673 \times 10^{-27}) - 9.288 \times 10^{-26}$$

$$= 8.680 \times 10^{-28} \text{ kg}$$

الخطوة ٢: احسب طاقة الربط لنواة الحديد باستخدام معادلة (الكتلة–الطاقة) لأينشتاين.

طاقة الربط النووي:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 8.680 \times 10^{-28} \times (3.00 \times 10^8)^2$$

$$= 7.812 \times 10^{-11} \text{ J}$$

الخطوة ٣: احسب طاقة الربط لكل نيوكليون.

طاقة الربط لكل نيوكليون:

$$= \frac{7.812 \times 10^{-11}}{56} = 14 \times 10^{-13} \text{ J}$$

ألقِ نظرة أخرى على الشكل ٩–٣ لتجد أن القيمة تتطابق مع موقع الحديد–56 في التمثيل البياني.

أسئلة

٩ أ. اشرح سبب عدم ظهور الهيدروجين $^{1}_{1}H$ (البروتون) في التمثيل البياني المبيّن في الشكل ٩–٣.

ب. استخدم الشكل ٩–٣ لتقدير طاقة الربط لنواة $^{14}_{7}N$.

١٠ كتلة نواة البريليوم $^{8}_{4}Be$ تساوي $(1.33 \times 10^{-26}$ kg). احسب لهذه النواة:

أ. النقص في الكتلة بوحدة الـ (kg).

ب. طاقة الربط النووي بوحدة (MeV).

ج. طاقة الربط لكل نيوكليون في النواة بوحدة (MeV).

طاقة الربط النووي في الانشطار النووي والاندماج النووي

يمكننا استخدام التمثيل البياني لطاقة الربط لكل نيوكليون لمساعدتنا في تحديد أي عملية نووية قد تحدث: الانشطار النووي أم الاندماج النووي (الشكل ٩–٥).

الانشطار النووي

الانشطار النووي Nuclear fission هي العملية التي تتجزأ فيها نواة ثقيلة لتشكّل نواتَين أصغر (وليس مجرد انبعاث إشعاع ألفا أو بيتا).

مصطلحات علمية

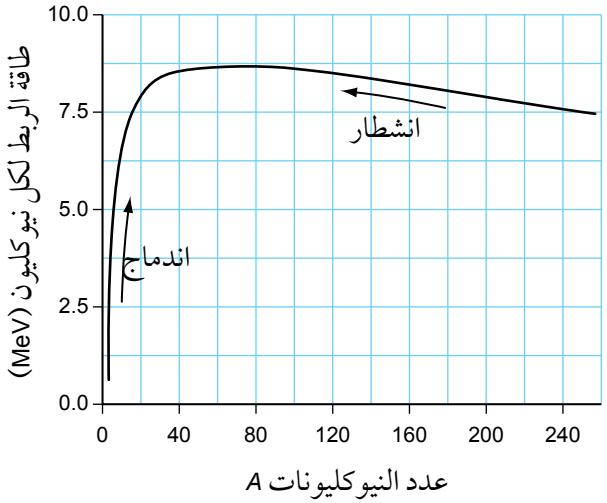
الانشطار النووي Nuclear fission: العملية التي تتجزأ فيها نواة ثقيلة إلى نواتَين أصغر.

قد يتجزأ نظير اليورانيوم–235 تلقائيًا، ولكن مثل هذا الحدث نادر جدًا، ومع ذلك فإنه في عملية معروفة مثل الانشطار **المستحث**، يمكن تجزئة اليورانيوم–235 بواسطة امتصاص نيوترون بطيء الحركة (يقصد بالانشطار المستحث: التدخل من مؤثر أو عامل خارجي لتحفيز عملية الانشطار). فيما يأتي تفاعل نووي مثالي:

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \longrightarrow ^{236}_{92}U \longrightarrow ^{142}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 2\,^{1}_{0}n$$

تلتقط نواة اليورانيوم–235 النيوترون فتصبح نواة يورانيوم–236، وتكون غير مستقرة تمامًا، وخلال فترة زمنية قصيرة جدًا – عادةً ما تكون بضعة ميكروات من الثانية – ينشطر اليورانيوم–236 إلى باريوم–142، وكريبتون–92 واثنين من

النيوترونات سريعة الحركة، فتتحرّر طاقة من التفاعل كطاقة حركة؛ لأن الكتلة الكلية للنظام تنخفض، وهذا ما نتوقعه من معادلة (الكتلة–الطاقة) لأينشتاين. يمكننا الآن تفسير هذا التفاعل بطريقة أخرى، فإذا نظرنا إلى الشكل ٩–٥، نلاحظ أن هذين الجزأَين (النواتين الناتجتين) لهما طاقة ربط لكل نيوكليون أكبر من النواة الأصلية (الأم) وهي نواة اليورانيوم، وبالتالي إذا تجزأت نواة اليورانيوم بهذه الطريقة فستتحرّر طاقة، وستكون طاقة الربط الكلية لكل من نواتَي $^{142}_{56}Ba$ و $^{92}_{36}Kr$ أكبر من طاقة الربط لنواة $^{235}_{92}U$، والفرق هو الطاقة المنبعثة (لاحظ أن النيوترون هو نيوكليون وحيد، لذلك له طاقة ربط صفرية).



الشكل ٩–٥ كل من الاندماج والانشطار هما عمليتان تميلان إلى زيادة طاقة الربط لكل نيوكليون للجسيمات المتضمنة في العملية.

الاندماج النووي

الاندماج النووي Nuclear fusion هو العملية التي ترتبط من خلالها نواتان خفيفتان جدًا لتشكّلا معًا نواة أثقل، وهذه هي العملية التي تتحرّر من خلالها الطاقة في الشمس عندما تندمج أنوية الهيدروجين لتكوين أنوية الهيليوم. عندما ترتبط نواتان خفيفتان معًا، تكون طاقة الربط النووية النهائية للنواة التي تشكلت أكبر من طاقة الربط النووية الكلية للأنوية المندمجة، ومرة أخرى يكون الفرق هو الطاقة المنبعثة في تفاعل الاندماج، وطاقة الربط النووية العالية لنواة $^{4}_{2}He$ تعني أنه من النادر أن تندمج هذه الأنوية.

مصطلحات علمية

الاندماج النووي Nuclear fusion: العملية التي ترتبط من خلالها نواتان خفيفتان جدًا لتشكّلا معًا نواة أثقل.

إن تفاعل الاندماج الآتي هو أحد التفاعلات العديدة التي تحدث في داخل قلب النجوم، بما في ذلك شمسنا:

$$^{2}_{1}H + ^{1}_{1}p \longrightarrow ^{3}_{2}He$$

حيث ترتبط نواة الديوتيريوم ($^{2}_{1}H$) مع بروتون ($^{1}_{1}p$) لتكوين نواة هيليوم–3 ($^{3}_{2}He$)، فطاقة الربط لنواة الديوتيريوم (2.2 MeV)، وطاقة الربط لنواة الهيليوم–3 تساوي (7.7 MeV)، والطاقة المنبعثة في تفاعل الاندماج هذا تساوي (5.5 MeV) وهو الفرق بين طاقتَي الربط النووي، ومن المفيد ذكر أن طاقة الربط لكل نيوكليون لنواة الهيليوم–3 هي أكبر ممّا هي لنواة الديوتيريوم، وعليه فإن الاندماج يزيد طاقة الربط لكل نيوكليون، كما هو مبيّن في الشكل ٩–٥.

أسئلة

(١١) استخدم التمثيل البياني لطاقة الربط لكل نيوكليون (الشكل ٩-٥) لاقتراح سبب عدم إمكانية حدوث الانشطار مع «الأنوية الخفيفة» التي لها ($A < 20$)، وسبب عدم إمكانية حدوث الاندماج للأنوية الأثقل التي لها ($A > 40$).

(١٢) استخدم المعلومات الواردة عن الاندماج، لحساب طاقة الربط (بوحدة MeV) لكل نيوكليون في كل جسيم في تفاعل الاندماج الآتي:

$$^{2}_{1}H + ^{1}_{1}p \longrightarrow ^{3}_{2}He$$

ماذا تلاحظ من إجاباتك؟

٩-٥ العشوائية والانحلال الإشعاعي

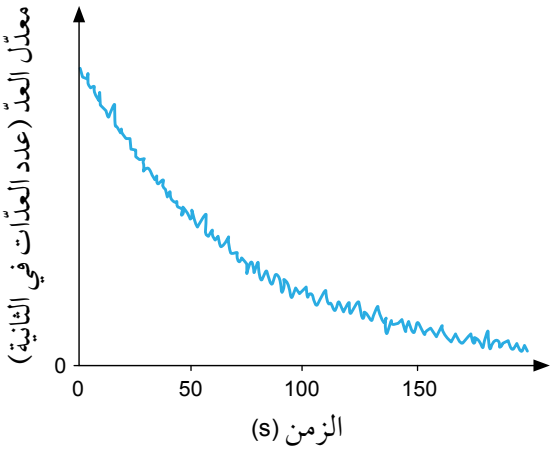
عندما يلتقط أنبوب جايجر-مولر (GM) إشعاعًا، يمثل كل عدّ التقاطًا لأحد جسيمات ألفا أو جسيمات بيتا أو فوتونات جاما؛ ويلاحظ أن العدّات الفردية لا تأتي بانتظام.

يصدر العدّاد نقرًا عشوائيًا وبطريقة غير منتظمة، والزمن التالي للنقرات لا يمكن التنبؤ به بدقة.

يمكنك أن ترى التأثير نفسه إذا كان لديك مقياس معدّل العد (ratemeter) لقياس معدلات أسرع (الصورة ٩-٢)، حيث يتذبذب المؤشر بين القيم الأعلى والأقل، وعادةً ما يكون لمقياس معدّل العد إعداد لضبط «الثابت الزمني» وهو الزمن الذي يقيس فيه المقياس متوسط الذبذبات، وعادة ما يمكن ضبط إعداد هذا المقياس على (1 s) أو (5 s)، وفي حالة ضبط الإعداد على (5 s) ستكون التذبذبات أقل تغيرًا.

الصورة ٩-٢ يمكن أن يضبط الثابت الزمني لمقياس معدّل العد هذا لتخفيف التذبذبات السريعة في معدّل العدّ.

يبيّن الشكل ٩-٦ تمثيلًا بيانيًا (معدّل العد - الزمن)، حيث تم ضبط إعداد الزمن لعدد من الثواني للحصول على هذا الشكل. يُلاحظ أن معدّل العدّ يتناقص مع مرور الزمن كلما تناقص عدد الأنوية المشعة المتبقية، وتكون التذبذبات على جانبَي المنحنى إلى أعلى وإلى أسفل بسبب عشوائية الانحلال.



الشكل ٩-٦ يبيّن معدّل العدّ عشوائية الانحلال.

لذلك يتضح أن الانحلال الإشعاعي ظاهرة عشوائية غير منتظمة، ولكن هل نعجز عن التنبؤ بها تمامًا؟ ليس بالضبط، إذ يمكننا ببساطة قياس متوسط معدّل الانحلال، فقد نقيس عدد العدّات الملتقطة في (1000 s)، ثم نحسب متوسط العدد في الثانية؛ ولا يمكننا التأكد من متوسط المعدّل هذا بسبب أن عدد العدّات في (1000 s) ستتذبذب أيضًا، فكل قياساتنا للانحلال الإشعاعي غير مؤكّدة بطبيعتها وغير دقيقة، ولكن بأخذ المتوسطات على مدى فترة زمنية طويلة بما يكفي، يمكننا تقليل أو خفض التقلبات العشوائية للكشف عن النمط الأساسي.

الانحلال التلقائي

يحدث الانحلال الإشعاعي داخل النواة غير المستقرة لذرّة ما، فتبعث النواة إشعاعًا وتصبح نواة ذرّة عنصر مختلف، ولا نستطيع توقّع متى سيحدث هذا لنواة معيّنة، فإذا راقبنا نواة ما فإنه لا يمكننا رؤية أي تغيير يدل على أن النواة تستعد للانحلال الإشعاعي، وإذا لم تنحلّ في الساعة الأولى عندما كنا نراقبها فلا يمكننا القول إنه من المرجح أكثر أنها ستنحلّ في الساعة التالية، علاوة على ذلك لا يمكننا أن نؤثر على احتمالية انحلال نواة ما – على سبيل المثال – بواسطة تغيير درجة حرارتها.

الغريب في الأمر أنّ هذا يتعارض مع ملاحظاتنا اليومية للطريقة التي تتغير بها الأشياء من حولنا، فنحن نلاحظ الأشياء تتغيّر، فهي تتقدم بالعمر تدريجيًا وتموت وتتعفن ثم تتحلّل، لكن الحال هنا مختلفة في مقياس الذرات والأنوية؛ فالعديد من الذرات التي نتعامل معها موجودة منذ مليارات السنين، وستبقى موجودة لفترة طويلة؛ لأن أنوية الذرات لا تهرم.

إذا نظرنا إلى عدد كبير جدًا من ذرات مادة مشعة، فسنرى أن عدد الأنوية غير المنحلة يتناقص تدريجيًا، ومع ذلك فإنه لا يمكننا أن نتنبأ بوقت تحلل نواة **مفردة**، فكل نواة تنحل تلقائيًا في لحظة من الزمن لا يمكن التنبؤ بها، وباستقلالية عن الأنوية المجاورة لها، وهذا بسبب أن الأنوية المتجاورة لا تتفاعل بعضها مع بعض (على عكس الذرات المتجاورة)، فالنواة تشكّل جزءًا صغيرًا جدًا من حجم الذرّة وتأثير القوى النووية لا يمتد بعيدًا جدًا خارج النواة، لذلك لا يمكن لنواة واحدة أن تؤثر على نواة مجاورة لها بواسطة القوة النووية. إن البقاء داخل نواة ما يشبه العيش في منزل بوسط مكان مجهول، إذ يمكنك فقط رؤية ما في الحديقة، ولكن كل شيء خلفه مظلم والمنزل المجاور لك يقع على بُعد (1000 km).

حقيقة أن كل نواة تنحل باستقلالية عن الأنوية المجاورة لها وعن العوامل البيئية، يفسر النمط العشوائي للنقرات التي نسمعها من عداد جايجر وتذبذبات المؤشر على مقياس المعدّل، فالانحلال الإشعاعي **تلقائي وعشوائي**:

– الانحلال الإشعاعي **تلقائي** للأسباب الآتية:

- انحلال نواة معيّنة لا يتأثر بوجود أنوية أخرى.
- انحلال الأنوية لا يمكن أن يتأثر بالتفاعلات الكيميائية أو العوامل الخارجية مثل درجة الحرارة والضغط.

– الانحلال الإشعاعي **عشوائي** للأسباب الآتية:

- يستحيل التنبؤ بوقت تحلل نواة معيّنة في عيّنة ما.
- كل نواة في العيّنة لديها فرصة الانحلال نفسها لكل وحدة زمنية.

٦-٩ نمذجة الانحلال الإشعاعي رياضيًا

لقد رأينا أن الانحلال الإشعاعي عشوائي وتلقائي؛ فلا يمكننا أن نقول متى ستنحل إحدى الأنوية، وعلينا أن نبدأ بالتفكير في الأعداد الكبيرة جدًا من الأنوية، فالقطعة الصغيرة من المادة المشعة تحتوي على أكثر من 10^{15} نواة، ولذلك يمكننا التحدث عن متوسط عدد الأنوية التي نتوقّع انحلالها في فترة زمنية معيّنة، وبمعنى آخر معرفة **متوسط** معدل الانحلال، وعلى الرغم من أنه ليس بمقدورنا التنبّؤ بانحلال الأنوية المفردة إلّا أنه يمكننا القول أنّ

أنواعًا معيّنة من الأنوية أكثر احتمالًا من غيرها بأن تنحل، على سبيل المثال، نواة الكربون–12 مستقرة، بينما ينحل الكربون–14 تدريجيًا عبر آلاف السنين، وفي المقابل أنوية الكربون–15 بالمتوسط تنحلّ في بضع ثوان.

بسبب الطبيعة التلقائية للنشاط الإشعاعي علينا إجراء قياسات على عدد كبير جدًا من الأنوية ثم حساب المتوسطات، وإحدى الكميات التي يمكننا تحديدها هي احتمالية أن تنحل نواة ما في فترة زمنية معيّنة، على سبيل المثال لنفترض أننا لاحظنا مليون نواة لنظير معيّن، وبعد ساعة واحدة انحل 200000 نواة، فاحتمالية أن نواة ما ستنحل في ساعة واحدة هي 0.2 أو 20%؛ لأن 20% من الأنوية قد انحلت في هذا الزمن. بالطبع هذه ليست سوى قيمة تقريبية؛ لأننا قد نكرّر التجربة ونجد أن 199000 من الأنوية فقط انحلّت بسبب الطبيعة العشوائية للانحلال، وكلما كرّرنا التجربة أكثر، كانت إجاباتنا أكثر موثوقية.

يسمى احتمال انحلال نواة ما لكل وحدة فترة زمنية **ثابت الانحلال (Decay constant (λ**؛ على سبيل المثال لدينا:

ثابت الانحلال: $\lambda = 0.20\ h^{-1}$

لاحظ: لأننا نقيس احتمالية الانحلال لكل وحدة فترة زمنية (λ) فإن وحداته تكون (h^{-1}، أو s^{-1}، أو day^{-1}، أو $year^{-1}$، إلخ).

النشاط الإشعاعي Activity (A) لعيّنة مشعّة هو المعدل الذي تنحل به الأنوية أو تتفكك.

يقاس النشاط الإشعاعي بالانحلال لكل ثانية s^{-1} (أو لكل ساعة h^{-1}، أو لكل يوم day^{-1})، فنشاط انحلالٍ واحدٍ لكل ثانية هو بيكريل واحد (1 Bq):

$$1\ Bq = 1\ s^{-1}$$

مصطلحات علمية

ثابت الانحلال Decay constant: احتمال انحلال نواة ما خلال فترة زمنية.

النشاط الإشعاعي Activity: معدل انحلال أنوية مصدر مشع. وحدة النشاط هي بيكريل Bq.

من الواضح أن النشاط الإشعاعي لعيّنة ما تعتمد على ثابت الانحلال (λ) للنظير الذي ننظر إليه، وكلما كان ثابت الانحلال أكبر (احتمال أن تنحل نواة مفردة لكل وحدة فترة زمنية) يكون النشاط الإشعاعي للعيّنة أكبر، ويعتمد النشاط الإشعاعي كذلك على عدد الأنوية غير المنحلة (N) الموجودة في العيّنة.

لذلك يكون النشاط الإشعاعي (A) لعيّنة (N) من الأنوية غير المنحلة:

$$A = \lambda N$$

حيث (λ): ثابت انحلال النظير، و (N): عدد الأنوية غير المنحلة.

يمكننا التفكير في النشاط الإشعاعي على أنه عدد جسيمات ألفا أو جسيمات بيتا المنبعثة من المصدر لكل وحدة زمنية أيضًا، لذلك نكتب النشاط الإشعاعي (A) على النحو الآتي أيضًا:

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

حيث ($-\Delta N$) يساوي التغير في عدد الأنوية المنحلة في العيّنة في فترة زمنية صغيرة (Δt). تستخدم الإشارة السالبة في المعادلة لأن التغير في عدد الأنوية المشعة يكون سالبًا (عدد الأنوية يتناقص)، لكن النشاط الإشعاعي له قيمة موجبة.

أمثلة

٥. يبعث مصدر مشع جسيمات بيتا، والنشاط الإشعاعي لهذا المصدر (2.8×10^7 Bq). قدّر عدد جسيمات بيتا المنبعثة في فترة زمنية مقدارها (2.0 min)، واذكر أحد الافتراضات التي اتبعتها في الحل.

الخطوة ١: اكتب الكميات المعطاة بوحدات النظام الدولي للوحدات (SI).

$A = 2.8 \times 10^7$ Bq

$\Delta t = 120$ s

الخطوة ٢: حدّد عدد جسيمات بيتا المنبعثة.

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

عدد جسيمات بيتا المنبعثة خلال Δt:

$\Delta N = -A \times \Delta t = -2.8 \times 10^7 \times 120$

$= -3.36 \times 10^9 \approx -3.4 \times 10^9$

وبالتالي فإن عدد جسيمات بيتا المنبعثة هو 3.4×10^9.

لقد افترضنا أن النشاط الإشعاعي يبقى ثابتًا طوال الفترة الزمنية (2.0 min).

٦. تتكوّن عيّنة من 1000 نواة غير منحلة، وثابت انحلال الأنوية يساوي ($0.20\ s^{-1}$). احسب النشاط الإشعاعي الابتدائي للعيّنة، ثم قدّر النشاط الإشعاعي للعيّنة بعد (1.0 s).

الخطوة ١: بما أن النشاط الإشعاعي $A = \lambda N$، فإنه يكون لدينا:

$A = 0.20 \times 1000 = 200\ s^{-1} = 200$ Bq

الخطوة ٢: بعد (1.0 s)، نتوقع أن تبقى 800 نواة غير منحلة، وسيكون النشاط الإشعاعي للعيّنة بعد ذلك:

$A = 0.2 \times 800 = 160\ s^{-1} = 160$ Bq

(سيكون النشاط الإشعاعي في الواقع أعلى قليلًا من هذا المعدل، وبما أن معدل الانحلال يتناقص مع الزمن طوال الوقت، فسينحل أقل من 200 نواة خلال الثانية الأولى).

معدل العدّ

على الرغم من أننا غالبًا ما نهتم بالحصول على النشاط الإشعاعي لعيّنة ما من المواد المشعة، والتي لا يمكننا قياسها مباشرة، فإننا لا نتمكن بسهولة من الكشف عن جميع الإشعاعات المنبعثة؛ لأن بعض الإشعاع سينبعث خارج أجهزة الكشف الخاصة بنا، وبعضها قد يُمتص في داخل العيّنة نفسها، حيث يُوضع أنبوب (جايجر–مولر) أمام المصدر المشع، لذلك يُكشف فقط جزء من النشاط الإشعاعي، وكلما ابتعد الأنبوب عن المصدر قلّ معدل العدّ، لذلك تعطي قياساتنا **معدل عدّ Count rate** مسجل (R) أقل بكثير من النشاط الإشعاعي الحقيقي، فإذا عرفنا مدى كفاءة عمل نظام الكشف، يمكننا استنتاج النشاط الإشعاعي (A) من معدل العد المسجل (R)، وإذا كان لمستوى إشعاع الخلفية تأثير، فعندئذٍ يجب أن يُطرح لإعطاء معدل العدّ **المصحّح**.

مصطلحات علمية

معدل العدّ Count rate: عدد جسيمات (بيتا أو ألفا) أو فوتونات أشعة جاما التي تُكشف لكل وحدة زمنية بواسطة أنبوب جايجر–مولر، ودائمًا ما يكون معدل العدّ جزءًا صغيرًا من النشاط الإشعاعي للعيّنة.

أسئلة

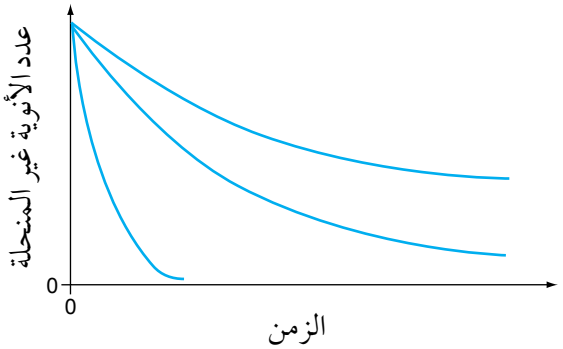
(١٣) تحتوي عيّنة الكربون-15 بداية على 500000 نواة غير منحلة، وثابت الانحلال لنظير الكربون هذا يساوي ($0.30\ s^{-1}$). احسب النشاط الإشعاعي الابتدائي للعيّنة.

(١٤) تُعطي عيّنة صغيرة من الراديوم معدل عدّ مسجّل مقداره 20 عدًا لكل دقيقة في جهاز الكشف، ومن المعروف أن العدّاد يكشف 10% فقط من الأنوية المنحلة في العيّنة، التي تحتوي على 1.5×10^9 نواة غير منحلة. احسب ثابت الانحلال لهذا النظير من الراديوم.

(١٥) من المعروف أن العيّنة المشعة ينبعث منها جسيمات ألفا وجسيمات بيتا وإشعاعات جاما؛ اذكر ثلاثة أسباب تشير إلى أن قياس معدل العدّ بواسطة عداد جايجر-مولر الموضوع بجوار هذه العيّنة أقل من النشاط الإشعاعي الحقيقي للعيّنة.

٩-٧ التمثيلات البيانية للانحلال ومعادلاته

يتضاءل النشاط الإشعاعي لمادة مشعة بالتدريج مع مرور الزمن، فالأنوية الذرية تبعث إشعاعًا وتصبح مواد مختلفة، ونمط الانحلال الإشعاعي هو مثال مهم جدًا للأنماط التي يمكن الحصول عليها في العديد من المواقف المختلفة، وهذا النمط يسمى **الانحلال الأُسّي Exponential decay**، ويبيّن الشكل ٩-٧ التمثيلات البيانية لانحلال ثلاثة نظائر مختلفة، لكل منها معدّل انحلال مختلف.



الشكل ٩-٧ تنحلّ بعض المواد المشعة أسرع من غيرها.

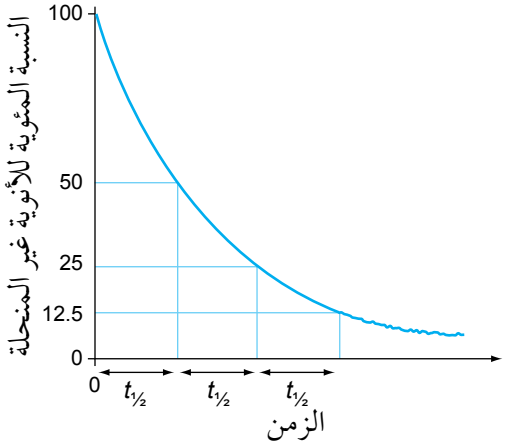
مصطلحات علمية

الانحلال الأُسّي Exponential decay: التناقص في كمية ما بحيث يكون معدّل التناقص متناسبًا مع مقدار الكمية.

عمر النصف Half-life: عمر النصف ($t_{\frac{1}{2}}$) لنظير ما هو متوسط الزمن الذي يستغرقه نصف الأنوية النشطة في العيّنة حتى تنحلّ.

على الرغم من أن التمثيلات البيانية الثلاثة تبدو مختلفة، إلّا أن بينها شيء مشترك وهو شكلها، فهي خطوط منحنية لها خاصية مميّزة؛ ومن خلال مفهوم **عمر النصف Half-life** للنظير يمكنك أن تفهم ما يميّز شكل هذه المنحنيات.

عمر النصف ($t_{\frac{1}{2}}$) لنظير ما هو متوسط الزمن الذي يستغرقه نصف الأنوية النشطة في العيّنة حتى تنحلّ؛ ففي زمن يساوي عمر النصف، سينخفض نشاط العيّنة إلى النصف أيضًا؛ لأن النشاط الإشعاعي يتناسب طرديًا مع عدد الأنوية غير المنحلة ($A \propto N$). وسيستغرق نصف عدد الأنوية المتبقية المقدار نفسه من الزمن لتنحلّ مرة أخرى، وعمر نصف ثالث لينحلّ نصف العدد الجديد للأنوية المتبقية (الشكل ٩-٨).



الشكل ٩-٨ عمر النصف لنظير ما هو متوسط الزمن الذي يستغرقه نصف الأنوية النشطة في العيّنة حتى تنحلّ.

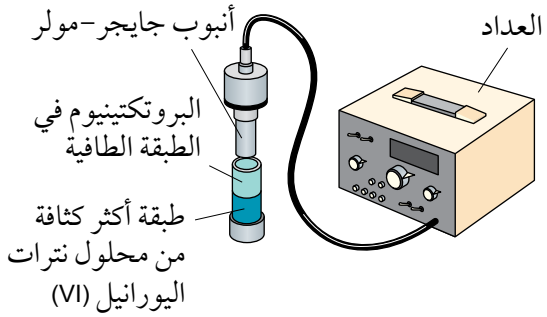
من حيث المبدأ لا يمكن أن يصل منحنى التمثيل البياني إلى الصفر أبدًا، ولكنه يقترب من الصفر أكثر فأكثر فقط، ومن الناحية العملية عندما يكون عدد الأنوية المتبقية غير المنحلّة قليلًا فقط فإن التمثيل البياني سيتوقف عن أن يكون منحنًى سلسًا أي مشابهًا للشكل ٩-٦ (بسبب الطبيعة العشوائية للانحلال)، وسيصل في النهاية إلى الصفر. نحتاج إلى استخدام فكرة عمر النصف لأننا لا نستطيع تحديد وقت تحلّل العيّنة تمامًا.

مهارة عملية ٩-١

تحديد عمر النصف

إذا كنت ستحدّد عمر النصف لمادة مشعة في المختبر، فعليك أن تختار نظير عنصر لن ينحلّ بسرعة كبيرة أو ببطء شديد، وإن أنسب نظير من الناحية العملية هو البروتكتينيوم-234 (^{234}Pa)، الذي ينحلّ بانبعاث إشعاع بيتا، وهو متوفر في قنينة تحتوي على محلول لأحد مركبات اليورانيوم (نترات اليورانيل VI)، (الشكل ٩-٩)، عند رجّ القنينة يمكنك فصل البروتكتينيوم إلى الطبقة العليا من المذيب في القنينة، وهنا يتيح لك العدّاد قياس انحلال البروتكتينيوم.

بعد تسجيل عدد العدّات المتلاحقة في فترات زمنية مدتها 10 ثوانٍ على طول فترة زمنية من بضع دقائق، يمكنك بعد ذلك رسم تمثيل بياني واستخدامه لإيجاد عمر النصف للبروتكتينيوم-234.



الشكل ٩-٩ إعدادات تجربة لملاحظة انحلال البروتكتينيوم-234.

المعادلات الرياضية للانحلال الإشعاعي

يمكننا كتابة معادلة للتعبير عن التمثيل البياني المبيّن في الشكل ٩-٨، فإذا بدأنا بعدد (N_0) نواة غير منحلّة، فإن العدد (N) الذي يبقى غير منحلّ بعد زمن (t) يُعطى بواسطة المعادلة:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

في هذه المعادلة (λ) هو ثابت انحلال النظير (قد تكتب هذه المعادلة أحيانًا على النحو الآتي $N = N_0 \exp(-\lambda t)$). لاحظ أنه يجب عليك الانتباه للوحدات، فإذا كانت (λ) بوحدة s^{-1}، فإنه يجب أن يكون الزمن (t) بوحدة s.

يتناسب النشاط الإشعاعي (A) لعيّنة ما طرديًا مع عدد الأنوية غير المنحلّة (N)، ومن هنا فإن النشاط الإشعاعي يتناقص أُسّيًا:

$A = A_0 e^{-\lambda t}$ (A_0 هو النشاط الإشعاعي في الزمن $t = 0$)

نقيس عادة معدل العدّ المسجل (R) في المختبر بدلًا من النشاط الإشعاعي أو عدد الأنوية غير المنحلّة، ونظرًا إلى أن معدل العدّ هو جزء صغير من النشاط الإشعاعي، فإن معدل العدّ المسجل (R) يتناقص أُسّيًا بشكل كبير مع الزمن أيضًا:

$R = R_0 e^{-\lambda t}$ (R_0 هو معدل العدّ المسجل في الزمن $t = 0$)

مهمّ

انتبه: يجب أن تكون قادرًا على استخدام زر (e^x) في الآلة الحاسبة لحل الأسئلة التي تحتوي على (e).

يمكن كتابة المعادلة بالصيغة العامة كالآتي:

$x = x_0 e^{-\lambda t}$

حيث (x) يمكن أن تمثّل النشاط الإشعاعي (A)، أو عدد الأنوية غير المنحلّة (N)، أو معدل العدّ المسجل (R).

(λ: ثابت الانحلال و x: الكمية المتبقية عند الزمن t)

أمثلة

٧. افترض أننا بدأنا تجربة بـ 1.0×10^{15} نواة غير منحلّة لنظير ما، وثابت الانحلال (λ) لهذا النظير يساوي ($0.02\ s^{-1}$). احسب عدد الأنوية غير المنحلّة بعد (20 s).

الخطوة ١: في هذه الحالة، لدينا:

$N_0 = 1.0 \times 10^{15}$

$\lambda = 0.02\ s^{-1}$

$t = 20\ s$

التعويض في المعادلة يعطي:

$N = 1.0 \times 10^{15}\ e^{-0.02 \times 20}$

الخطوة ٢: استخدم الزر (e^x) على الآلة الحاسبة واحسب (N).

$N = 1.0 \times 10^{15} \times 0.67 = 6.7 \times 10^{14}$ نواة

٨. تحتوي عيّنة في البداية على 1000 نواة غير منحلّة لنظير ما، ثابت انحلاله ($\lambda = 0.10\ min^{-1}$). ارسم تمثيلًا بيانيًا لتبيّن كيف ستنحلّ العيّنة خلال فترة 10 دقائق.

الخطوة ١: لدينا:

$N_0 = 1000$

$\lambda = 0.10\ min^{-1}$

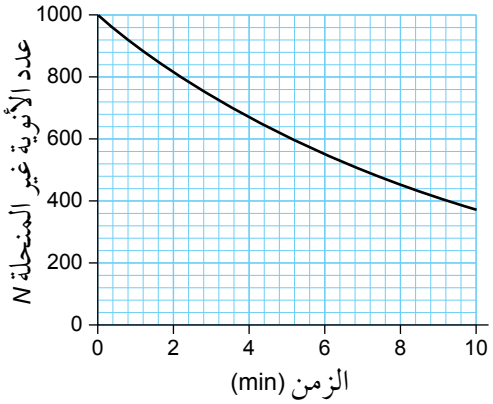
لذلك، يمكننا كتابة معادلة هذا الانحلال كالآتي:

$N = 1000\ e^{-0.10 \times t}$

الخطوة ٢: احسب قيم العدد (N) من الأنوية غير المنحلّة على فترات زمنية مقدارها دقيقة واحدة؛ وهذا معطى في الجدول ٩–٤، ثم استخدم البيانات من الجدول لرسم التمثيل البياني كما هو مبيّن في الشكل ٩–١٠.

الزمن (min)	0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
N	1000	905	819	741	670	607	549	497	449	407	368

الجدول ٩–٤



الشكل ٩–١٠ التمثيل البياني للانحلال الإشعاعي.

أسئلة

(١٦) تحتوي عيّنة لنظير النيتروجين–13 في البداية على 8.0×10^{10} نواة غير منحلّة إذا علمت أن عمر النصف لها (10 min).

أ. اكتب معادلة لتبيّن كيف يعتمد عدد الأنوية غير المنحلّة (N) على الزمن (t).

ب. احسب عدد الأنوية غير المنحلّة التي ستبقى بعد (10 min) وبعد (20 min).

ج. احسب عدد الأنوية التي ستتحلّل في أول (30 min).

(١٧) عيّنة من نظير عنصر ما ثابت انحلاله يساوي ($\lambda = 0.10\ s^{-1}$)، تحتوي على 5.0×10^{9} نواة غير منحلّة في بداية تجربة معيّنة.

احسب:

أ. عدد الأنوية غير المنحلّة بعد (50 s).

ب. النشاط الإشعاعي للنظير بعد (50 s).

(١٨) قيمة ثابت الانحلال (λ) للبروتكتينيوم–234 هي ($9.6 \times 10^{-3}\ s^{-1}$). يبيّن الجدول ٩–٥ عدد الأنوية غير المنحلّة (N) في العيّنة. انسخ الجدول ٩–٥ وأكمله، ثم ارسم تمثيلًا بيانيًا لعدد الأنوية مقابل الزمن (N-t)، واستخدمه لإيجاد عمر النصف ($t_{\frac{1}{2}}$) للبروتكتينيوم–234.

الزمن (s)	0	20	40	60	80	100	120	140
N	400	330						

الجدول ٩–٥

٩-٨ ثابت الانحلال λ وعمر النصف $t_{\frac{1}{2}}$

للنظير الذي ينحلّ بسرعة عمر نصف ($t_{\frac{1}{2}}$) قصير، لذلك يجب أن يكون ثابت انحلاله كبيرًا، ونظرًا إلى أن احتمال انحلال النواة الفردية لكل وحدة زمنية يجب أن يكون مرتفعًا، فما العلاقة التي تربط بين ثابت الانحلال وعمر النصف؟

ففي زمن يساوي عمر نصف واحد ($t_{\frac{1}{2}}$)، يكون عدد الأنوية غير المنحلّة نصف العدد الابتدائي للأنوية، ولذلك فإن المعادلة:

$$N = N_0\, e^{-\lambda t}$$

تصبح:

$$\frac{N}{N_0} = e^{(-\lambda t_{\frac{1}{2}})} = \frac{1}{2}$$

ولذلك،

$$e^{\lambda t_{\frac{1}{2}}} = 2$$

إذا كان $e^x = y$، فإن $x = \ln y$ ولذلك تكون:

$$\lambda t_{\frac{1}{2}} = \ln 2$$

$$\approx 0.693$$

يتناسب عمر النصف للنظير عكسيًا مع ثابت الانحلال له، وبالتالي فإن:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}}$$

$$= \frac{0.693}{t_{\frac{1}{2}}}$$

وعليه إذا عرفنا ($t_{\frac{1}{2}}$) أو (λ)، فإنه يمكننا حساب الكمية الأخرى، وبالنسبة إلى الأنوية ذات عمر النصف الطويل جدًا، فإننا لا نحتاج للانتظار طويلًا لقياس عمر النصف لها، إذ من الأسهل تحديد (λ) لها بواسطة قياس نشاطها (باستخدام $A = \lambda N$) واستخدام ذلك لتحديد ($t_{\frac{1}{2}}$).

لاحظ أن وحدة كل من (λ) و ($t_{\frac{1}{2}}$) يجب أن تكونا متوافقتَين؛ على سبيل المثال (λ) بوحدة s^{-1} و ($t_{\frac{1}{2}}$) بوحدة s.

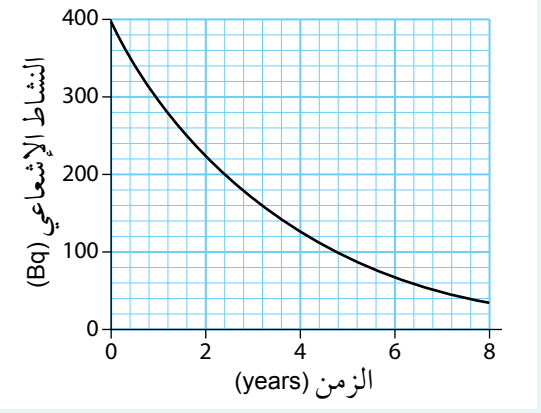
يرتبط عمر النصف وثابت الانحلال على النحو الآتي:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}}$$

$$= \frac{0.693}{t_{\frac{1}{2}}}$$

أسئلة

(١٩) يبيّن الشكل ٩–١١ تمثيلًا بيانيًا لانحلال نظير السيزيوم $^{134}_{55}Cs$؛ استخدم التمثيل البياني لتحديد عمر النصف لهذه الأنوية بالسنوات، وبعد ذلك جِد ثابت الانحلال بوحدة $year^{-1}$.



الشكل ٩–١١ التمثيل البياني لانحلال نظير السيزيوم.

(٢٠) ثابت الانحلال لنظير معيّن يساوي ($3.0 \times 10^{-4}\ s^{-1}$). احسب المدة التي سيستغرقها نشاط عيّنة من هذه المادة لينخفض إلى ثُمن قيمته الابتدائية.

(٢١) عمر النصف للنظير $^{16}_{7}N$ يساوي (7.4 s).

أ. احسب ثابت الانحلال لهذه الأنوية.

ب. تحتوي عيّنة من النيتروجين (N) بداية على 5000 نواة. احسب كم سيبقى من الأنوية بعد زمن:

١. 14.8 s

٢. 20.0 s

(٢٢) تحتوي عيّنة على نظير عمر النصف له ($t_{\frac{1}{2}}$).

أ. أثبت أن نسبة الأنوية المتبقية (غير المنحلة) من العيّنة إلى عدد الأنوية الابتدائية $\left(\frac{N}{N_0}\right)$ بعد زمن (t) تُعطى بالمعادلة:

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n \text{ حيث } n = \frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}$$

ب. احسب النسبة $\frac{N}{N_0}$ بعد كل من الأزمنة الآتية:

١. $t_{\frac{1}{2}}$

٢. $2\,t_{\frac{1}{2}}$

٣. $2.5\,t_{\frac{1}{2}}$

٤. $8.3\,t_{\frac{1}{2}}$

ملخّص

يمكن التعبير عن التفاعلات النووية بمعادلات نووية موزونة على سبيل المثال:

$$^{14}_{6}C \longrightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$$

معادلة (الكتلة –الطاقة) لأينشتاين $\Delta E = \Delta mc^2$، تربط التغير في الكتلة بتغير الطاقة.

النقص في الكتلة يساوي الفرق بين كتلة النيوكليونات المفككة (المنفصلة) وكتلة النواة.

يمكن قياس كتلة الجسيمات النووية بوحدة الكتلة الذرية (u)، حيث:

$$1\ u \approx 1.660 \times 10^{-27}\ kg$$

طاقة الربط النووي هي أدنى طاقة مطلوبة لتفكيك نواة ما إلى نيوكليونات منفصلة.

تدل طاقة الربط لكل نيوكليون على الاستقرار النسبي للأنوية المختلفة.

يبيّن تغير طاقة الربط لكل نيوكليون أن الطاقة تتحرّر عندما تخضع الأنوية الخفيفة للاندماج وعندما تخضع الأنوية الأثقل للانشطار؛ لأن هذه العمليات تزيد من طاقة الربط لكل نيوكليون، وبالتالي تنتج أنوية أكثر استقرارًا.

الانحلال النووي عملية تلقائية وعشوائية، وعدم القدرة على التنبؤ يعني أن معدلات العدّ تميل إلى التذبذب، لذا يجب علينا قياس متوسط الكميات.

عمر النصف ($t_{\frac{1}{2}}$) لنظير ما هو متوسط الزمن الذي يستغرقه نصف الأنوية النشطة في العيّنة حتى تتحلّ.

ثابت الانحلال (λ) هو احتمال أن نواة فردية ستنحل لكل وحدة فترة زمنية.

يرتبط النشاط الإشعاعي (A) لعيّنة ما بعدد الأنوية غير المنحلّة في العيّنة (N) بواسطة المعادلة: $A = \lambda N$.

يرتبط ثابت الانحلال وعمر النصف بالمعادلة:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} = \frac{0.693}{t_{\frac{1}{2}}}$$

يمكننا تمثيل التناقص الأُسّي لكمية ما مع الزمن (t) بمعادلة صيغتها:

$$x = x_0\, e^{-\lambda t}$$

حيث (x) يمكن أن تكون النشاط الإشعاعي (A)، أو معدّل العدّ (R) أو عدد الأنوية غير المنحلّة (N).

أسئلة نهاية الوحدة

١ ما التعبير الصحيح لتحديد الطاقة (بوحدة الإلكترون فولت eV) الناتجة عن تغيّر الكتلة بمقدار (1.0 u)؟

أ. $1.0 \times (3.00 \times 10^{8})^{2}$

ب. $1.66 \times 10^{-27} \times (3.00 \times 10^{8})^{2}$

ج. $1.66 \times 10^{-27} \times (3.00 \times 10^{8})^{2} \times 1.60 \times 10^{-19}$

د. $1.66 \times 10^{-27} \times \frac{(3.00 \times 10^{8})^{2}}{1.60 \times 10^{-19}}$

٢ يحدّد محمود عمر النصف لنظير معيّن فيجده (66 ± 5) s. ما قيمة عدم اليقين المطلق في ثابت الانحلال؟

أ. $8.0 \times 10^{-4}\ s^{-1}$

ب. $1.1 \times 10^{-3}\ s^{-1}$

ج. $5.3 \times 10^{-2}\ s^{-1}$

د. $7.6 \times 10^{-2}\ s^{-1}$

٣ مضاد البروتون ($\bar{p}$) يماثل البروتون (p) ما عدا أن له شحنة سالبة. عندما يتصادم البروتون ومضاد البروتون فإنهما يتلاشيان ويتكوّن فوتونين، وتتحوّل كتلتا الجُسيمَين إلى طاقة.

أ. احسب الطاقة المنبعثة في التفاعل.

ب. احسب الطاقة المنبعثة إذا تلاشى (1 mole) من البروتونات و (1 mole) من مضاد البروتونات بهذه العملية.

(كتلة البروتون = كتلة مضاد البروتون = 1.67×10^{-27} kg).

٤ احسب الكتلة التي ستتلاشى لتحرير (1.0 J) من الطاقة.

٥ تتحوّل الكتلة إلى طاقة في مفاعل نووي بمعدل ($70\ \mu g\ s^{-1}$). احسب أقصى قدرة تنتج من المفاعل، بافتراض أن كفاءته (100%).

٦ تبيّن المعادلة الآتية الانحلال الإشعاعي للرادون–222.

$$^{222}_{86}Rn \longrightarrow {}^{218}_{84}Po + {}^{4}_{2}\alpha + \gamma$$

احسب الطاقة الكلية الناتجة من هذا الانحلال وحدّد أشكالها.

(كتلة $^{222}_{86}Rn$ = 221.970 u ، كتلة $^{218}_{84}Po$ = 217.963 u ، كتلة ${}^{4}_{2}\alpha$ = 4.002 u ،
1 u هي وحدة الكتلة الذرية = 1.660×10^{-27} kg).

(**تلميح:** جِد النقص في الكتلة بوحدة u، ثم حوّلها إلى kg).

تابع

٧ تتكوّن ذرة الكربون–12 من ستة بروتونات وستة نيوترونات وستة إلكترونات. تُعرّف وحدة الكتلة الذرية (u) بأنها $\frac{1}{12}$ من كتلة ذرة الكربون–12. احسب:

أ. النقص في الكتلة بالكيلوغرام.

ب. طاقة الربط النووي.

ج. طاقة الربط لكل نيوكليون.

(كتلة البروتون = 1.007276 u ، كتلة النيوترون = 1.008665 u ، كتلة الإلكترون = 0.000548 u)

٨ تفاعل الاندماج النووي الذي إن تحقق فسوف يؤدي إلى الحصول على تفاعل اندماج نووي آمن، الأمر الذي يفتح الباب لإمكانات واعدة في إنتاج الطاقة الكهربائية، هو اندماج التريتيوم $^{3}_{1}H$ والديوتيريوم $^{2}_{1}H$. والمعادلة الآتية تبيّن هذا التفاعل:

$$^{3}_{1}H + ^{2}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{1}H$$

احسب:

أ. التغيّر في الكتلة خلال التفاعل.

ب. الطاقة المنبعثة خلال التفاعل.

ج. الطاقة المنبعثة في حالة تفاعل مول واحد من الديوتيريوم مع مول واحد من التريتيوم.

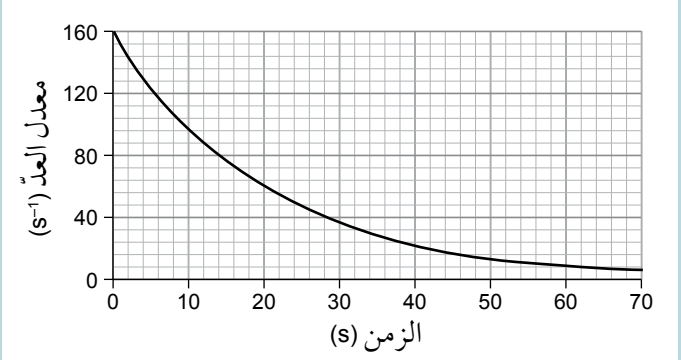
(كتلة $^{3}_{1}H$ = 3.015500 u ، كتلة $^{2}_{1}H$ = 2.013553 u ، كتلة $^{4}_{2}He$ = 4.001506 u ، كتلة $^{1}_{1}H$ = 1.007276 u)

٩ النشاط الإشعاعي الابتدائي لعيّنة مكوّنة من (1 mole) من غاز الرادون–220 (^{220}Rn) تساوي ($8.02 \times 10^{21}\ s^{-1}$). احسب:

أ. ثابت الانحلال لهذا النظير.

ب. عمر النصف للنظير.

١٠ يبيّن التمثيل البياني (معدل العدّ–الزمن) في الشكل ٩–١٢ لعيّنة تحتوي على الإنديوم–116 (^{116}In).



الشكل ٩–١٢

أ. استخدم التمثيل البياني لتحديد عمر النصف للنظير.

ب. احسب ثابت الانحلال.

تابع

١١ يمكن استخدام نسب النظائر المختلفة في الصخور لتأريخ عمر هذه الصخور. يبلغ عمر النصف لليورانيوم–238 (4.9×10^9 years). نسبة هذا النظير في عيّنة من الصخر هي 99.2% مقارنة بالنظائر المتكوّنة حديثًا.

أ. احسب ثابت الانحلال بوحدة y^{-1} لنظير اليورانيوم هذا.

ب. احسب عمر الصخر بالسنوات.

١٢ يبيّن الجدول ٩–٦ معدل العدّ المسجل عندما تتحلّ عيّنة من نظير الڤاناديوم–52 ($^{52}_{23}V$).

الزمن (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
معدل العدّ (s^{-1})	187	159	134	110	85	70	60	56	40

الجدول ٩–٦

أ. ١. ارسم تمثيلًا بيانيًا لـ (معدل العدّ–الزمن).

٢. صِف انتشار النقاط.

ب. حدّد عمر النصف من التمثيل البياني للنظير.

ج. صِف التغييرات على التمثيل البياني الذي تتوقعه لو كنت أعطيت عيّنة أكبر من النظير.

١٣ نواة اليورانيوم–235 ($^{235}_{92}U$) تبلغ كتلتها (3.89×10^{-25} kg).

أ. ما عدد البروتونات والنيوترونات في هذه النواة؟

ب. اشرح سبب اختلاف الكتلة الكلية للنيوكليونات عن كتلة نواة اليورانيوم.

ج. اشرح بدون إجراء حسابات، كيف يمكنك تحديد طاقة الربط لكل نيوكليون لنواة اليورانيوم–235 من كتلتها وكتلتَي البروتون والنيوترون.

١٤ **أ.** اشرح المقصود بالاندماج النووي، واشرح سبب حدوثه عند درجات حرارة عالية جدًا فقط.

ب. التفاعلات الرئيسية التي تزوّد الشمس بالطاقة هي اندماج أنوية هيدروجين لتشكيل أنوية هيليوم، ومع ذلك تحدث تفاعلات أخرى، وإحدى هذه التفاعلات المعروف باسم عملية ألفا الثلاثية وهو تصادم ثلاث أنوية هيليوم واندماجها لتشكّل نواة كربون–12.

١. اشرح سبب الحاجة إلى درجات حرارة أعلى لإتمام عملية ألفا الثلاثية من تلك المطلوبة لاندماج الهيدروجين.

٢. احسب الطاقة المنبعثة في عملية ألفا الثلاثية.

(كتلة نواة الهيليوم (^4_2He) = 4.001506 u، وكتلة الكربون ($^{12}_6C$) = 12.000000 u، و $1\ u = 1.660 \times 10^{-27}$ kg)

١٥ ينحلّ نظير البولونيوم ($^{218}_{81}Po$) بواسطة انبعاث جسيم ألفا، بعمر نصف يبلغ (183 s).

أ. في حادث وقع في مختبر مصنع لإعادة المعالجة النووية (تقنية لفصل البلوتونيوم واستعادته كيميائيًا من الوقود النووي المستهلك)، تحرّر جزء من هذا النظير على شكل غبار في الغلاف الجوي. اشرح سبب اعتبار انتشاره على شكل غبار أكثر خطورة على الصحة من انسكابه على شكل سائل.

ب. وُجِد أنه تحرّر (2.4 g) من هذا النظير في الجو، فإذا علمت أن الكتلة المولية لنظير البولونيوم (Po) هي ($218\ g\ mol^{-1}$) فاحسب النشاط الإشعاعي الابتدائي للبولونيوم المتحرّر.

تابع

ج- سيكون من الآمن الدخول إلى المختبر مرة أخرى عندما تعود خلفية النشاط الإشعاعي إلى (10 Bq) تقريبًا. احسب عدد الساعات التي يجب أن تمضي قبل أن يصبح الدخول مرة أخرى إلى المختبر آمنًا.

١٦ يتزود مفاعل نووي بالطاقة من خلال انشطار اليورانيوم. القدرة الناتجة من المفاعل (200 MW). توضّح المعادلة الآتية تفاعل انشطاري نموذجي:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{236}_{92}U \longrightarrow ^{87}_{35}Br + ^{146}_{57}La + 3^{1}_{0}n$$

أ- ما شكل الطاقة الذي تتحوّل إليه غالبية الطاقة المتحررة من التفاعل؟

ب- ١. احسب الطاقة المنبعثة في التفاعل، مُهملًا طاقة الحركة للنيوترون الممتص (الداخل في نواة اليورانيوم).

٢. افترض أن الطاقة المنبعثة في هذا الانشطار نموذجية لجميع انشطارات اليورانيوم-236. احسب عدد الانشطارات التي تحدث في كل ثانية.

٣. احسب كتلة اليورانيوم-235 المطلوبة لتشغيل المفاعل لمدة سنة واحدة.

(كتلة $^{235}_{92}U$ = 3.90×10^{-25} kg ، كتلة $^{87}_{35}Br$ = 1.44×10^{-25} kg ، كتلة $^{146}_{57}La$ = 2.42×10^{-25} kg ،
كتلة النيوترون = 1.67×10^{-27} kg، 1 year = 3.15×10^{7} s، الكتلة المولية لليورانيوم-235 = 235 g mol^{-1})

قائمة تقييم ذاتي

بعد دراسة الوحدة، أكمل الجدول الآتي:

أستطيع أن	أراجع الموضوع	أحتاج إلى بذل المزيد من الجهد	متمكّن إلى حدٍّ ما	مستعدّ للمضي قدمًا
أفهم معادلة الكتلة-الطاقة لأينشتاين: $E = mc^2$	٢-٩			
احسب الطاقة المنبعثة في التفاعلات النووية باستخدام المعادلة: $\Delta E = \Delta mc^2$	٣-٩			
أفهم مصطلحَي: النقص في الكتلة وطاقة الربط النووي.	٢-٩، ٤-٩			
أفهم أهمية التمثيل البياني لطاقة الربط لكل نيوكليون مقابل عدد النيوكليونات.	٤-٩			
أفهم الانشطار النووي والاندماج النووي.	٤-٩			
أفهم أن الانحلال الإشعاعي تلقائي وعشوائي.	٥-٩			
أفهم مصطلحات: النشاط الإشعاعي، ثابت الانحلال وعمر النصف.	٦-٩، ٧-٩			
استخدم المعادلات: $A = \lambda N$ و $\lambda = \frac{0.693}{t_{\frac{1}{2}}}$ و $x = x_0 e^{-\lambda t}$	٦-٩، ٧-٩، ٨-٩			
أفهم الانحلال الأُسي للنشاط الإشعاعي، والأنوية غير المنحلّة ومعدل العدّ.	٦-٩، ٧-٩			

قائمة المصطلحات

الأفعال الإجرائية

في ما يأتي تعريفات للأفعال الإجرائية المعتمدة في المنهج.

توقّع/تنبّأ Predict: اقترح ما قد يحدث بناءً على المعلومات المتاحة.

قارن Compare: حدّد أوجه التشابه و/أو الاختلاف معلّقًا عليها.

المصطلحات العلمية

الإزاحة Displacement: المسافة التي تبعدها نقطة ما في موجة من موضع الاتزان. (ص ٢٢)

الإلكترون فولت Electronvolt (eV): الطاقة التي يكتسبها إلكترون عندما ينتقل بواسطة فرق جهد مقداره (1 V). (ص ٨٢)

الانتقال Transition: هو قفزة الإلكترون بين مستويَين من الطاقة. (ص ٩٥)

الانحلال الأُسّي Exponential decay: التناقص في كمية ما بحيث يكون معدّل التناقص متناسبًا مع مقدار الكمية. (ص ١٢٧)

الاندماج النووي Nuclear fusion: العملية التي ترتبط من خلالها نواتان خفيفتان جدًا لتشكّلا معًا نواة أثقل. (ص ١٢٢)

الانشطار النووي Nuclear fission: العملية التي تتجزأ فيها نواة ثقيلة إلى نواتَين أصغر. (ص ١٢١)

البطن Antinode: نقطة على الموجة المستقرة ذات سعة قصوى. (ص ٥٩)

تأثير دوبلر Doppler effect: التغيّر في التردد أو طول الموجة الملاحظ لموجة عندما يتحرك مصدر الموجة باتجاه المراقب أو بعيدًا عنه (أو يتحرك المراقب بالنسبة إلى المصدر). (ص ٣٠)

التأثير الكهروضوئي Photoelectric effect: تفاعل بين فوتون وإلكترون في فلز ما، حيث يتحرّر الإلكترون من سطح هذا الفلز. (ص ٨٠)

التداخل Interference: تراكب موجتَين أو أكثر من مصادر مترابطة. (ص ٤٥)

التداخل البنّاء Constructive interference: عندما تتعزّز موجتان لإعطاء سعة أكبر عند نقطة ما في حيّز. (ص ٤٥)

التداخلات القصوى Interference maxima: المناطق التي تصل إليها موجات الضوء من شقَّين في الطور نفسه، بعبارة أخرى هي مناطق التداخل البنّاء. (ص ٤٧)

التداخل الهدّام Destructive interference: عندما تلغي موجتان إحداهما الأخرى لإعطاء سعة منخفضة (أو صفرية) عند نقطة ما في حيّز. (ص ٤٥)

التردد **Frequency**: عدد الاهتزازات لنقطة ما في موجة لكل ثانية. (ص ٢٢)

تردد العتبة **Threshold frequency**: أدنى تردد للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط الذي يحرّر إلكترونات من سطح فلز ما. (ص ٨٦)

التشتت **Dispersion**: تجزّؤ الضوء إلى الأطوال الموجية المكوّنة له. (ص ٥٧)

ثابت الانحلال **Decay constant**: احتمال انحلال نواة ما خلال فترة زمنية. (ص ١٢٥)

جهد العتبة **Threshold voltage**: الحد الأدنى لفرق الجهد عبر الوصلة الثنائية الضوئية (LED) عندما تبدأ بالتوصيل وبعث الضوء. (ص ٨٤)

الحالة الأرضية **Ground state**: أدنى حالة (مستوى) طاقة يمكن أن يشغلها إلكترون في ذرّة. (ص ٩٦)

الحيود **Diffraction**: انحناء الموجة عندما تمر عبر فجوة ما أو تتجاوز حافة وانتشارها. (ص ٤٠)

الرنين **Resonance**: الرنين هو تطابق تردد مصدر مهتز مع التردد الطبيعي لاهتزاز جسم ما، الأمر الذي يؤدي إلى اهتزاز ذلك الجسم بسعة أكبر. (ص ٦٣)

الزمن الدوري **Period**: الزمن المستغرق لنقطة ما في موجة لإكمال اهتزازة كاملة. (ص ٢٢)

السعة **Amplitude**: أقصى إزاحة للموجة من موضع الاتزان. (ص ٢٢)

الشدة **Intensity**: معدل الطاقة (القدرة) المنقولة عبر وحدة المساحة العمودية على اتجاه انتشار الموجة. (ص ٢٧)

(طاقة) دالة الشغل **Work function (energy)**: أدنى طاقة يحتاج إليها إلكترون للتحرر من سطح فلز ما. دالة الشغل (وكذلك تردد العتبة وطول موجة العتبة) هي خاصية للفلز. (ص ٨٦)

طاقة الربط النووي **Nuclear binding energy**: أدنى طاقة خارجية مطلوبة لفصل جميع نيوترونات وبروتونات نواة ما تمامًا إلى ما لا نهاية. (ص ١١٩)

طول الموجة **Wavelength**: المسافة بين نقطتَين متجاورتَين في موجة مهتزة لكل منهما الإزاحة والاتجاه نفسهما (الطور نفسه). (ص ٢٢)

طول موجة دي بروي **De Broglie wavelength**: طول الموجة المصاحب لجسيم متحرك، يعطى بالمعادلة: $\lambda = \frac{h}{p}$. (ص ٩٨)

طول موجة العتبة **Threshold wavelength**: أقصى طول موجة للإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط الذي يحرّر إلكترونات من سطح فلز ما. (ص ٨٦)

طيف الامتصاص الخطي **Absorption line spectrum**: طيف به خطوط سوداء متوازية ذات أطوال موجية محددة تُرى على خلفية طيف مستمر. (ص ٩٣)

الطيف المستمر **Continuous spectrum**: طيف انبعاث يتكوّن من سلسلة متصلة من الأطوال الموجية. (ص ٩٢)

طيف الانبعاث الخطي **Emission line spectrum**: طيف بخطوط ملونة ساطعة متوازية ذات أطوال موجية محددة. (ص ٩٣)

العقدة **Node**: نقطة على الموجة المستقرة ذات سعة صفرية. (ص ٥٩)

عمر النصف **Half-life**: عمر النصف ($t_{\frac{1}{2}}$) لنظير ما هو متوسط الزمن الذي يستغرقه نصف الأنوية النشطة في العيّنة حتى تتحلّ. (ص ١٢٧)

فرق الطور **Phase difference**: قياس لمقدار التأخر أو التقدم بين جسيمين في موجة ما، ويقاس بالدرجات أو الراديان. (ص ٢٥)

فرق المسار **Path difference**: المسافة الإضافية التي تقطعها إحدى الموجتَين مقارنة بالموجة الأخرى، وغالبًا ما يُعطى فرق المسار بدلالة طول الموجة λ للموجات. (ص ٤٦)

الفوتون Photon: كمة من الطاقة الكهرومغناطيسية. (ص ٨٠)

الكمة Quantum: كمية محددة من شيء ما (الطاقة في هذه الحالة) موجودة بشكل منفصل. (ص ٨٠)

مبدأ تراكب الموجات Principle of superposition: عندما تلتقي موجتان أو أكثر عند نقطة ما، فإن الإزاحة المحصّلة هي المجموع الجبري لإزاحات الموجات الفردية. (ص ٤٠)

المترابط Coherent: مصطلح يستخدم لوصف موجتَين صادرتَين من مصدرَين لهما فرق طور ثابت. يشار إلى المصادر التي تصدر مثل هذه الموجات على أنها مصادر مترابطة. (ص ٤٩)

مستويات الطاقة (حالات الطاقة) Energy levels (Energy states): حالات طاقة مكمّمة للإلكترون في الذرة. (ص ٩٤)

المصدران المترابطان Coherent sources: المصدران اللذان لهما التردد نفسه تمامًا، ولهما فرق طور صفري أو ثابت. (ص ٤٦)

معدل العدّ Count rate: عدد جسيمات (بيتا أو ألفا) أو فوتونات أشعة جاما التي تُكشف لكل وحدة زمنية بواسطة أنبوب جايجر–مولر، ودائمًا ما يكون معدل العدّ جزءًا صغيرًا من النشاط الإشعاعي للعيّنة. (ص ١٢٦)

مكمّمة Quantised: كمية مكمّمة تعني كمية يمكن ملاحظتها بقيم منفصلة (محددة). (ص ٩٤)

الموجة الطولية Longitudinal wave: الموجة التي تهتز فيها جسيمات الوسط باتجاه موازٍ للاتجاه الذي تنتقل فيه الموجة. (ص ٢٤)

الموجة المسافرة Progressive wave: موجة تحمل طاقة من مكان إلى آخر. (ص ٢١)

الموجة المستعرضة Transverse wave: الموجة التي تهتز فيها جسيمات الوسط عموديًا على الاتجاه الذي تنتقل فيه الموجة. (ص ٢٤)

الموجة المستقرة (الموجة الواقفة) Stationary wave (standing wave): نمط اهتزازي مستقر ناتج عن تراكب موجتَين مسافرتَين لهما التردد نفسه وتنتقلان باتجاهَين متعاكسَين، وللموجة المستقرة عقد وبطون. (ص ٥٨)

النشاط الإشعاعي Activity: معدل انحلال أنوية مصدر مشع. وحدة النشاط هي بيكريل Bq. (ص ١٢٥)

النقص في الكتلة Mass defect: الفرق بين مجموع كتل النيوكليونات منفردةً وكتلة النواة. (ص ١١٦)

وحدة الكتلة الذرية Atomic mass unit: $\frac{1}{12}$ من كتلة ذرّة كربون–12. (ص ١١٧)

ملحق: الجدول الدوري للعناصر

				المجموعة III	المجموعة IV	المجموعة V	المجموعة VI	المجموعة VII	المجموعة VIII
									2 He Helium هيليوم 4
				5 B Boron بورون 11	6 C Carbon كربون 12	7 N Nitrogen نيتروجين 14	8 O Oxygen أكسجين 16	9 F Fluorine فلور 19	10 Ne Neon نيون 20
				13 Al Aluminium ألومنيوم 27	14 Si Silicon سيليكون 28	15 P Phosphorus فوسفور 31	16 S Sulfur كبريت 32	17 Cl Chlorine كلور 35.5	18 Ar Argon أرغون 40
27 Co Cobalt كوبالت 59	28 Ni Nickel نيكل 59	29 Cu Copper نحاس 64	30 Zn Zinc خارصين 65	31 Ga Gallium غاليوم 70	32 Ge Germanium جيرمانيوم 73	33 As Arsenic زرنيخ 75	34 Se Selenium سيلينيوم 79	35 Br Bromine بروم 80	36 Kr Krypton كريبتون 84
45 Rh Rhodium روديوم 103	46 Pd Palladium بالاديوم 106	47 Ag Silver فضة 108	48 Cd Cadmium كادميوم 112	49 In Indium إنديوم 115	50 Sn Tin قصدير 119	51 Sb Antimony أنتيمون 122	52 Te Tellurium تيلوريوم 128	53 I Iodine يود 127	54 Xe Xenon زينون 131
77 Ir Iridium إريديوم 192	78 Pt Platinum بلاتين 195	79 Au Gold ذهب 197	80 Hg Mercury زئبق 201	81 Tl Thallium ثاليوم 204	82 Pb Lead رصاص 207	83 Bi Bismuth بيزموث 209	84 Po Polonium بولونيوم –	85 At Astatine أستاتين –	86 Rn Radon رادون –

63 Eu Europium أوروبيوم 152	64 Gd Gadolinium غادولينيوم 157	65 Tb Terbium تيربيوم 159	66 Dy Dysprosium ديسبروسيوم 163	67 Ho Holmium هولميوم 165	68 Er Erbium إيربيوم 167	69 Tm Thulium ثوليوم 169	70 Yb Ytterbium إيتربيوم 173	71 Lu Lutetium لوتيشيوم 175
95 Am Americium أميرسيوم –	96 Cm Curium كوريوم –	97 Bk Berkelium بيركيليوم –	98 Cf Californium كاليفورنيوم –	99 Es Einsteinium إينشتاينيوم –	100 Fm Fermium فيرميوم –	101 Md Mendelevium مانديليفيوم –	102 No Nobelium نوبيليوم –	103 Lr Lawrencium لاورنسيوم –

المفتاح

a
X
الاسم
b

a = العدد الذري

X = الرمز

b = الكتلة الذريّة النسبية

	المجموعة I	المجموعة II						
الدورة 1								1 H Hydrogen هيدروجين 1
الدورة 2	3 Li Lithium ليثيوم 7	4 Be Beryllium بريليوم 9						
الدورة 3	11 Na Sodium صوديوم 23	12 Mg Magnesium ماغنيسيوم 24						
الدورة 4	19 K Potassium بوتاسيوم 39	20 Ca Calcium كالسيوم 40	21 Sc Scandium سكانديوم 45	22 Ti Titanium تيتانيوم 48	23 V Vanadium فناديوم 51	24 Cr Chromium كروم 52	25 Mn Manganese منغنيز 55	26 Fe Iron حديد 56
الدورة 5	37 Rb Rubidium روبيديوم 86	38 Sr Strontium سترونشيوم 88	39 Y Yttrium إيتريوم 89	40 Zr Zirconium زيركونيوم 91	41 Nb Niobium نيوبيوم 93	42 Mo Molybdenum موليبدنوم 96	43 Tc Technetium تكنيشيوم –	44 Ru Ruthenium روثينيوم 101
الدورة 6	55 Cs Caesium سيزيوم 133	56 Ba Barium باريوم 137	La to Lu	72 Hf Hafnium هافنيوم 178	73 Ta Tantalum تانتالوم 181	74 W Tungsten تنغستن 184	75 Re Rhenium رينيوم 186	76 Os Osmium أوزميوم 190
الدورة 7	87 Fr Francium فرانسيوم –	88 Ra Radium راديوم –	Ac to Lr					

57 La Lanthanum لانثانوم 139	58 Ce Cerium سيريوم 140	59 Pr Praseodymium برازيوديميوم 141	60 Nd Neodymium نيوديميوم 144	61 Pm Promethium بروميثيوم –	62 Sm Samarium ساماريوم 150
89 Ac Actinium أكتينيوم –	90 Th Thorium ثوريوم –	91 Pa Protactinium بروتاكتينيوم –	92 U Uranium يورانيوم –	93 Np Neptunium نبتونيوم –	94 Pu Plutonium بلوتونيوم –

شكر وتقدير

يتوجه المؤلفون والناشرون بالشكر الجزيل إلى جميع من منحهم حقوق استخدام مصادرهم أو مراجعهم. وبالرغم من رغبتهم فى الإعراب عن تقديرهم لكل جهد تم بذله، وذكر كل مصدر تم استخدامه لإنجاز هذا العمل، إلا أنه يستحيل ذكرها وحصرها جميعًا. وفي حال إغفالهم لأي مصدر أو مرجع فإنه يسرهم ذكره في النسخ القادمة من هذا الكتاب.

EpicStockMedia/Getty Images; hamdanalderey/Shutterstock; DOUG JOHNSON / SCIENCE PHOTO LIBRARY; Filmfoto/Getty Images; Ministry of Education, Oman; DedMityay/Shutterstock; Fouad A. Saad/Shutterstock; Klaus Vedfelt/Getty Images; Phil Ashley/Getty Images; sciencephotos / Alamy Stock Photo; turk_stock_photographer/ Getty Images; Avalon/Bruce Coleman Inc / Alamy Stock Photo; GIPHOTOSTOCK / SCIENCE PHOTO LIBRARY; Zocha_K/Getty Images; Tim Ridley/Getty Images; ANDREW LAMBERT PHOTOGRAPHY / SCIENCE PHOTO LIBRARY; Tee_Photolive/ Getty Images; bojanstory/Getty Images; STphotography / Alamy Stock Photo; Paul Broadbent / Alamy Stock Photo; VOLKER STEGER / SCIENCE PHOTO LIBRARY; JOHN THOMAS/SCIENCE PHOTO LIBRARY/GI; Unknown (x4); Science & Society Picture Library/Getty Images; ANDREW LAMBERT PHOTOGRAPHY / SCIENCE PHOTO LIBRARY; Professor Doctor Hannes Lichte; DR DAVID WEXLER, COLOURED BY DR JEREMY BURGESS / SCIENCE PHOTO LIBRARY; DR TIM EVANS / SCIENCE PHOTO LIBRARY; Ktsimage/Getty Images; Natalie Board/EyeEm/Getty Images; ANDREW LAMBERT PHOTOGRAPHY / SCIENCE PHOTO LIBRARY

رقم الإيداع : ٧٢١٨ / ٢٠٢٣م

Printed by: Mazoon Printing, Publishing & Packaging L.L.C - 24815693

الفيزياء – كتاب الطالب

يساعد البحث المكثف على تلبية الاحتياجات الحقيقة للطلبة الذين يدرسون مادة الفيزياء. حيث تضمن الأسئلة الواردة في نهاية كل وحدة الشعور بالثقة أثناء عملية التقييم، وفرصًا أكثر للتفكير، و تساعد قوائم المراجعة الخاصة بالتقييم الذاتي؛ على أن تصبح مسؤولاً عن عملية التعلم.

يؤمّن كتاب الطالب مجموعة من أسئلة الاستقصاء، مثل الأنشطة العملية وأسئلة المناقشة، والتي تساعدك على تطوير مهارات القرن الحادي والعشرين.

- بعض الميزات مثل «قبل أن تبدأ بدراسة الوحدة»، والملخصات، وكيفية التعلم النشط، وبناء المهارات، تمنح فرصًا للتفكير.
- ميزات «العلوم ضمن سياقها»، من تفسير الأفكار ضمن سياق العالم الواقعي، إضافة إلى مناقشة المفاهيم مع الطلبة الآخرين.
- تعمل الأسئلة ذات الجزئيات المتعددة الموجودة في نهاية كل وحدة على التحضير لخوض الامتحانات بثقة.
- تساعد أسئلة الاستقصاء، مثل الأنشطة العملية والعمل ضمن مجموعات، وأسئلة المناقشة، على تطوير مهارات القرن الحادي والعشرين.

يشمل منهج الفيزياء للصف الثاني عشر من هذه السلسلة أيضًا:

- كتاب التجارب العملية والأنشطة
- دليل المعلّم

ISBN 978-99992-56-14-8
9 789999 256148

www.moe.gov.om

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS