المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

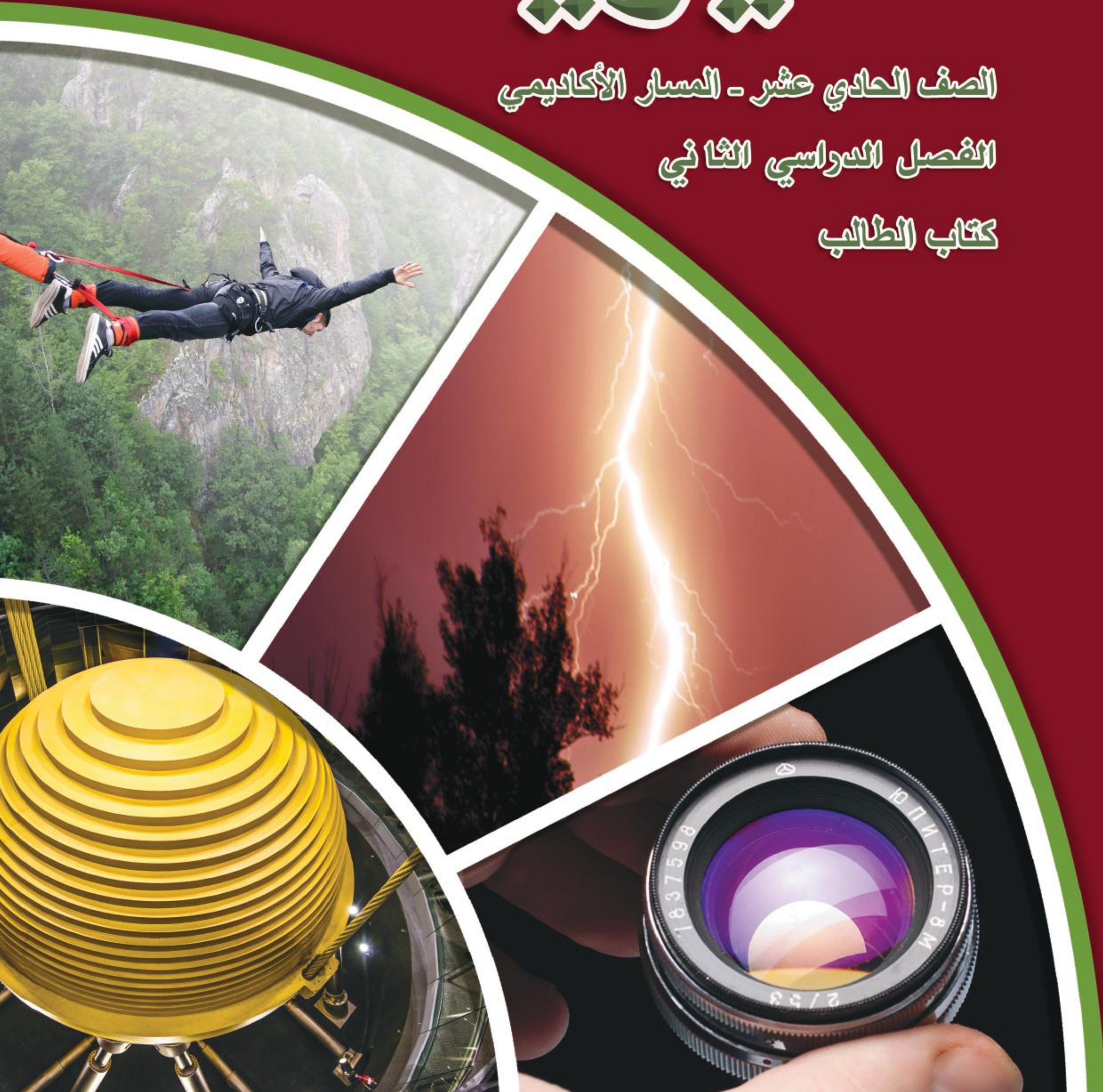
المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center for Curriculum Development

الفيزياء 11

الصف الحادي عشر - المسار الأكاديمي

الفصل الدراسي الثاني

كتاب الطالب



المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center for Curriculum Development

الفيزياء

الصف الحادي عشر - المسار الأكاديمي

الفصل الدراسي الثاني

كتاب الطالب

11

فريق التأليف

د. موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب
خلدون سليمان المصاروه
موسى محمود جرادات
يحيى أحمد طواها

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

يسرُّ المركز الوطني لتطوير المناهج استقبال آرائكم وملحوظاتكم على هذا الكتاب عن طريق العناوين الآتية:

06-5376262 / 237 06-5376266 P.O.Box: 2088 Amman 11941

@nccdjor feedback@nccd.gov.jo www.nccd.gov.jo

قـرّرت وزارة التربيـة والتعليـم تدريـس هـذا الكتـاب في مـدارس المملكـة الأردنية الهاشـمية جميعهـا، بناءً عـلى قرار المجلـس الأعلى للمركـز الوطني لتطوير المناهج في جلسـته رقـم (2024/8)، تاريخ 2024/10/16 م، وقرار مجلس التربيـة والتعليم رقم (2024/172)، تاريـخ 2024/11/17 م، بـدءًا من العام الـدراسي 2024 / 2025 م.

- Prepared Originally in English for the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan
- Translated to Arabic, adapted, customised and published by the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan

ISBN: 978 - 9923 - 41 - 622 - 8

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2024/5/2910)

بيانات الفهرسة الأولية للكتاب:

عنوان الكتاب	الفيزياء، كتاب الطالب: الصف الحادي عشر، الفصل الدراسي الثاني
إعداد / هيئة	الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج
بيانات النشر	عمان: المركز الوطني لتطوير المناهج، 2024
رقم التصنيف	373,19
الواصفات	/ الفيزياء/ / أساليب التدريس/ / المناهج/ / التعليم الثانوي/
الطبعـة	الطبعـة الأولى

يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه، ولا يعبّر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية.

المراجعة والتعديل

ميمي محمد التكروري — موسى محمود جرادات

التحكيم الأكاديمي

د. رامي مصطفى علي

التصميم والإخراج

نايف محمد أمين مراشدة

التحرير اللغوي

محمد صالح شنيور

British Library Cataloguing -in- Publication Data
A catalogue record for this publication is available from the Library.

الطبعة الأولى (التجريبية)

1446 هـ / 2024 م

قائمة المحتويات

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدّمة

انطلاقًا من إيمان المملكة الأردنية الهاشمية الراسخ بأهمية تنمية قدرات الإنسان الأردني، وتسليحه بالعلم والمعرفة؛ سعى المركز الوطني لتطوير المناهج، بالتعاون مع وزارة التربية والتعليم، إلى تحديث المناهج الدراسية وتطويرها؛ لتكون معينًا للطلبة على الارتقاء بمستواهم المعرفي، ومجاراة أقرانهم في الدول المتقدمة.

يُعدّ هذا الكتاب واحدًا من سلسلة كتب المباحث العلمية التي تُعنى بتنمية المفاهيم العلمية، ومهارات التفكير وحلّ المشكلات، ودمج المفاهيم الحياتية والمفاهيم العابرة للمواد الدراسية، والإفادة من الخبرات الوطنية في عمليات الإعداد والتأليف وفق أفضل الطرائق المتّبعة عالميًّا؛ لضمان انسجامها مع القيم الوطنية الراسخة، وتلبيتها لحاجات أبنائنا الطلبة والمعلّمين والمعلّمات.

وقد روعِيَ في تأليفه تقديم المعلومة العلمية الدقيقة وفق منهجية تقوم على السلاسة في العرض، والوضوح في التعبير، إضافة إلى الربط بين الموضوعات المطروحة في المراحل الدراسية السابقة واللاحقة، واعتماد منهجية التدرّج في عرض موضوعات المادة، واستهلال وحداتها بأسئلة تُظهِر علاقة علم الفيزياء بالظواهر من حولنا؛ ما يُحفّز الطالب على الإفادة ممّا يتعلّمه في غرفة الصف في تفسير مشاهدات يومية وظواهر طبيعية قد تحدث أمامه، أو يشاهدها في التلفاز، أو يسمع عنها. وقد تضمّنت كل وحدة نشاطًا إثرائيًّا يعتمد منحى STEAM في التعليم الذي يُستعمل لدمج العلوم والتكنولوجيا والهندسة والفن والعلوم الإنسانية والرياضيات في أنشطة الكتاب المتنوّعة، وفي قضايا البحث.

ويتألّف الفصل الدراسي الثاني من الكتاب من وحدتين دراسيتين، هما: الكهرباء السكونية، الحركة التذبذبية والحركة الموجية. وقد أُلحق به كتاب للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على التجارب والأنشطة جميعها الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعد الطلبة على تنفيذها بسهولة، بإشراف المعلّم/ المعلّمة، ومشاركة زملائهم/ زميلاتهن فيها، بما في ذلك رصد القراءات، وتحليلها، ثم مناقشتها، وصولًا إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سليمة. ويتضمّن أيضًا أسئلة تفكير؛ بهدف تعزيز فهم الطلبة لموضوعات المادة، وتنمية التفكير الناقد لديهم.

ونحن إذ نُقدّم هذه الطبعة من الكتاب، فإنّا نأمل أن يُسهم في تحقيق الأهداف والغايات النهائية المنشودة لبناء شخصية الطالب/ الطالبة، وتنمية اتجاهات حُبّ التعلّم ومهارات التعلّم المستمرّ، إضافة إلى تحسين الكتاب بإضافة الجديد إلى محتواه، وإثراء أنشطته المتنوّعة، والأخذ بملاحظات المعلِّمين والمعلِّمات.

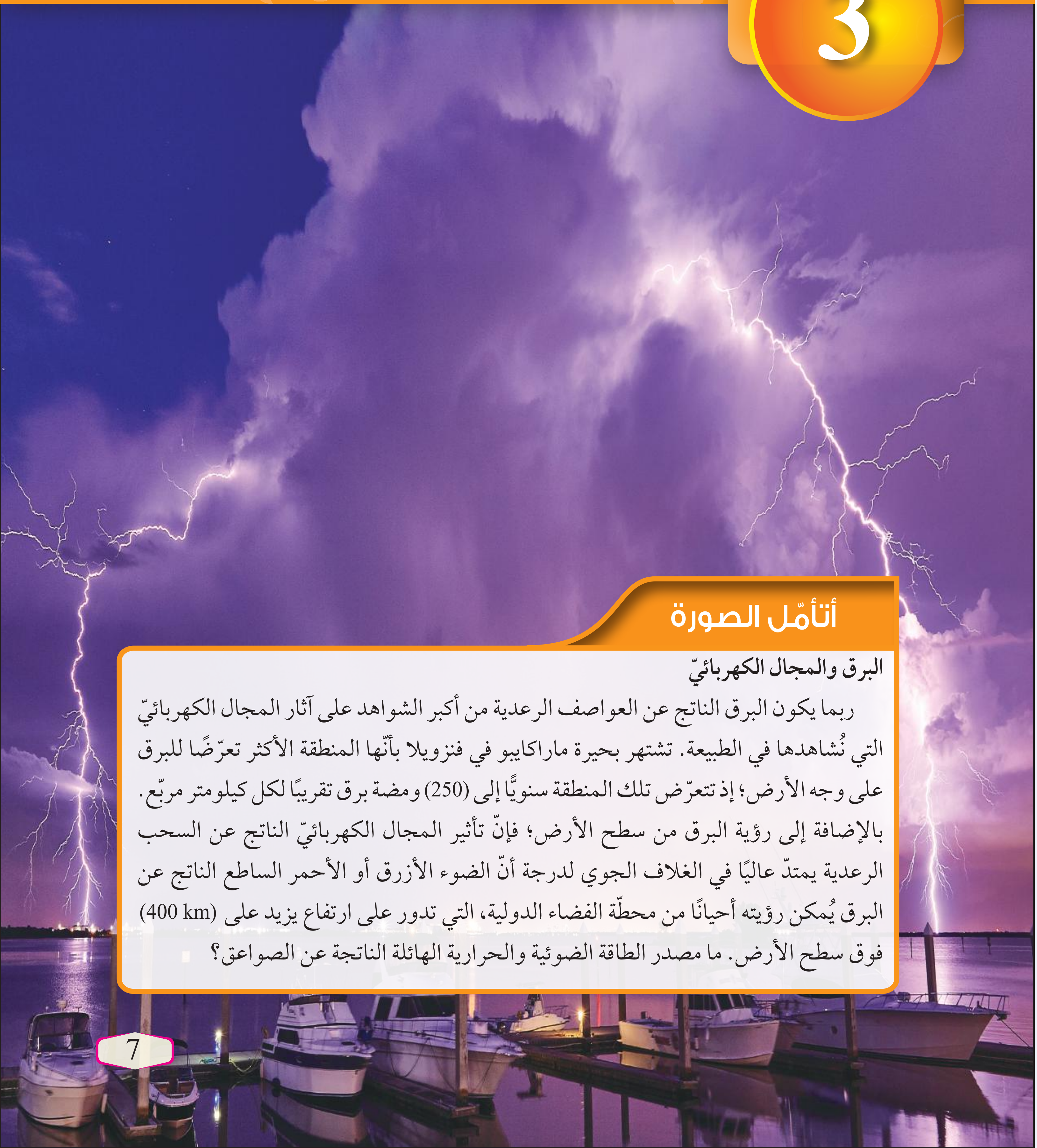
والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

الوحدة 3

الكهرباء السكونية

Static Electricity



أتأمّل الصورة

البرق والمجال الكهربائيّ

ربما يكون البرق الناتج عن العواصف الرعدية من أكبر الشواهد على آثار المجال الكهربائيّ التي نُشاهدها في الطبيعة. تشتهر بحيرة ماراكايبو في فنزويلا بأنّها المنطقة الأكثر تعرّضًا للبرق على وجه الأرض؛ إذ تتعرّض تلك المنطقة سنويًّا إلى (250) ومضة برق تقريبًا لكل كيلومتر مربّع. بالإضافة إلى رؤية البرق من سطح الأرض؛ فإنّ تأثير المجال الكهربائيّ الناتج عن السحب الرعدية يمتدّ عاليًا في الغلاف الجوي لدرجة أنّ الضوء الأزرق أو الأحمر الساطع الناتج عن البرق يُمكن رؤيته أحيانًا من محطّة الفضاء الدولية، التي تدور على ارتفاع يزيد على (400 km) فوق سطح الأرض. ما مصدر الطاقة الضوئية والحرارية الهائلة الناتجة عن الصواعق؟

الفكرة العامّة:

يحمل الجسم المشحون شحنة كهربائية فائضة موجبة أو سالبة، ويؤثّر بقوّة كهربائية في الأجسام المشحونة الموجودة في المنطقة المحيطة به. وتُستخدَم مفاهيم المجال الكهربائي والجهد الكهربائي لوصف التأثيرات التي تُحدثها الأجسام المشحونة في الحيّز المحيط بها.

الدرس الأول: الشحنة الكهربائية وقانون كولوم

الفكرة الرئيسة: تنشأ بين الشحنات الكهربائيّة المتشابهة قوى تنافر، وبين الشحنات المختلفة قوى تجاذب، وهي قوى تأثير عن بُعد. ويعتمد مقدار القوّة الكهربائية المتبادلة بين شحنتين كهربائيتين على مقدار كل من الشحنتين، وعلى المسافة بينهما.

الدرس الثاني: المجال الكهربائيّ

الفكرة الرئيسة: المجال الكهربائيّ خاصّية للحيّز الذي يُحيط بشحنة كهربائيّة وتظهر فيه آثار القوّة الكهربائيّة. ويعرف المجال الكهربائي عند نقطة بأنه القوة الكهربائية لكل وحدة شحنة موجبة عند تلك النقطة.

الدرس الثالث: الجهد الكهربائي

الفكرة الرئيسة: تختزن الشحنة الموضوعة عند نقطة في المجال الكهربائي طاقة وضع كهربائية. والجهد الكهربائي عند نقطة هو طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في وحدة الشحنات الموضوعة عند تلك النقطة.

تجربة استهلالية

قياس قوّة التنافر الكهربائيّة بين شحنتين عمليًّا

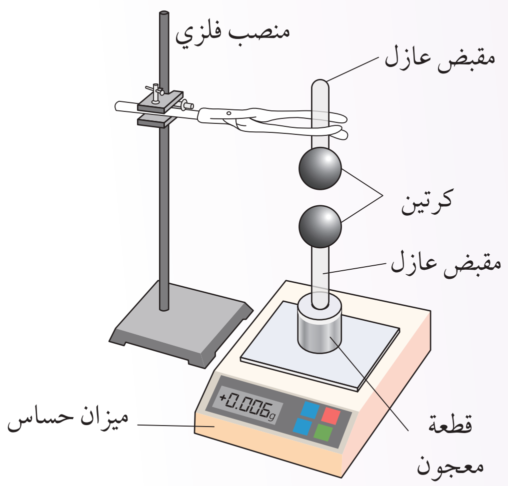
الموادّ والأدوات: ميزان رقميّ حسّاس، كرتان بولسترين (قطر كل منها 5 cm تقريبًا)، ورق ألمنيوم، منصب فلزيّ، معجون، مقبض عازل عدد (3)، مولّد فان دي غراف.

إرشادات السلامة: تحذير جهد عالٍ – عدم لمس كرة مولّد فان دي غراف وهو يعمل.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أغرزُ مقبضًا عازلًا في كلّ كرة بولسترين، ثمّ أُغلّف الكرة جيدًا بورق الألمنيوم.
2. أُشغّل الميزان، وأُثبّت إحدى الكرتين الصغيرتين ومقبضها العازل فوق الميزان باستعمال قطعة معجون، أو بأيّ طريقة مناسبة، وأضرب قراءة الميزان في تسارع السقوط الحر، لحساب (F_1)، وتساوي وزن الكرة.
3. أُثبّت الكرة الصغيرة الثانية ومقبضها العازل في المنصب الفلزيّ، كما في الشكل.
4. **أجرب:** أُشغّل مولّد فان دير غراف بمساعدة المعلم/ المعلمة، وأشحن به كلًّا من الكرتين، بملامسة كرة المولّد للكرتين معًا في اللحظة نفسها.
5. أُقرّب المنصب الفلزي من الميزان الحسّاس لتُصبح كرة المنصب فوق كرة الميزان، من دون أن تتلامسا.
6. **ألاحظ** قراءة الميزان الجديدة، وأضرِبُ القراءة في تسارع السقوط الحرّ لحساب (F_2)، وتساوي مجموع وزن الكرة والقوّة الكهربائية. وأحسب القوّة الكهربائية $(F_2 - F_1)$.



التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتج:** أهمّية المقبض العازل الذي تُثبّت به كلّ كرة.
2. **أستنتج:** بناءً على قراءات الميزان؛ أُحدّد اتّجاه القوّة الكهربائيّة المؤثّرة في الشحنة السفلى ومقدارها.
3. **أتوقّع:** كيف سيكون تأثير زيادة المسافة الرأسية بين الكرتين، أو إنقاصها؟
4. **أفسر:** لماذا تُصنّف القوّة الكهربائيّة بأنّها قوّة تأثير عن بُعد.

الفكرة الرئيسة:

تنشأ بين الشحنات الكهربائيّة المتشابهة قـوى تنافـر، وبين الشحنات المختلفة قوى تجاذب؛ وهي قـوى تأثير عن بُعد. ويعتمد مقدار القوّة الكهربائية المتبادلة بين شحنتين كهربائيتين على مقدار كل من الشحنتين، وعلى المسافة بينهما.

نتاجات التعلم:

- أوضّح المقصود بمبدأ تكمية الشحنة.
- أصف طرق الشحن الكهربائي.
- أستخدم علاقة رياضية لحساب القوّة الكهربائية المتبادلة بين شحنتين نقطيتين.
- أحسب القوة الكهربائية المحصلة المؤثرة في شحنة والناتجة عن عدة شحنات نقطية.

المفاهيم والمصطلحات:

تكمية الشحنة Quantization of charge

شحن بالدلك Charging by Rubbing

شحن بالتوصيل Charging by Conduction

شحن بالحثّ Charging by Induction

قانون كولوم Coulomb's Law

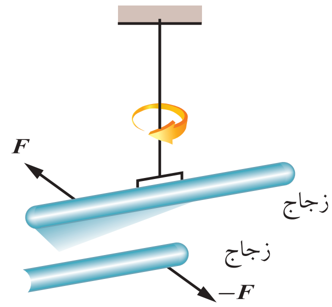
سماحية كهربائيّة Electric Permittivity

الشحنة الكهربائيّة Electric Charge

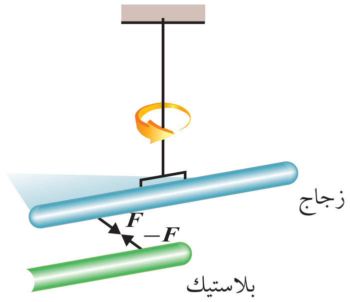
قبل 2600 عام تقريبًا، اكتشف الفيلسوف والرياضي اليوناني طاليس أنّه إذا دلك قطعة من العنبر المطّاطي بقطعة من الفرو؛ فإنّ العنبر يُصبح لديه القدرة على جذب الريش. ويُمكن ملاحظة التأثير نفسه عند دلك مشط بلاستيكي بالشعر أو بقطعة من الصوف، ثم تقريب المشط من قصاصات ورق صغيرة دون ملامستها له، إذ يصبح المشط قادرًا على جذب قصاصات الورق، ويمكن شحن بالون مطاطي منفوخ بالطريقة نفسها؛ وذلك بدلكه بالشعر أو بقطعة من الصوف، ويمكن أيضًا شحن قضيب بلاستيكي بدلكه بالصوف، وشحن قضيب زجاجي بدلكه بقطعة من الحرير. توصف الأجسام في هذه الحالة بأنها مشحونة كهربائيًّا Electrically charged، ويبين الشكل (1) مشاهدات عملية لأجسام مشحونة.

✓ **أتحقّق:** كيف يمكن شحن قضيب من البلاستيك؟ وكيف يمكن شحن قضيب من الزجاج؟

الشكل (1): يصبح المشط والعنبر قادرين على جذب قصاصات الورق بعد دلكهما بالصوف، ويتمكن البالون بعد دلكه بالصوف أو الشعر من جذب تيار ماء رفيع.



أ. عند تقريب قضيب زجاجي من قضيب زجاجي آخر بعد دلكهما بالحرير، تنشأ بينهما قوّة تنافر.



ب. عند دلك قضيب بلاستيكي بالصوف، وقضيب زجاجي بالحرير، وتقريبهما من بعضهما، تنشأ بينهما قوّة تجاذب.

الشكل (2): قوى التجاذب والتنافر الكهربائية.

يبيّن الشكل (2) التأثير الناتج عن تقريب الأجسام المشحونة من بعضها، حيث لوحظ أنه عند دلك قضيبين من الزجاج بالحرير وتعليق أحدهما كما يبيّن الشكل (2/ أ)، يتنافر القضيب المعلّق مع قضيب الزجاج المماثل له، في حين ينجذب قضيب الزجاج المشحون إلى قضيب بلاستيكي شُحن بدلكه بقطعة من الصوف، الشكل (2/ ب).

توصل العلماء إلى أن قوى التنافر والتجاذب التي تنشأ بين الأجسام ناتجة عن الشحنات الكهربائية التي تكتسبها هذه الأجسام عند دلكها. وأن هناك نوعين من الشحنة الكهربائية أُطلق على أحدهما «شحنة موجبة» وعلى الآخر «شحنة سالبة». وتنشأ قوى التجاذب الكهربائيّ بين الشحنات الكهربائيّة المختلفة، في حين تنشأ قوى التنافر الكهربائيّ بين الشحنات الكهربائيّة المتشابهة.

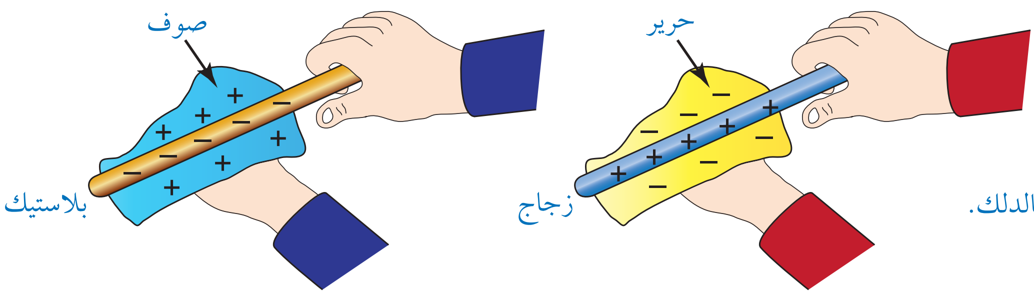
تُعدّ الشحنة الكهربائية خاصّية أساسية للجسيمات الأولية التي تتكوّن منها المادة. إذ يمكن تعريف الشحنة الموجبة بأنها النوع الذي تمتلكه البروتونات (الموجودة في نوى الذرّات)، والشحنة السالبة بأنها النوع الذي تمتلكه الإلكترونات (التي تتحرك حول نواة الذرّة). في الأجسام المتعادلة؛ غير المشحونة، يكون عدد الإلكترونات مساويًا لعدد البروتونات. وتصبح الأجسام مشحونة كهربائيًّا عندما تفقد بعضًا من الإلكترونات أو تكتسبها، ما يؤدي إلى إحداث عدم توازن في توزيع الشحنات الكهربائيّة عليها.

الربط بالحياة

يحدث احتكاك بين قطع الملابس عند دورانها بسرعة عالية داخل مجفّف الغسيل؛ فتحدث عملية شحن بالدلك. وتُشحن بعض الملابس بشحنة كهربائيّة موجبة، وبعضها الآخر بشحنة كهربائيّة سالبة. تُسبّب قوى التجاذب الكهربائيّ التصاق الملابس معًا.

للتخلّص من هذه المشكلة؛ تُباع في الأسواق منتجات بأشكال مختلفة، منها على شكل صفائح (أوراق)، تبعث بمواد كيميائية موجبة الشحنة، فتساعد على التخلّص من الشحنات السالبة التي تظهر على الملابس. كما تُستخدَم كرات من مواد مختلفة من الصوف أو من ورق الألمنيوم، تساعد على التخلّص من الشحنات المتراكمة على الملابس.

الشكل (3): الشحن بالدلك.



أ. تنتقل الإلكترونات من الزجاج إلى الحرير.

ب. تنتقل الإلكترونات من الصوف إلى البلاستيك.

طرائق الشحن الكهربائيّ Methods of Electric Charging

توجد ثلاث طرائق لإحداث عملية الشحن الكهربائي، هي: الشحن بالدلك، والشحن بالتوصيل، والشحن بالتأثير.

- **الشحن بالدلك Charging by Rubbing**: عملية دلك جسم مع جسم آخر، فينتج عنها انتقال الإلكترونات من سطح أحد الجسمين إلى سطح الجسم الآخر؛ فيُصبح الجسم الفاقد للإلكترونات موجب الشحنة، ويُصبح الجسم المكتسب للإلكترونات سالب الشحنة. وهذه الطريقة مفيدة في شحن الأجسام العازلة، كما يبين الشكل (3). إذ يفقد الزجاج بعضًا من الإلكترونات عند دلكه بالحرير فيصبح مشحونًا بشحنة موجبة، في حين يكتسب البلاستيك بعضًا من الإلكترونات عند دلكه بالصوف فيصبح مشحونًا بشحنة سالبة. وتتركز الشحنة التي تكتسبها الأجسام في منطقة الدلك.

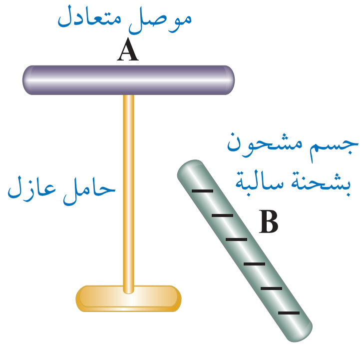
من المبادئ المهمة في الكهرباء المستخلصة من الملاحظات التجريبية، ما يعرف بمبدأ حفظ الشحنة Conservation of charge، إذ تكون الشحنة الكهربائية دائمًا محفوظة في نظام معزول، وهذا يعني أنه عند دلك جسم ما بجسم آخر يكتسب أحد الجسمين كمية من الشحنة السالبة، في حين يكتسب الآخر كمية مساوية من الشحنة الموجبة. فمثلًا: عند دلك الزجاج بالحرير فإن ما يفقده الزجاج من إلكترونات يكون مساويًا لما يكسبه الحرير منها.

أفكّر: لماذا تتركز الشحنات التي يكتسبها قضيب بلاستيك عند دلكه بالصوف في منطقة الدلك فقط؟

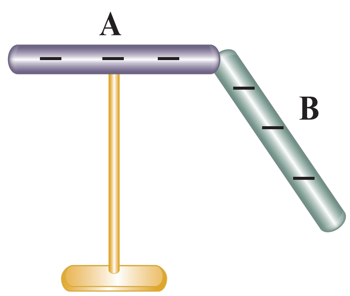
أتحقّق: أحدّد اتجاه انتقال الإلكترونات ونوع الشحنة الكهربائية التي يكتسبها كل جسم في الشكل (3).

- **الشحن بالتوصيل Charging by Conduction**: عملية ملامسة جسم مشحون جسمًا آخر متعادلًا؛ فيحدث انتقال للشحنات الكهربائيّة بين الجسمين. فإذا كان الجسم المشحون سالب الشحنة، تنتقل بعض الإلكترونات منه إلى الجسم المتعادل؛ فيصبح الجسمان سالبي الشحنة، كما يبيّن الشكل (4). وإذا كان الجسم المشحون موجب الشحنة، تنتقل إليه بعض الإلكترونات من الجسم المتعادل؛ فيصبح الجسمان موجبي الشحنة. وهذه الطريقة مفيدة في شحن الأجسام الموصلة؛ لسهولة انتقال الشحنات الكهربائيّة خلالها.

- **الشحن بالحثّ Charging by Induction**: عملية شحن جسم موصل متعادل؛ عن طريق تقريب جسم مشحون (موصل أو عازل) منه من دون ملامسته، فيُعاد توزيع الشحنات على طرفَي الجسم الموصل المتعادل، بحيث تنحاز الشحنات السالبة إلى جهة محدّدة من الجسم لتُشكّل طرفًا سالبًا، تاركة الطرف الآخر موجب الشحنة، ويستمر هذا التوزيع طالما بقي الجسم المؤثر قريبًا. وإذا ما فُرّغت شحنة الموصل البعيدة في الأرض؛ فإنّ شحنته تُصبح دائمة، ويبيّن الشكل (5) خطوات الشحن بالحث.

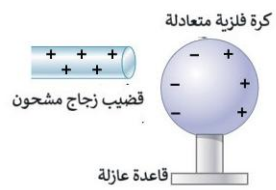


أ . يوضع الجسم الموصل المراد شحنه على حامل عازل.

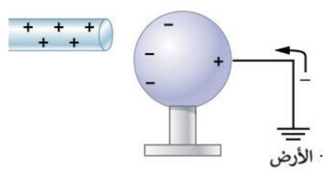


ب. عند تلامس الجسمين، تنتقل بعض الإلكترونات من الجسم المشحون إلى الجسم المتعادل، ويصبح الجسمان مشحونين بشحنة سالبة.

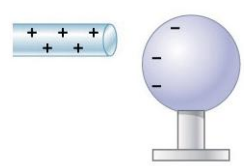
الشكل (4): الشحن بالتوصيل.



أ. تقريب قضيب مشحون بشحنة موجبة من كرة فلزّية متعادلة، فيعاد توزيع الشحنات على طرفي الكرة.



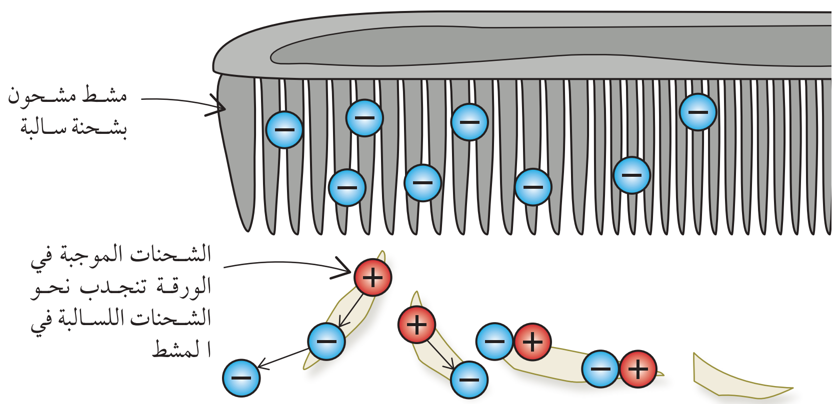
ب. توصيل الكرة بالأرض، فتنتقل الشحنات السالبة (الإلكترونات) من الأرض إلى الكرة، فيتم تفريغ الشحنة الموجبة.



جـ. فصل الكرة عن الأرض، فيكون لديها فائض من الشحنات السالبة.

د . بعد إبعاد المؤثر تصبح الكرة مشحونة بشحنة سالبة، وتتوزّع الشحنات على سطحها بانتظام.

الشكل (5): خطوات الشحن بالحثّ .



الشكل (6): يعاد توزيع الشحنات على سطح الورقة المتعادلة عند تقريب مشط مشحون منها، ما يؤدي إلى انجذابها إلى المشط.

تحدث عملية مماثلة للشحن بالحث في المواد العازلة، إذ يمكن أن تنزاح الشحنات الموجبة والسالبة في الجزيئات عن أماكنها قليلًا تحت تأثير شحنة خارجية، وتكون النتيجة ظهور شحنة موجبة على أحد جانبي الجزيء أكثر من الجانب الآخر، وهو ما يعرف بالاستقطاب. هذا يفسر انجذاب قصاصات الورق الصغيرة نحو جسم مشحون مثل مشط أو مسطرة من البلاستيك، إذ تنزاح الشحنات داخل الورقة بحيث يكتسب سطح الورقة القريب من المشط شحنة موجبة، فتتجاذب مع الشحنة السالبة على المشط، ألاحظ الشكل (6).

أتحقّق: ما مقدار أقلّ كمّية من الشحنة الكهربائيّة يُمكن أن توجد على انفراد؟ وما الجسيمات التي تحملها؟

تكمية الشحنة Quantization of charge

الشحنة الكهربائيّة كمّية فيزيائيّة، تُقاس وفق النظام الدولي للوحدات بوحدة كولوم coulomb، ورمزه C، علمًا بأنّ شحنة الإلكترون الواحد التي تساوي $(-1.6 \times 10^{-19}\ C)$ هي أقلّ كمّية من الشحنة الكهربائيّة يُمكن أن توجد على انفراد، وتُسمّى الشحنة الأساسية. وهي نفسها مقدار شحنة البروتون؛ فكلاهما يحمل مقدار الشحنة نفسه، مع اختلاف الإشارة، فالإلكترون شحنته سالبة ورمزها $(-e)$ في حين أن البروتون شحنته موجبة ورمزها $(+e)$.

يصبح الجسم مشحونًا عندما يفقد أو يكسب عددًا صحيحًا من الإلكترونات؛ لذلك فإن شحنة أي جسم يجب أن تكون من

مضاعفـات شـحنة الإلكتـرون، وهـذا ما يُسـمّى مبـدأ **تكمية الشـحنة Quantization of charge**. ويمكـن التعبيـر عنه بالعلاقـة الرياضيـة الآتية:

$$q = \pm ne$$

حيث (q): شحنة الجسم.

(n): عدد الإلكترونات المفقودة أو المكتسبة.

(e): مقدار شحنة الإلكترون (أو البروتون).

أفكّر: هل يمكن لجسم مشحون أن يحمل شحنة مقدارها 3×10^{-19} C أبرر إجابتي باستخدام مبدأ تكمية الشحنة.

المثال 1

أحسب مقدار الشحنة الكهربائية للأجسام الآتية، وأحدّد نوعها:

أ . جسم اكتسب (10^{10}) إلكترونًا.

ب. جسم فقد (2.5×10^{10}) إلكترونًا.

المعطيات: $n_1 = 10^{10}$ elctron, $n_2 = 2.5 \times 10^{10}$ elctron

المطلوب: مقدار الشحنة $q = ?$

الحل:

أ . بما أن الجسم اكتسب إلكترونات، فإن شحنته أصبحت سالبة، وتحسب بتطبيق العلاقة:

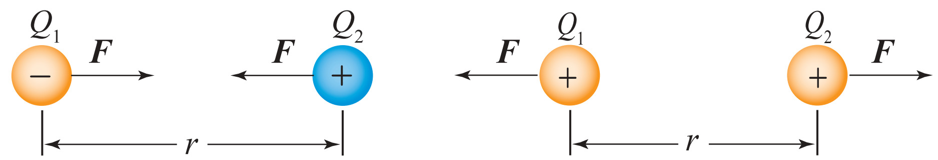
$$q_1 = -n_1e = -10^{10} \times 1.6 \times 10^{-19} = -1.6 \times 10^{-9}\ C$$

ب. بما أن الجسم فقد إلكترونات، فإن شحنته أصبحت موجبة، وتحسب بتطبيق العلاقة:

$$q_2 = n_2e = 2.5 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-19} = 4 \times 10^{-9}\ C$$

الربط بالعلوم الحياتية

يطير النحل من زهرة إلى أُخرى؛ فرائحة الأزهار وألوانها تجذب النحل إليها كي تجمع الرحيق وحبوب اللقاح. توصّل باحثون من جامعة بريستول البريطانية إلى أنّ الأزهار تحمل شحنات كهربائيّة سالبة، في حين تكتسب النحلة في أثناء طيرانها بسبب حركة جناحيها شحنات كهربائيّة موجبة، وأنّ النحلة يُمكنها استشعار الشحنة السالبة على الأزهار، كما يُمكنها معرفة إن كان نحل آخر قد حطّ على هذه الزهرة أم لا، فزيارة كلّ نحلة للزهرة تعمل على معادلة جزء من الشحنة السالبة عليها. كما أنّ اختلاف الشحنة بين الزهرة والنحلة يجعل حبوب اللقاح تنجذب إلى جسم النحلة، فتحملها معها.



الشكل (7): القوّة الكهربائية بين شحنتين كهربائيتين.

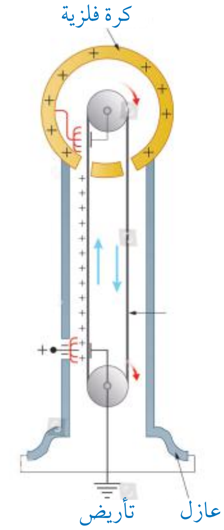
أ : القوّة الكهربائية الناشئة بين شحنتين متشابهتين في النوع تكون تنافرًا.

ب : القوّة الكهربائية الناشئة بين شحنتين مختلفتين في النوع تكون تجاذبًا.

الربطُ بالتكنولوجيا

مولـد فـان دي غـراف هو جـهاز كهربائيّ يُستعمل في الأبحاث العلمية؛ إضافة إلى استعماله لتوضيح تطبيقات وظواهر الكهرباء الساكنة.

يتكوّن الجهاز من مصدر للشحنات، وفرشاة فلزية ذات رؤوس مدبّبة تنقل الشحنة الموجبة إلى حزام عازل يحملها إلى أعلى الجهاز؛ إذ توجد فرشاة فلزّية ثانية تلتقط الشحنات الموجبة وتنقلها إلى موصل فلزي كروي الشكل ومعزول، فتنتشر الشحنات على سطحه الخارجي.



قانون كولوم Coulomb's Law

نشر عالم الفيزياء الفرنسي شارل كولوم سنة 1785م نتائج تجاربه على القـوى الناشـئة بين الشحنات الكهربائيـة، إذ وضّـح أنّ القـوّة الكهربائيّة (F) الناشئة بين كرتين صغيرتين مشحونتين بشحنتين (Q_1) و (Q_2) تعتمد على مقدار كلّ من شحنتي الكرتين، وعلى المسافة الفاصلة بين مركزيهما (r)، وتكون القوّة الناشئة بينهما تجاذبًا أو تنافرًا بناء على نوع شحنتيهما، كما يبيّن الشكل (7).

توصّل كولوم من تجاربه إلى خصائص القوّة الكهربائية الناشئة بين كرتين صغيرتين مشحونتين، وسوف نطلق عليهما اسم «شحنتين نقطيتين». وينص **قانـون كولـوم Coulomb's Law** على أنّ مقدار القوّة الناشـئة بين شحنتين نقطيتين يتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب الشحنتين، وعكسيًّا مع مربّع المسافة بينهما. وعندما تكون الشحنات في الهواء يُمثّل قانون كولوم رياضيًّا بالعلاقة الآتية:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

حيث يمثّل الرمز ε_0 **السماحية الكهربائيّة Electric Permittivity** للفراغ، ومقداره يساوي $8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N.m^2$، وتُعرّف السماحية الكهربائيّة للوسط بأنّها خصيصة للمادّة العازلة للكهرباء تعبّر عن قابلية ذرّاتها للاستقطاب عند تأثرها بقوى كهربائية من شحنات أخرى.

يمكن التعبير عن الثوابت جميعها في العلاقة السابقة بثابت واحد يُرمز إليه بالرمز k، حيث:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

وقيمة الثابت k في الفراغ تساوي $9 \times 10^9 \; N.m^2/C^2$ ولا يختلف هذا المقدار عند وجود الشحنات في الهواء. ويمكن إعادة كتابة العلاقة الرياضية لقانون كولوم بدلالة الثابت k على الصورة الآتية:

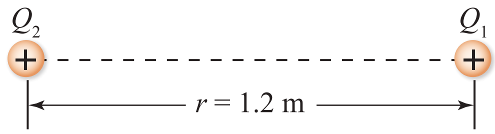
$$F = k\,\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

يقتصر تطبيق قانون كولوم عندما تكون الشحنات الكهربائيّة نقطية، والشحنة النقطيّة هي شحنة كهربائيّة موجودة في نقطة. ويمكن التعامل مع الشحنات التي تحملها أجسام أبعادها صغيرة ومهملة بالنسبة إلى المسافات بين الأجسام نفسها على أنّها شحنات نقطية. ومثال ذلك الإلكترون والبروتون، والأيونات الموجبة والسالبة، كما أنّ الجسيمات الكروية المشحونة التي تتوزّع الشحنات عليها بشكل منتظم تُعدّ شحنات نقطية بالنسبة إلى المناطق الواقعة خارج هذه الجسيمات الكروية.

أفكّر: بناءً على العلاقة الرياضيّة لقانون كولوم، أُبيّن ما يحدث للقوة الكهربائيّة الناشئة بين شحنتين تفصلهما مسافة في الهواء؛ عندما تكون السماحية الكهربائية للوسط المحيط بالشحنات ثلاثة أضعاف السماحية الكهربائية للهواء.

المثال 2

شحنتان نقطيتان موجبتان تقعان على محور (x) في الهواء، بحيث تفصلهما مسافة $(1.2\ m)$ كما في الشكل (8/ أ). مقدار الأولى $(4 \times 10^{-6}\ C)$ ومقدار الثانية $(6 \times 10^{-6}\ C)$. أجد مقدار القوّة المؤثّرة في الشحنة الأولى وأُحدّد اتّجاهها، ثمّ أجد مقدار القوّة المؤثّرة في الشحنة الثانية وأُحدّد اتّجاهها.



الشكل (8/ أ): شحنتان نقطيتان في الهواء.

المعطيات: $Q_1 = 4 \times 10^{-6}\ C,\ \ Q_2 = 6 \times 10^{-6}\ C,\ \ r = 1.2\ m$

المطلوب: $F_{12} = ?,\ \ F_{21} = ?$

الحلّ:

أوّلًا: مقدار القوّة التي تؤثّر بها الشحنة (Q_2) في الشحنة (Q_1)

$$F_{21} = k\,\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$F_{21} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{-6}}{(1.2)^2}$$

$$F_{21} = 1.5 \times 10^{-1}\ N$$

بما أنّ الشحنتين متشابهتان؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تنافرًا، أي إنّ القوّة التي تتأثّر بها الشحنة الأولى تكون نحو اليمين؛ باتّجاه محور (x) الموجب.

ثانيًا: مقدار القوّة التي تؤثّر بها الشحنة (Q_1) في الشحنة (Q_2)

$$F_{12} = k\,\frac{Q_1Q_2}{r^2}$$

$$F_{12} = 9\times10^{9}\times\frac{4\times10^{-6}\times6\times10^{-6}}{(1.2)^2}$$

$$F_{12} = 1.5\times10^{-1}\ \text{N}$$

وبما أنّ القوّة الناشئة بينهما تنافر، فإنّ القوّة التي تتأثّر بها الشحنة الثانية تكون نحو اليسار؛ باتّجاه محور (x) السالب.

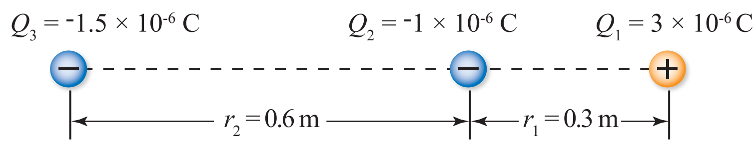
الشكل (8/ ب): القوة المتبادلة بين شحنتين.

أستنتجُ أنّ القوّتين المؤثّرتين في كلا الشحنتين هما قوّتان متساويتان مقدارًا ومتعاكستان اتّجاهًا، فهما قوّتا فعل وردّ فعل حسب القانون الثالث لنيوتن، ويُمكن وصفهما بالقوّة المتبادلة بين الشحنتين،كما في الشكل (8/ ب).

$$\boldsymbol{F}_{21} = -\boldsymbol{F}_{12}$$

المثال 3

ثلاث شحنات تقع جميعها على محور (x) في الهواء، يُبيّن الشكل (9) مقاديرها وأنواعها والمسافات الفاصلة بينها. أجد مقدار القوّة المحصّلة المؤثّرة في الشحنة (Q_2)، وأُحدّد اتّجاهها.



الشكل (9): القوّة المحصّلة المؤثّرة في شحنة.

المعطيات: $Q_1 = 3\times10^{-6}$ C, $Q_2 = -1\times10^{-6}$ C, $Q_3 = -1.5\times10^{-6}$ C,
$r_1 = 0.3$ m, $r_2 = 0.6$ m

المطلوب: $F_2 = ?$

الحلّ:

سأستعملُ الرمز F_{12} لتمثيل مقدار القوّة التي تؤثّر بها الشحنة Q_1 في الشحنة Q_2، وأستعملُ الرمز F_{32} لتمثيل مقدار القوّة التي تؤثّر بها الشحنة Q_3، في الشحنة Q_2.

$$F_{12} = k\,\frac{Q_1Q_2}{r_1^{\,2}}$$

$$F_{12} = 9\times10^{9}\times\frac{3\times10^{-6}\times1\times10^{-6}}{(0.3)^2}$$

$$F_{12} = 3\times10^{-1}\ \text{N}$$

أُلاحظ أنّ الإشارة السالبة للشحنة الكهربائيّة لا تدخل في حساب مقدار القوّة الكهربائيّة، لكنّها مهمّة في تحديد اتّجاه القوّة الكهربائيّة المؤثّرة في كلّ شحنة. وبما أنّ الشحنتين Q_1, Q_2 مختلفتان في النوع؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تجاذبًا، أي إنّ القوّة $\boldsymbol{F}_{12}$ تكون باتّجاه محور (x) الموجب.

$$F_{32} = k\,\frac{Q_3 Q_2}{r_2^{\,2}}$$

$$F_{32} = 9 \times 10^{9} \times \frac{1.5 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^{-6}}{(0.6)^2}$$

$$F_{32} = 0.375 \times 10^{-1}\ \text{N}$$

وبما أنّ الشحنتين Q_3, Q_2 متشابهتان؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تنافرًا، أي إنّ القوّة $\boldsymbol{F}_{32}$ تكون باتّجاه محور (x) الموجب.

$$\boldsymbol{F}_2 = \boldsymbol{F}_{12} + \boldsymbol{F}_{32}$$

$$F_2 = 0.375 \times 10^{-1} + 3 \times 10^{-1} = 3.375 \times 10^{-1}\ \text{N}$$

وتكون القوّة المحصّلة التي تؤثّر في الشحنة الثانية باتّجاه محور (x) الموجب.

تمرين

في المثال (3) السابق، أجد مقدار القوّة المحصّلة المؤثّرة في الشحنة (Q_1) وأُحدّد اتّجاهها.

بما أنّ الشحنات التي نتعامل معها في التطبيقات الحسابية على قانون كولوم صغيرة جدًّا؛ فإنّه من الضروري استعمال البادئات المصاحبة لوحدات القياس، بحيث يُعبَّر عن الشحنات الصغيرة جدًّا باستعمال بعض هذه البادئات مع وحدة الكولوم، كما يُبيّن الجدول (1).

الجدول (1): استعمال بادئات الوحدات في التعبير عن مقدار الشحنة.

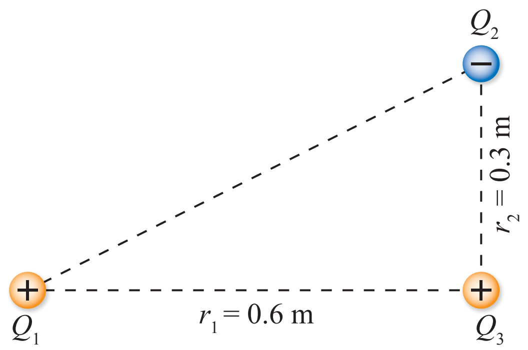
الشحنة باستعمال البادئة	الرمز	البادئة	الشحنة بوحدة كولوم
2 mC	m	ملّي	2×10^{-3} C
5 µC	µ	ميكرو	5×10^{-6} C
2 nC	n	نانو	2×10^{-9} C
4 pC	p	بيكو	4×10^{-12} C
4 fC	f	فيمتو	4×10^{-15} C

أبحثُ

استخدم العالم كولوم في تجاربه على القوى الناشئة بين الشحنات، جهازا صممه بنفسه. أبحث في مصادر المعرفة الموثوقة عن اسم الجهاز ومبدأ عمله، وأعد تقريرًا أعرضه أمام طلبة الصف.

المثال 4

ثلاث شحنات موضوعة في الهواء، بحيث تُشكّل معًا مثلّثًا قائم الزاوية، كما في الشكل (10). إذا علمتُ بأنّ الشحنة الأولى ($+17.1\ \mu C$) والشحنة الثانية ($-6\ \mu C$) والشحنة الثالثة ($+700\ nC$)؛ فأحسبُ مقدار القوّة المحصّلة المؤثّرة في الشحنة الثالثة، وأُحدّد اتّجاهها.



الشكل (10): ثلاث شحنات على رؤوس مثلث.

المعطيات:

$Q_1 = +17.1 \times 10^{-6}$ C, $Q_2 = -6 \times 10^{-6}$ C, $Q_3 = +700 \times 10^{-9}$ C, $r_1 = 0.6$ m, $r_2 = 0.3$ m

المطلوب:

$\boldsymbol{F}_3 = ?$

الحلّ:

$$F_{13} = k\frac{Q_1Q_3}{r_1^2}$$

$$F_{13} = 9 \times 10^9 \times \frac{17.1 \times 10^{-6} \times 700 \times 10^{-9}}{(0.6)^2}$$

$$F_{13} = 0.3 \text{ N}$$

وبما أنّ الشحنتين Q_1, Q_3 متشابهتان؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تنافرًا، أي إنّ $\boldsymbol{F}_{13}$ التي تؤثّر بها الشحنة الأولى في الثالثة تكون نحو اليمين؛ باتّجاه محور (x) الموجب.

$$F_{23} = k\frac{Q_2Q_3}{r_2^2}$$

$$F_{23} = 9 \times 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-6} \times 700 \times 10^{-9}}{(0.3)^2}$$

$$F_{23} = 0.42 \text{ N}$$

وبما أنّ الشحنتين Q_2, Q_3 مختلفتان؛ فإنّ القوّة الناشئة بينهما تكون تجاذبًا، أي إنّ $\boldsymbol{F}_{23}$ التي تؤثّر بها الشحنة الثانية في الثالثة تكون نحو الأعلى؛ أي باتّجاه محور (y) الموجب. وتحسب القوة المحصلة باستخدام العلاقة:

$$F_3 = \sqrt{(F_{13})^2 + (F_{23})^2}$$

$$F_3 = \sqrt{(0.3)^2 + (0.42)^2}$$

$$F_3 = \sqrt{0.09 + 0.18} = 0.52 \text{ N}$$

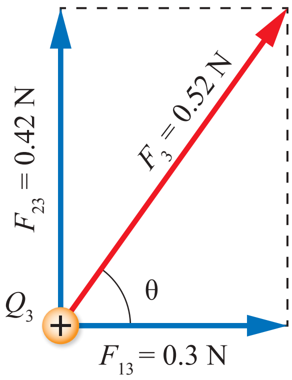
أُحدّد اتّجاه القوّة المحصّلة التي تؤثّر في الشحنة الثالثة؛ بمعرفة الزاوية المرجعية θ بين القوّة المحصّلة ومحور (x) الموجب. كما في الشكل (11).

$$\tan\theta = \frac{0.42}{0.3} = 1.4$$

$$\theta = \tan^{-1}(1.4) = 54.5^{\circ}$$

$$\boldsymbol{F_3} = 0.52\ \text{N},\ 54.5^{\circ}$$

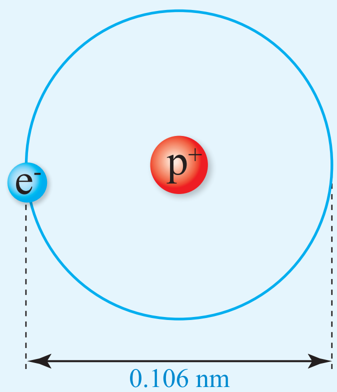
أُلاحظ أنّ الزاوية ($\theta > 45^{\circ}$)، أي إنّ المحصّلة أقرب إلى القوّة الأكبر.



الشكل (11): محصلة قوتين متعامدتين.

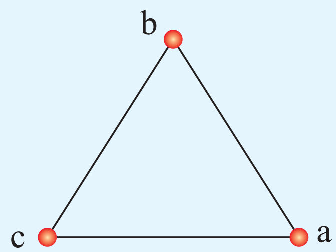
تمرين

1. **أستخدم الأرقام:** تتكون ذرّة الهيدروجين من إلكترون واحد يدور حول نواة تتكوّن من بروتون واحد، كما في الشكل (12). تنشأ بين الإلكترون والبروتون قوّة تجاذب كهربائيّة، تُشكّل قوّة مركزية تجعل الإلكترون يدور حول النواة. إذا علمت أن قطر ذرّة الهيدروجين 0.106 nm؛ فأحسبُ مقدار القوّة المركزية المؤثّرة في الإلكترون.



الشكل (12): ذرّة الهيدروجين.

2. **أستخدم الأرقام:** وُضِعت في الهواء ثلاث شحنات موجبة ومتساوية، مقدار كلّ منها ($+1\mu C$) على رؤوس مثلّث متساوي الأضلاع؛ طول ضلعه (30 cm)، كما يبين الشكل (13) أجد مقدار القوّة المحصّلة المؤثّرة في الشحنة الموضوعة عند الرأس(a).

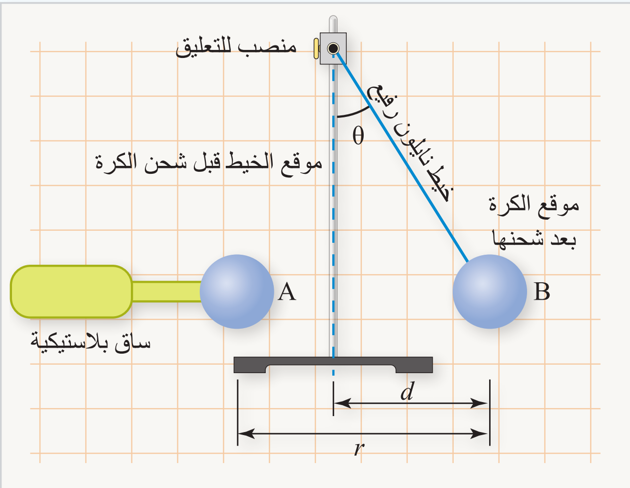


الشكل (13): شحنات متماثلة موضوعة على رؤوس مثلث متساوي الأضلاع.

التجربة ١

استقصاء العلاقة بين القوّة الكهربائيّة والبُعد بين الشحنتين في قانون كولوم

الموادّ والأدوات: كرتـان مـن البولسـترين، ورق ألمنيوم، سـاق بلاسـتيكية، خيـط نايلـون رفيـع طوله (50 cm)، مولّـد فـان دي غـراف، منصـب فلـزيّ، ورقـة رسـم بيانـي (مربعـات)، ميـزان إلكترونـي.



إرشادات السلامة: تحذير جهد عالٍ - عدم لمس كرة مولّد فان دي غراف وهو يعمل.

أصوغ فرضيتي حـول العلاقـة بين القـوة الكهربائيـة المتبادلة بين شحنتين، والبعد بينهما.

أختبر فرضيتي:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُغلّف كرتيّ البولسترين بورق الألمنيوم، ثم أقيس كتلة الكرة (B) وأُعلّقها على المنصب باستعمال خيط النايلون، وأُثبّت الكرة (A) في الساق البلاستيكية كما في الشكل، وأُثبّت ورقة الرسم البياني خلف الكرتين بشكل رأسي.
2. بمساعدة المعلم/المعلمة؛ أُشغّل مولّد فان دي غراف وأستعمله لشحن الكرتين بشحنتين متشابهتين.
3. **أجرب:** أُقرّب الكرة (A) بشكل تدريجيّ من الكرة المعلّقة (B) وألاحظ ما يحدث للكرة (B). وأحافظ على إبقاء مركز كلّ كرة على الخط الأفقيّ الواصل بينهما.
4. **أقيس** كلًّا من طول الخيط (L) والإزاحة الأُفقية التي حدثت للكرة المعلّقة (d) والمسافة الفاصلة بين الكرتين (r)، وأُدوّن النتائج في جدول خاصّ.
5. **أجرب:** أُحرّك الكرة (A) باتّجاه الكرة (B) المعلّقة، ثمّ أُكرّر القياسات في الخطوة السابقة.
6. أُكرّر التجربة (3) مرّات أخرى مع تغيير موقع الكرة (A) في كلّ مرة، ثمّ أُدوّن القياسات.

التحليل والاستنتاج:

1. أرسم مخطّط الجسم الحرّ للكرة (B)، وأراعي أن الكرة متزنة لحظيًّا عند أقصى موقع لها.
2. **أستخدم الأرقام:** أحسب القوة الكهربائية، وأفترض أن $\sin\theta = \tan\theta$ (لأنّ الزاوية صغيرة القياس).
3. **أرسم العلاقة البيانية** بين القوّة الكهربائيّة والمسافة الفاصلة بين الكرتين (r).

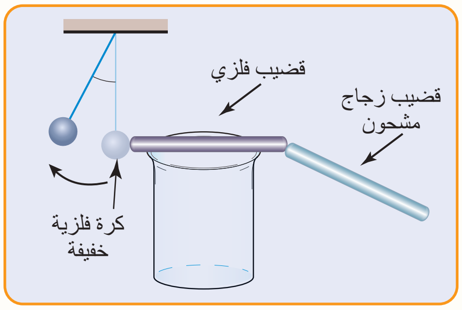
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة**: أذكرُ نص قانون كولوم، وأُمثّله بعلاقة رياضية.

2. **أُفسّر** سبب انجذاب قصاصات الورق نحو مسطرة بلاستيكية دُلكت بشعر الرأس، ثم تنافر القصاصات مع المسطرة عند تلامسهما.

3. **أستخدم الأرقام**: الشحنة التي يكتسبها الجسم المشحون بالدلك تقريبا (10^{-8} C)، في حين أن صاعقة البرق قد تنقل ما يصل إلى (20 C) بين الأرض والسحابة. أحسب عدد الإلكترونات المكتسبة أو المفقودة للحصول على كل من هاتين الشحنتين.

4. يبين الشكل الآتي مخططًا لتجربة أجريت باستخدام كرة صغيرة مغلفة بورق ألمنيوم، علقت الكرة بحيث تكون ملامسة لطرف قضيب فلزي موضوع على كأس زجاجي. لوحظ أنه عند دلك قضيب زجاجي مشحون بطرف القضيب الفلزي، فإن الكرة تحركت مبتعدة عن القضيب.



أ . **أفسر** سبب ابتعاد الكرة وتنافرها مع القضيب الفلزي.

ب. **أتوقع**: ماذا يحدث عند تكرار التجربة بوضع قضيب بلاستيك بدلًا من القضيب الفلزي؟ أقدم دليلًا يدعم صحة إجابتي.

5. **أستخدم الأرقام**: شحنتان كهربائيتان نقطيّتان موجبتان، مقدار كل منهما (2 μC) تفصلهما مسافة (0.5 m). أحسبُ مقدار القوّة الكهربائيّة التي تؤثّر بها إحدى الشحنتين في الأُخرى.

6. أُجريت تجربة عملية لدراسة العلاقة بين قوّة التجاذب الكهربائيّة بين شحنتين نقطيتين والمسافة الفاصلة بينهما، ونُظّمت النتائج في الجدول الآتي.

المسافة بين الشحنتين (m)	0.5	1.0	1.5	2.0
القوّة الكهربائيّة (N)	30×10^{-3}	7×10^{-3}	3×10^{-3}	2×10^{-3}

أ . **أضبط المتغيرات**: أحدد المتغير المستقل والمتغير التابع في التجربة.

ب. **أمثل البيانات** بالرسم البياني، فأمثّل المسافة على محور (x) والقوّة على محور (y).

جـ. **أستنتج**: أمثل العلاقة بين القوة والمقدار ($\frac{1}{r^2}$). ماذا يعني ميل هذه العلاقة؟

د . **أصدر حكمًا**: هل تخضع هذه النتائج لقانون كولوم بدقّة؟ أفسر إجابتي.

المجال الكهربائيّ
Electric Field

▶ **الفكرة الرئيسة :**

المجال الكهربائيّ خاصّية للحيّز الذي يُحيط بشحنة كهربائيّة وتظهر فيه آثار القوّة الكهربائيّة. ويعرف المجال الكهربائي عند نقطة بأنه القوة الكهربائية لكل وحدة شحنة موجبة عند هذه النقطة.

▶ **نتاجات التعلّم :**

- أعرّف المجال الكهربائي عند نقطة.
- أحسب المجال الكهربائي المحصل عند نقطة والناتج عن شحنات نقطية عدّة.
- أرسم خطوط المجال الكهربائي لتوزيعات مختلفة من الشحنات النقطية.
- أستخدم خطوط المجال لوصف مقدار المجال وتحديد اتجاهه عند نقطة داخله.

▶ **المفاهيم والمصطلحات :**

شحنة اختبار	Test Charge
المجال الكهربائيّ	Electric Field
المجال الكهربائيّ عند نقطة	Electric Field at a Point
خطوط المجال الكهربائيّ	Electric Field Lines
كثافة خطوط المجال الكهربائيّ	Density of Electric Field Lines

المجال الكهربائي للجسم المشحون
Electric Field of a Charged Object

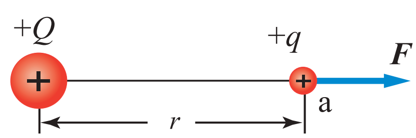
يؤثّر البالون المشحون في قصاصات الورق بقوّة كهربائية على الرغم من عدم وجود تلامس مباشر بينهما، فالقوّة الكهربائية هي قوّة تأثير عن بعد. وكذلك: قوة الجاذبية الأرضية، والقوة المغناطيسية، هي قوى تأثير عن بعد.

تنشأ هذه القوى بوجود مجالات تسببها، هي: مجال الجاذبية الأرضية، والمجال الكهربائي، والمجال المغناطيسي. وقد افتُرض مفهوم المجال ليدلّ على الحيّز الذي تؤثر فيه الأجسام بعضها في بعض عن بعد؛ دون الحاجة إلى وجود تلامس مباشر بينها.

بذلك يمكن أن نعرّف **المجال الكهربائي Electric Field** بأنه خاصّية للحيّز المحيط بالجسم المشحون، يظهر فيه تأثير المجال على شكل قوى كهربائيّة تؤثّر في الأجسام المشحونة الأخرى التي تقع ضمن المجال. في هذا الدرس ستتعرف المجال الكهربائي الناشئ عن الشحنات النقطية.

المجال الكهربائيّ لشحنة نقطية
Electric Field of a Point Charge

يبيّن الشكل (14) شحنة نقطية ($+Q$) تولّد في الحيّز المحيط بها مجالًا كهربائيًّا. للكشف عن المجال الكهربائي عند نقطة قريبة من الشحنة، مثل النقطة (a)، نضع شحنة اختبار ($+q$) عند هذه النقطة. **وشحنة الاختبار Test Charge** هي شحنة كهربائيّة موجبة صغيرة المقدار مقارنة بالشحنة المولّدة للمجال. ألاحظ أنّ شحنة الاختبار ستتأثّر بقوّة كهربائيّة ($\boldsymbol{F}$)، بالاتجاه المُبيَّن على الشكل.



الشكل (14): القوّة المؤثّرة في شحنة الاختبار.

يُحسب المجال الكهربائيّ الذي تولّده الشحنة $(+Q)$ عند موقع شحنة الاختبار (q) بإيجاد ناتج قسمة مقدار القوة المؤثرةفي شحنة الاختبار على مقدار شحنة الاختبار.

ويُعرّف **المجال الكهربائيّ عند نقطة** **Electric field at point** (E) بأنّه القوّة الكهربائيّة التي تؤثّر في وحدة الشحنة الموجبة الموضوعة في تلك النقطة، ويُعبَّر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q}$$

توضّح هذه العلاقة أن المجال كمية متجهة، اتجاهه باتجاه القوّة الكهربائية المؤثّرة في شحنة الاختبار الموجبة، ويُقاس المجال بوحدة (N/C).

وبما أن مقدار القوّة الكهربائية يُعطى من قانون كولوم بالعلاقة الآتية:

$$F = k\frac{Qq}{r^2}$$

فإن المجال الكهربائي:

$$E = k\frac{Qq}{qr^2}$$

وباختصار (q) نتوصل إلى العلاقة:

$$E = k\frac{Q}{r^2}$$

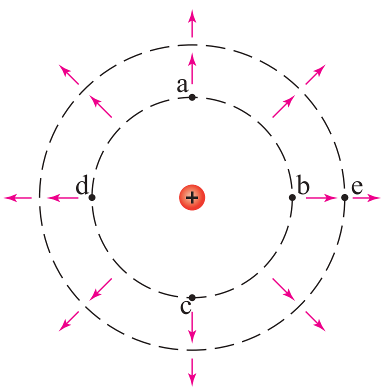
حيث (Q) الشحنة المولّدة للمجال، (r) بعد النقطة المطلوب حساب المجال عندها عن الشحنة المولّدة للمجال.

توضّح هذه العلاقة أنه يمكن حساب مقدار المجال الكهربائي عند نقطة من دون الحاجة لوضع شحنة اختبار عندها. فالمجال الكهربائي عند نقطة هو خاصّية للشحنة المولّدة للمجال، وشحنة الاختبار تُستخدَم فقط للكشف عن المجال الذي كان موجودًا قبل وضعها، وسيبقى ثابتًا بعد إزالتها.

كما يتّضح من المعادلة أن المجال الكهربائي عند نقطة والناشئ عن شحنة نقطية موضوعة في الهواء يتناسب طرديًّا مع مقدار الشحنة وعكسيًّا مع مربع بُعد النقطة عن الشحنة. ويعد مجال الشحنة النقطية مجالًا غير منتظم؛ أي غير ثابت في المقدار والاتجاه، كما يبين الشكل (15).

أتحقّق: أُوضّح المقصود بكل من: المجال الكهربائيّ، المجال الكهربائيّ عند نقطة.

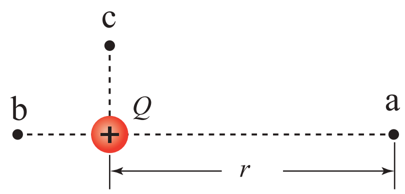
أفكّر: أفسر ما يأتي: يجب أن يكون مقدار شحنة الاختبار صغيرًا مقارنة بالشحنة المولدة.



الشكل (15): يكون المجال متساويا عند النقاط (a,b,c,d)، إلا أن أتجاه المجال عند كل منها مختلف. ويكون اتجاه المجال نفسه عند النقطتين (b,e)، إلا أن مقدار المجال عند النقطة (b) أكبر منه عند (e).

المثال 5

شحنة كهربائيّة نقطية موجبة موضوعة في الهواء مقدارها $(5\ \mu C)$.
أُحدّد اتّجاه المجال عند النقاط (a,b,c)، ثمّ أجد مقدار المجال الكهربائيّ عند النقطة (a) التي تبعد عن الشحنة مسافة 36 cm والمبيّنة في الشكل (16/ أ).



الشكل (16/ أ): المجال عند نقطة.

المعطيات:

$Q = 5\ \mu C = 5 \times 10^{-6}\ C,\ \ r = 36\ cm = 36 \times 10^{-2}\ m$

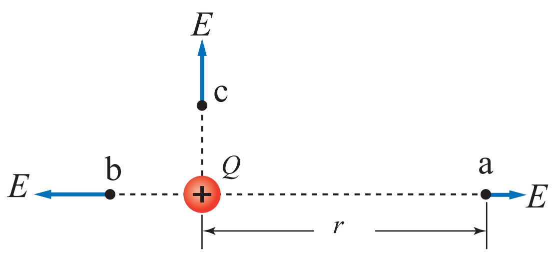
المطلوب:

اتّجاه المجال عند (a,b,c)

$E_a = ?$

الحلّ:

لتحديد اتّجاه المجال عند كل نقطة من (a,b,c) أفترض وجود شحنة اختبار موجبة عند كُلٍّ منها، وأحدّد اتجاه القوّة المؤثّرة في كلّ شحنة اختبار، ويكون اتجاه المجال في اتجاه القوّة نفسه.



الشكل (16/ ب): اتّجاه المجال حول شحنة.

وبذلك فإن اتّجاه المجال عند (a) يكون باتّجاه محور $(+x)$، وعند النقطة (b) يكون باتّجاه محور $(-x)$، وعند النقطة (c)، يكون باتّجاه محور $(+y)$، كما في الشكل(16/ ب).

ولمعرفة مقدار المجال؛ أستعملُ العلاقة الآتية:

$$E = k\ \frac{Q}{r^2}$$

$$E = 9 \times 10^9 \times \frac{5 \times 10^{-6}}{(36)^2 \times 10^{-4}}$$

$$E_a = 3.47 \times 10^5\ N/C$$

تمرين

أستخدم الأرقام: في المثال السابق؛ أجد مقدار القوّة الكهربائيّة التي يؤثّر بها المجال الكهربائيّ في شحنة مقدارها (-3 nC) موضوعة عند النقطة (a)، ثمّ أُحدّد اتّجاه هذه القوّة.

المجال الكهربائيّ لعدّة شحنات نقطية

Electric Field of Several Point Charges

عند وضع عدد من الشحنات الكهربائيّة المتشابهة أو المختلفة في منطقة واحدة بتوزيع معيّن، تنشأ حول كلّ منها منطقة مجال كهربائيّ، بحيث يكون المجال الكهربائيّ المحصّل عند أيّ نقطة في هذه المنطقة مساويًا لمحصّلة المجالات الناتجة عن كل شحنة إذا كانت منفردة، كما يتضح في الأمثلة الآتية. وستقتصر دراستنا للشحنات المُوزَّعة في مستوى ثنائي الأبعاد فقط.

أبحثُ

دفع الاهتمام بالأطعمة الصحية والطازجة الباحثين لابتكار طرق حفظ متقدمة، منها: المعالجة بالمجال الكهربائي النبضي Pulsed Electric Field (PEF). يعد استخدام هذه التقنية مفيدًا في تعقيم المواد الغذائية، إذ يعمل المجال الكهربائي على تدمير الكائنات الحية الدقيقة المسببة للأمراض، عن طريق إحداث ثقوب في أغشية خلاياها. أبحث عن هذه التقنية واستخداماتها، وأعد عرضًا تقديميًّا أعرضه أمام زملائي/ زميلاتي.

المثال 6

يوضّح الشكل (17/ أ) شحنتين موجبتين نقطيتين (Q_1, Q_2)، موضوعتين في الهواء وتفصلهما مسافة (40 cm). أحسب المجال الكهربائي المحصل عند نقطة (a) تقع على الخط الواصل بينهما وتبعد عن الشحنة (Q_2) مسافة (10 cm)، وأحدّد اتجاه المجال.

الشكل (17/ أ) المجال الكهربائي عند نقطة بين شحنتين.

المعطيات:

$$Q_1 = 6 \times 10^{-6}\ \text{C},\ Q_2 = 2 \times 10^{-6}\ \text{C},\ r = 40\ \text{cm},\ r_2 = 10\ \text{cm}$$

المطلوب:

$$\boldsymbol{E} = ?$$

الحل:

$$r_1 = r - r_2 = 40 - 10 = 30\ \text{cm}$$

مقدار المجال الناتج عن الشحنة (Q_1) عند النقطة (a):

$$E_1 = k\frac{Q_1}{r_1^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-6}}{(30 \times 10^{-2})^2}$$

$E_1 = 6 \times 10^5$ N/C (باتجاه محور $(-x)$)

ومقدار المجال الناتج عن الشحنة (Q_2) عند النقطة (a):

$$E_2 = k\frac{Q_2}{r_2^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-6}}{(10 \times 10^{-2})^2}$$

$E_2 = 18 \times 10^5$ N/C   (باتجاه محور ($+x$))

ألاحظ أن الزاوية بين متجهي المجالين (180°) فيكون مقدار المجال المحصل عند النقطة (a) مساويًا للفرق بين المجالين وباتجاه المجال الأكبر، كما يبين الشكل (17/ ب):

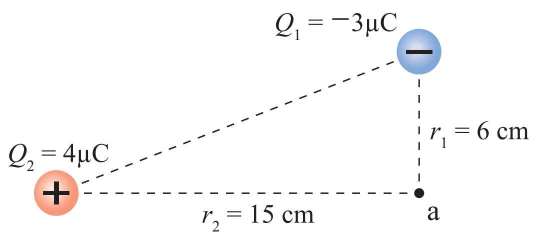
$$E = E_2 - E_1 = 18 \times 10^5 - 6 \times 10^5 = 12 \times 10^5 \text{ N/C}$$

اتجاه المجال الكهربائي باتجاه محور ($+x$).

الشكل (17/ ب): المجال الكهربائي المحصل عند نقطة.

المثال 7

يوضّح الشكل (18) شحنتين نقطيتين في الهواء، الأولى سالبة والثانية موجبة. أستعين بالشكل؛ وأجد المجال الكهربائيّ المحصّل عند النقطة (a) وأُحدّد اتّجاهه.



الشكل (18): نقطة قُرب شحنتين نقطيتين.

المعطيات:

$Q_1 = -3\ \mu C = -3 \times 10^{-6}$ C, $Q_2 = 4\ \mu C = 4 \times 10^{-6}$ C

$r_1 = 6$ cm $= 6 \times 10^{-2}$ m , $r_2 = 15$ cm $= 15 \times 10^{-2}$ m

المطلوب:

$\boldsymbol{E} = ?$

الحلّ:

مقدار المجال الناتج عن الشحنة (Q_1) عند النقطة (a):

$$E_1 = k\frac{Q_1}{r_1^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-6}}{(6 \times 10^{-2})^2}$$

$E_1 = 7.5 \times 10^6$ N/C

تُستعمل إشارة الشحنة في تحديد اتّجاه المجال وليس حساب مقداره؛ لذا فإنّ المجال الناتج عن الشحنة الأولى يكون باتّجاه محور ($+y$).

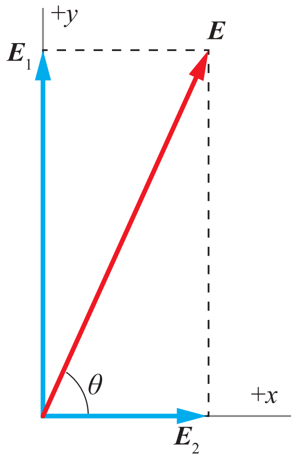
ومقدار المجال الناتج عن الشحنة (Q_2) عند النقطة (a):

$$E_2 = k\frac{Q_2}{r_2^{\,2}} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{15^2 \times 10^{-4}}$$

$$E_2 = 1.6 \times 10^6 \text{ N/C}$$

اتّجاه المجال الناتج عن الشحنة الثانية يكون باتّجاه محور ($+x$).

أُلاحظ أنّ الزاوية بين متّجهي المجالين ($90°$)، كما في الشكل (19)، فيحسب المجال المحصل باستعمال العلاقة:



الشكل (19): اتّجاه المجال المحصّل.

$$E = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2}$$

$$E = \sqrt{(7.5 \times 10^6)^2 + (1.6 \times 10^6)^2} = \sqrt{56.25 \times 10^{12} + 2.56 \times 10^{12}}$$

$$E = 7.67 \times 10^6 \text{ N/C}$$

ويُحدّد اتّجاه المجال المحصّل بالزاوية المرجعية (θ) حيث:

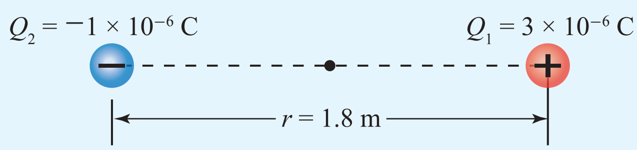
$$\tan\theta = \frac{7.5 \times 10^6}{1.6 \times 10^6} = 4.69$$

$$\theta = \tan^{-1}(4.88) = 78°$$

$$\boldsymbol{E} = 7.67 \times 10^6 \text{ N/C}, 78°$$

تمرين

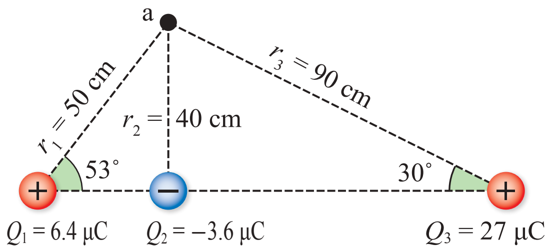
أستخدم الأرقام: يوضّح الشكل (20) شحنتين نقطيتين في الهواء: الأولى موجبة والثانية سالبة، تفصلهما مسافة (1.8 m). أستعين بالشكل؛ وأجد المجال الكهربائيّ المحصّل عند نقطة تنصّف المسافة بين الشحنتين.



الشكل (20): شحنتان نقطيتان في الهواء.

المثال 8

ثلاث شحنات كهربائية، موزَّعة في الهواء، مقاديرها كما هو مثبت في الشكل (21). أحسب مقدار المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (a) وأحدّد اتجاهه.



الشكل (21): ثلاث شحنات نقطية.

المعطيات: $Q_1 = 6.4 \times 10^{-6}$ C, $Q_2 = -3.6 \times 10^{-6}$ C, $Q_3 = 27 \times 10^{-6}$ C

المطلوب: $E = ?$

الحل:

مقدار المجال الناتج عن الشحنة (Q_1) عند النقطة (a):

$$E_1 = k\frac{Q_1}{r_1^{\,2}} = 9 \times 10^9 \times \frac{6.4 \times 10^{-6}}{(0.5)^2}$$

$$E_1 = 2.3 \times 10^5 \text{ N/C}$$

مقدار المجال الناتج عن الشحنة (Q_2) عند النقطة (a):

$$E_2 = \text{k}\frac{Q_1}{r_1^{\,2}} = 9 \times 10^9 \times \frac{3.6 \times 10^{-6}}{(0.4)^2}$$

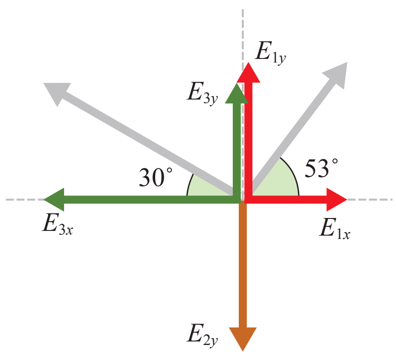
$$E_2 = 2.0 \times 10^5 \text{ N/C}$$

مقدار المجال الناتج عن الشحنة (Q_3) عند النقطة (a):

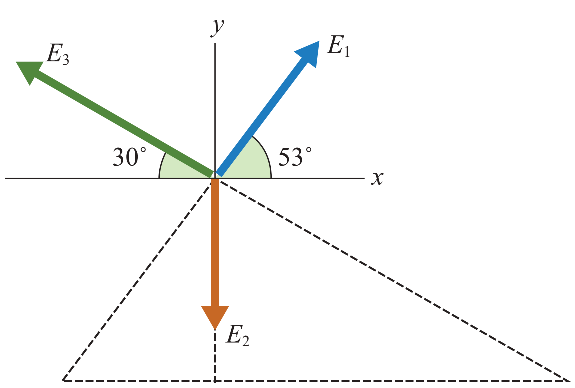
$$E_3 = \text{k}\frac{Q_1}{r_1^{\,2}} = 9 \times 10^9 \times \frac{27 \times 10^{-6}}{(0.9)^2}$$

$$E_3 = 3.0 \times 10^5 \text{ N/C}$$

بمراعاة أنواع الشحنات ومواقعها نجد أن اتجاهات المجالات الكهربائية الثلاث تكون كما في الشكل (22/ أ)، ثم نحلّل كل مجال إلى مركّبتين؛ على محور (x) وعلى محور (y)، كما في الشكل (22/ ب).



(ب) تحليل المتجهات.



(أ) متجهات المجال.

الشكل (22): تحليل متجهات المجالات الكهربائية الثلاثة.

تحليل كل مجال إلى مركّبتين:

$E_{1x} = E_1 \cos 53° = 2.3 \times 10^5 \times 0.6 = 1.38 \times 10^5$ N/C

$E_{1y} = E_1 \sin 53° = 2.3 \times 10^5 \times 0.8 = 1.84 \times 10^5$ N/C

$E_{2x} = E_1 \cos 90° = 2.0 \times 10^5 \times 0 = 0$

$E_{2y} = E_1 \sin 90° = 2.0 \times 10^5 \times 1 = 2.0 \times 10^5$ N/C

$E_{3x} = E_1 \cos 30° = 3.0 \times 10^5 \times 0.87 = 2.61 \times 105$ N/C

$E_{3y} = E_1 \sin 30° = 3.0 \times 10^5 \times 0.5 = 1.5 \times 10^5$ N/C

المحصلة الأفقية للمجال:

$E_x = E_{1x} - E_{3x} = 1.38 \times 10^5 - 2.61 \times 10^5 = -1.23 \times 10^5$ N/C

المحصلة العمودية للمجال:

$E_y = E_{1y} - E_{2y} + E_{3y} = 1.84 \times 10^5 - 2.0 \times 10^5 + 1.5 \times 10^5$

$E_y = 1.34 \times 10^5$ N/C

مقدار المجال المحصل عند النقطة (a) يساوي:

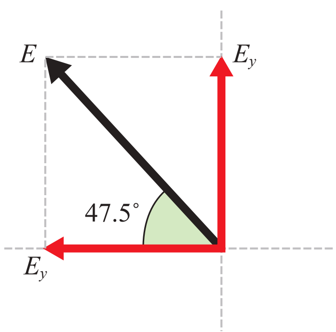
$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2} = \sqrt{(1.23 \times 10^5)^2 + (1.34 \times 10^5)^2}$$

$$E = \sqrt{3.31 \times 10^{10}} = 1.82 \times 10^5 \text{ N/C}$$

اتجاه المجال المحصل عند النقطة (a) يصنع مع محور $(-x)$ زاوية مقدارها ø حيث:

$$\tan ø = \frac{E_y}{E_x} = \frac{1.34 \times 10^5}{-1.23 \times 10^5} = -1.09$$

$$ø = 47.5°$$



الشكل (23): اتجاه المجال المحصل.

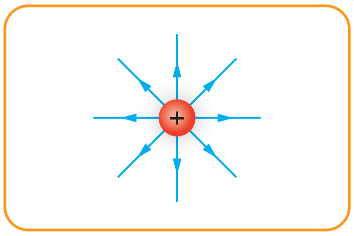
خطوط المجال الكهربائيّ Electric Field Lines

المجال الكهربائيّ كمّية فيزيائية متّجهة، وفي الأمثلة السابقة مثّلنا متّجه المجال عند نقطة بسهم اتّجاهه يُعبّر عن اتّجاه المجال عند تلك النقطة، ويتناسب طول السهم مع مقدار المجال. ويمكن تمثيل منطقة المجال الكهربائيّ الذي يُحيط بشحنة كهربائيّة مفردة أو عدد من الشحنات؛ برسم خطوط تسمى **خطوط المجال الكهربائيّ** **Electric Field Lines**، وهي تُمثّل مسارات شحنة اختبار موجبة تتحرّك تحت تأثير المجال الكهربائيّ فقط.

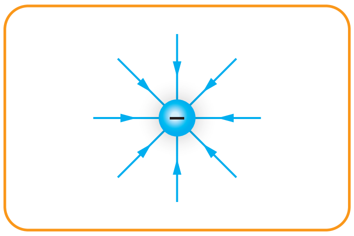
يُبيّن الشكل (24) أربعة مجالات كهربائيّة منفصلة، مُثّلت بخطوط المجال الكهربائي الناشئ عن شحنات نقطية. ومن الشكل أستنتج الخصائص الآتية لخطوط المجال الكهربائي:

- تدلّ كثافة خطوط المجال الكهربائيّ في منطقة ما على مقدار المجال الكهربائيّ، ويُقصد **بكثافة خطوط المجال الكهربائيّ** **Density of Electric Field Lines** عدد الخطوط التي تخترق وحدة المساحة من سطح محدد عموديًّا عليه؛ أي إنّ مقدار المجال الكهربائيّ يزداد حيثما تتزاحم خطوط المجال.
- تبدأ خطوط المجال من الشحنة الموجبة وتنتهي إلى الشحنة السالبة؛ لأنّها تُمثّل مسار حركة شحنة الاختبار الموجبة داخل المجال، بسبب تنافرها مع الشحنة الموجبة وتجاذبها مع الشحنة السالبة.
- تكون خطوط المجال الكهربائيّ مستقيمة أو منحنية لكنّها لا تتقاطع، إذ لو تقاطع خطّان لأصبح للمجال أكثر من اتّجاه عند نقطة التقاطع، وهذا يتعارض مع مفهوم المجال عند نقطة.
- يكون اتجاه المجال الكهربائي عند أي نقطة باتجاه المماس لخط المجال عند تلك النقطة.

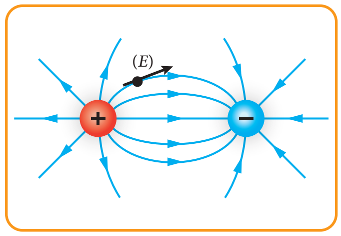
✓ **أتحقّق**: بناءً على الشكل (24)؛ أرسمُ خطوط المجال الكهربائيّ لشحنتين نقطيتين سالبتين ومتجاورتين.



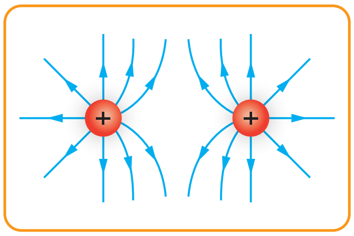
(أ): شحنة نقطية موجبة.



(ب): شحنة نقطية سالبة.



(جـ): شحنتان نقطيتان متساويتان إحداهما موجبة والثانية سالبة.

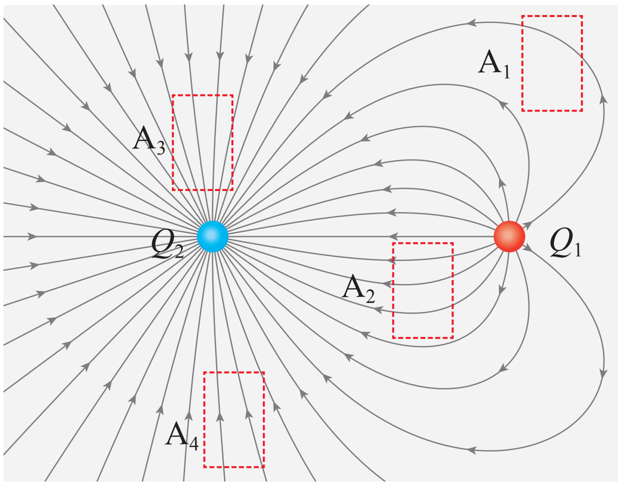


(د): شحنتان نقطيتان موجبتان ومتساويتان.

الشكل (24): أنماط المجالات الكهربائيّة حول عدد من الشحنات النقطيّة.

تُسمّى النقطة التي يكون فيها مقدار المجال المحصّل مساويًا للصفر نقطة انعدام المجال. أيّ من الأشكال (أ، ب، جـ، د) تحتوي على نقطة انعدام للمجال؟ وأين توجد داخل الشكل؟

المثال 9



الشكل (25) خطوط المجال الكهربائي لشحنتين. متجاورتين.

يبيّن الشكل (25) خطوط المجال الكهربائي الناشئ عن شحنتين نقطيتين متجاورتين موضوعتين في الهواء. اعتمادًا على الشكل، وإذا علمت أن الرموز (A_1, A_2, A_3, A_4) تدل على أربع مناطق متساوية في المساحة تقع ضمن المجال، فأجيب عن السؤالين الآتيين:

أ . أرتّب المناطق الأربعة $(A_1 - A_4)$ تصاعديًّا حسب مقدار المجال في كل منطقة. أوضّح السبب.

ب. أحدد نوع كل شحنة، وأحدد أي الشحنتين أكبر مقدارًا. أفسر إجابتي.

المعطيات: الشكل والبيانات عليه.

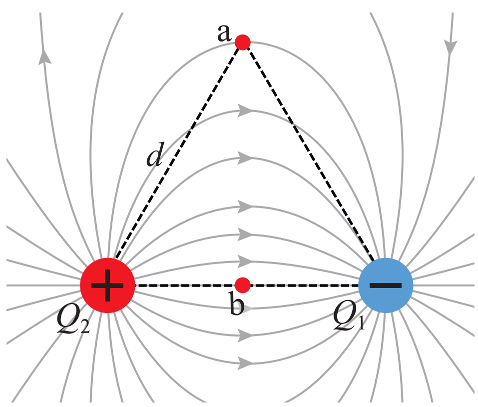
المطلوب: ترتيب المناطق حسب مقدار المجال الكهربائي، وتمييز أي الشحنتين أكبر.

الحل:

أ . حسب خصائص خطوط المجال الكهربائي ، فإن مقدار المجال يزداد حيثما تتزاحم خطوطه، فالمنطقة (A_1) يخترقها خط واحد، ثم المنطقة (A_4) يخترقها خطان، ثم المنطقة (A_2) يخترقها ثلاثة خطوط. وأخيرًا المنطقة (A_3) يخترقها خمسة خطوط. فيكون الترتيب التصاعدي: $(A_1 < A_4 < A_2 < A_3)$.

ب. الشحنة (Q_2) سالبة، وأكبر مقدارًا من الشحنة الموجبة (Q_1)؛ لأن عدد خطوط المجال التي تدخل في الشحنة (Q_2) أكثر من تلك التي تخرج من الشحنة (Q_1)، كما أن الخطوط أكثر تزاحمًا بالقرب من (Q_2).

المثال 10



الشكل (26/ أ) شحنتان على قاعدة مثلث متساوي الأضلاع.

النقطة (a) والشحنتان المتساويتان في المقدار (Q_1) سالبة و (Q_2) موجبة، تشكّل معًا في الهواء مثلثًا متساوي الأضلاع طول ضلعه (d)، كما في الشكل(26/ أ). إذا كانت النقطة (b) تنصّف المسافة بين الشحنتين، فأجد نسبة مقدار المجال عند (b) إلى مقداره عند (a).

المعطيات: الشكل والبيانات عليه.

المطلوب: إيجاد نسبة (E_b) إلى (E_a).

الحل:

أولًا: المجال الكهربائي عند النقطة (b) التي تبعد عن كل شحنة مسافة $\frac{d}{2}$:

الشحنتان المولدتان للمجال متساويتان $Q_1 = Q_2 = Q$، وبعد النقطة عن كل منهما $\frac{d}{2}$، فيكون المجالان الناشئان عنهما متساويين، ومقدار كل منهما:

$$E = k\frac{Q}{r^2}$$

$$E_{b1} = E_{b2} = k\frac{Q}{\left(\frac{d}{2}\right)^2} = 4k\frac{Q}{d^2}$$

وبما أن المجالين بالاتجاه نفسه، فإن المجال المحصل:

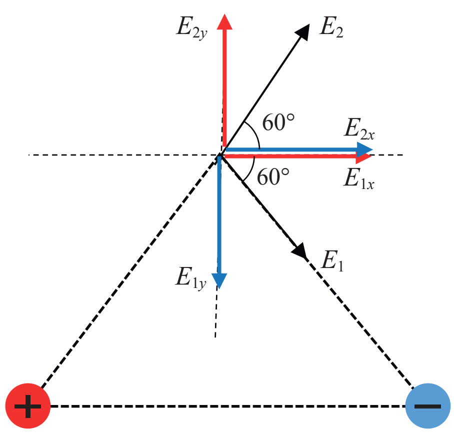
$$E_b = E_{b1} + E_{b2} = 4k\frac{Q}{d^2} + 4k\frac{Q}{d^2} = 8k\frac{Q}{d^2}$$

ثانيًا: المجال الكهربائي عند النقطة (a) التي تبعد عن كل شحنة مسافة (d):

المجالان الناشئان عن الشحنتين متساويان ومقدار كل منهما:

$$E_{a1} = E_{a2} = k\frac{Q}{d^2}$$

لإيجاد المجال المحصل، نحدد اتجاهي المجالين ونحلل كلًّا منهما إلى مركبتيه، كما يبين الشكل (26/ ب).



الشكل (26/ ب) شحنتان على قاعدة مثلث متساوي الأضلاع.

المركبتان (E_{1y}) و (E_{2y}) متساويتان ومتعاكستان، أي أن:

$$E_y = E_{2y} - E_{1y} = 0$$

المركبتان (E_{1x}) و (E_{2x}) متساويتان في المقدار، ومقدار كل منهما:

$$E_{1x} = E_{2x} = k\frac{Q}{d^2}\cos 60° = \frac{1}{2}k\frac{Q}{d^2}$$

فيكون المجال المحصل عند النقطة (a):

$$E_a = E_{1x} + E_{2x} = \frac{1}{2}k\frac{Q}{d^2} + \frac{1}{2}k\frac{Q}{d^2} = k\frac{Q}{d^2}$$

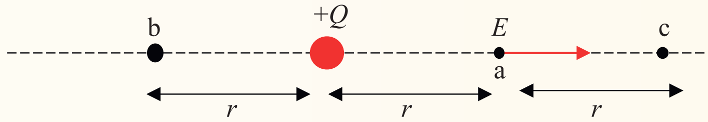
نسبة (E_b) إلى (E_a):

$$E_b = 8E_a \rightarrow \frac{E_b}{E_a} = 8$$

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضح المقصود بالمجال الكهربائي عند نقطة، وكيف يمكن الإفادة من خطوط المجال في معرفة مقدار واتجاه المجال عند نقطة؟

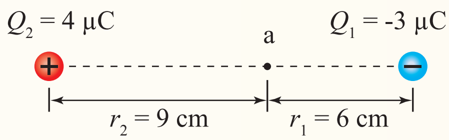
2. **التفكير الناقد:** يبين الشكل شحنة نقطية ($+Q$) موضوعة في الهواء. المجال الكهربائي الناشئ عن الشحنة عند النقطة (a) يساوي (E). أجد مقدار المجال المحصل عند النقطة (a) بدلالة (E) وأحدد اتجاهه لكل حالة مما يأتي:



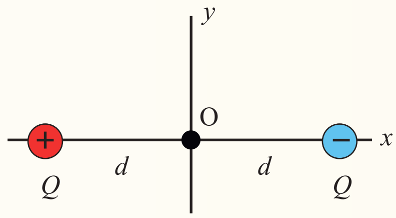
أ . إضافة شحنة ($-Q$) عند النقطة (b).

ب. إضافة شحنة ($-Q$) عند النقطة (c).

3. **أستخدم الأرقام:** يوضّح الشكل المجاور شحنتين؛ الأولى سالبة والثانية موجبة. أستعين بالشكل؛ وأجد المجال الكهربائيّ المحصّل عند النقطة a وأُحدّد اتّجاهه.



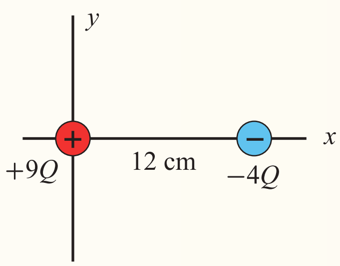
4. يبيّن الشكل شحنتين كهربائيتين متساويتين في مقدارهما؛ الأولى موجبة والثانية سالبة، تبعد كل منهما عن نقطة الأصل مسافة (d).



أ . **أقدم دليلًا** على أن اتجاه المجال عند جميع النقاط الواقعة على محور (y) بالاتجاه نفسه.

ب. **أستنتج:** أجد مقدار المجال عند النقطة (O) بدلالة (Q) و (d).

5. **التفكير الناقد:** يبيّن الشكل المجاور شحنتين كهربائيتين في الهواء؛ الموجبة عند نقطة الأصل والسالبة عند ($x = 12$ cm). أحدّد موقع نقطة على محور (x) ينعدم عندها المجال المحصل.



الدرس 3

الجهد الكهربائيّ
Electric Potential

الفكرة الرئيسة :

تختزن الشحنة الموضوعة عند نقطة في المجال الكهربائي طاقة وضع كهربائية. والجهد الكهربائي عند نقطة هو طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في وحدة الشحنات الموضوعة عند تلك النقطة.

نتاجات التعلّم :

- أُعرّف الجهد الكهربائيّ بالكلمات وبمعادلة.
- أحسب الجهد الكهربائي عند نقطة في المجال الكهربائي لشحنة نقطية أو لمجموعة شحنات نقطية.
- أربط بعلاقة رياضية بين التغير في طاقة الوضع الكهربائية والشغل الذي يبذله المجال الكهربائي في تحريك شحنة من نقطة إلى أخرى داخله.

المفاهيم والمصطلحات :

الجهد الكهربائيّ Electric Potential

فرق الجهد الكهربائيّ Electric Potential Difference

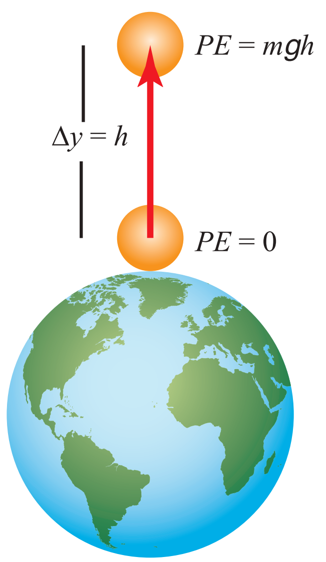
طاقة الوضع الكهربائيّة Electric Potential Energy

طاقة الوضع الكهربائية والجهد الكهربائي
Electric Potential Energy and Electric Potenial

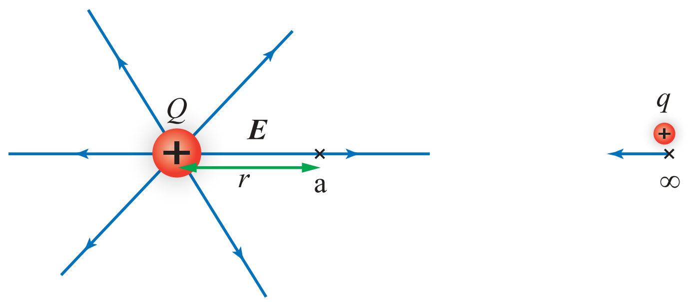
تعلمتُ أن طاقة الوضع هي طاقة مختزنة في نظام يتكون من جسمين أو أكثر، ولها أشكال مختلفة، منها طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية الأرضية. فعند التأثير على جسم بقوة خارجية، ورفعه بسرعة ثابتة عن سطح الأرض، كما يبين الشكل (27)، فإن الشغل الذي تبذله القوة الخارجية يختزن في نظام (الجسم-الأرض) على شكل طاقة وضع ناشئة عن الجاذبية الأرضية. وباعتبار أن سطح الأرض هو المستوى المرجعي الذي تكون طاقة الوضع عنده صفرًا، فإن طاقة الوضع الناشئة عن الجاذبية الأرضية تعتمد على وزن الجسم وارتفاعه عن سطح الأرض.

بطريقة مشابهة، يمكن القول إنه عند وضع شحنة اختبار (q) في مجال كهربائي فإن نظام (الشحنة-المجال الكهربائي) يختزن طاقة وضع كهربائية.

وباستخدام مفهوم طاقة الوضع الكهربائية، سنعرّف كمية قياسية ذات أهمية كبيرة في دراسة الكهرباء تسمى الجهد الكهربائي.



الشكل (27): شغل قوّة خارجية يُختزن على شكل طاقة وضع ناشئة عن الجاذبية الأرضيّة.



الشكل (28): نقل شحنة اختبار q من اللانهاية، إلى نقطة داخل المجال الكهربائيّ لشحنة نقطية Q.

الجهد الكهربائي Electric potential

يبين الشكل (28) شحنة $(+Q)$ تولد حولها مجالًا كهربائيًّا يتناقص مقداره كلما ابتعدنا عن الشحنة، بحيث يصبح صفرًا عند نقطة اللانهاية، وهي النقطة المرجعية التي اصطلح أن تكون عندها طاقة الوضع الكهربائية صفرًا. فإذا افترضنا أن شحنة اختبار $(+q)$ كانت في اللانهاية، وأثرت فيها قوة خارجية ونقلتها بسرعة ثابتة إلى نقطة مثل النقطة (a)، فإن شغل القوة الخارجية (W) يختزن في نظام (المجال الكهربائي – الشحنة q) على شكل **طاقة وضع كهربائية Electric Potential Energy**، التي يمكن تعريفها بأنها الشغل الذي تبذله قوة خارجية لنقل شحنة اختبار موجبة بسرعة ثابتة من اللانهاية إلى نقطة في المجال الكهربائي. وسنشير إليها على أنها طاقة الوضع الكهربائية (PE) للشحنة (q) الموضوعة عند نقطة ما في المجال الكهربائي.

بإيجاد ناتج قسمة (PE) على (q) نعرّف كمية فيزيائية تعرف **بالجهد الكهربائي Electric potential (V)** عند نقطة، ويعرف بأنه مقدار طاقة الوضع الكهربائية لوحدة الشحنات الموضوعة عند تلك النقطة، ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$V = \frac{PE}{q}$$

توضح هذه العلاقة أن الجهد الكهربائي كمية قياسية، ويقاس بوحدة الفولت (volt) ويرمز إليه بالرمز (V) حيث (1 V = 1 J/C).

أتحقّق: ماذا نعني بقولنا «الجهد الكهربائي عند نقطة 5 فولت»؟

المثال 11

نقلت شحنة اختبار ($q = 2 \times 10^{-6}$ C) من اللانهاية إلى نقطة في مجال كهربائي، بسرعة ثابتة تحت تأثير قوة خارجية بذلت عليها شغلا مقداره (1×10^{-5} J). أحسب:

أ . طاقة الوضع الكهربائية لهذه الشحنة الموضوعة عند النقطة.

ب . جهد النقطة.

المعطيات:

$$q = 2 \times 10^{-6}\ \text{C},\ \ W = 1 \times 10^{-5}\ \text{J}$$

المطلوب:

$$PE = ?,\ \ V = ?$$

الحل:

أ. الشغل المبذول على الشحنة يختزن فيها على شكل طاقة:

$$PE = W = 1 \times 10^{-5}\ \text{J}$$

ب . الجهد عند نقطة يحسب من العلاقة:

$$V = \frac{PE}{q} = \frac{1 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-6}} = 5\ \text{V}$$

أفكّر: في المثال (11)، عند إزالة الشحنة (q) من النقطة ووضع شحنة مقدارها ($2\,q$) عند النقطة نفسها. فما أثر ذلك في كل من: جهد النقطة، وطاقة الوضع الكهربائية للشحنة؟ أبرر إجابتي.

الجهد الكهربائي الناشئ عن الشحنات النقطية
Electric Potential due to Point Charges

الجهد الكهربائي عند نقطة تقع في مجال شحنة نقطية، يعتمد على موقع النقطة. فإذا كانت النقطة (a) المبينة في الشكل (28) تقع على بعد (r) من الشحنة المولدة للمجال (Q)، فإن الشغل (W) الذي تبذله القوة الخارجية لنقل شحنة (q) من اللانهاية؛ حيث ($PE_i = 0$) إلى النقطة (a) يعطى بالعلاقة:

$$W = k\frac{qQ}{r}$$

حيث ($k = \frac{1}{4\pi\epsilon_\circ}$).

هذا الشغل يختزن على شكل طاقة وضع كهربائية في الشحنة،

ومن تعريف الجهد الكهربائي:

$$V = \frac{PE}{q} = \frac{W}{q}$$

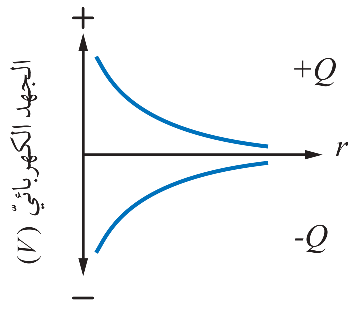
وبتعويض (W) في المعادلة، واختصار (q):

$$V = \frac{k\,\frac{q\,Q}{r}}{q}$$

فإن الجهد الكهربائي عند النقطة يعطى بالعلاقة:

$$V = k\,\frac{Q}{r}$$

تستخدم هذه العلاقة لحساب الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية، وقد تكون الشحنة المولّدة للمجال موجبة أو سالبة. ويبين الشكل (29) التمثيل البياني للعلاقة بين الجهد الكهربائي عند نقطة وبعد النقطة عن الشحنة في الحالتين؛ عندما تكون الشحنة موجبة وعندما تكون الشحنة سالبة. وتبين هذه العلاقة أن الجهد عند نقطة يعتمد على الشحنة المولدة للمجال، ولا يعتمد على الشحنة الموضوعة عند النقطة.



الشكل (29): العلاقة بين الجهد الكهربائيّ عند نقطة، وبُعد النقطة عن الشحنة.

أما إذا كانت النقطة المطلوب حساب الجهد عندها تقع في مجال عدّة شحنات نقطية $(Q_1, Q_2, Q_3, \ldots)$ وبما أنّ الجهد الكهربائيّ كمّية قياسية؛ فإنّ الجهد الكهربائيّ عند النقطة يساوي المجموع الجبري للجهود الناشئة عن تلك الشحنات عند تلك النقطة:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots$$

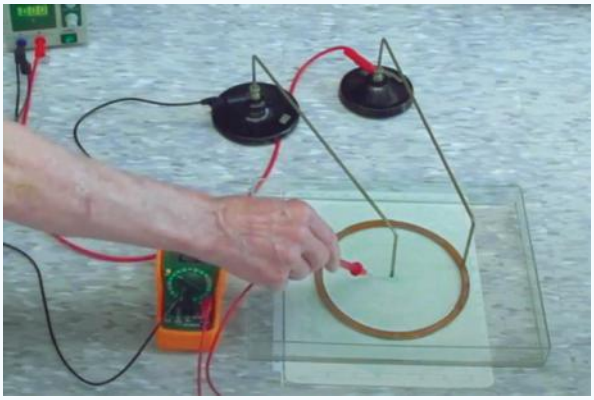
$$V = k\left(\frac{Q_1}{r_1} + \frac{Q_2}{r_2} + \frac{Q_3}{r_3} + \ldots\right)$$

أتحقّق: ما العوامل التي يعتمد عليها الجهد الكهربائيّ عند نقطة، والناشئ عن شحنة نقطية؟

التجربة ٢

استنتاج العلاقة بين الجهد بالقرب من شحنة موجبة والبعد عنها

المواد والأدوات: مصدر طاقة (DC) منخفض الجهد، فولتميتر، أسلاك توصيل، (3) لواقط فلزية، مسماران، ورقة رسم بياني، قلم، حوض بلاستيكي أو زجاجي، حلقة من سلك نحاسي يبلغ قطرها حوالي (12 cm)، محلول كهرلي منخفض التركيز (كبريتات النحاس).



إرشادات السلامة: الحذر عند التعامل مع كل من المسامير ومصدر الطاقة والمحلول.

أصوغ فرضيتي: حول العلاقة بين الجهد الكهربائي لنقطة بالقرب من شحنة نقطية وبين بُعد هذه النقطة عن الشحنة.

أختبر فرضيتي:

أنفذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

1. أرسم على الورقة دوائر متحدة المركز أنصاف أقطارها (1,2,3,4,5,6 cm)، أضعها على الطاولة وأضع فوقها الحوض.
2. أضع الحلقة النحاسية في أسفل الحوض، بحيث تنطبق على إحدى الدوائر المرسومة على الورقة، وأثبت فوق مركز الورقة أحد المسمارين، كما في الشكل. ثم أسكب المحلول في الحوض حتى ارتفاع (1 cm) تقريبًا.
3. أصل القطب الموجب لمصدر الطاقة بالمسمار المثبت في المركز، وأصل القطب السالب بالحلقة النحاسية، ثم أصل أحد طرفي الفولتميتر بالحلقة النحاسية وطرفه الثاني بمسمار متحرك أستخدمه مجسًّا للجهد.
4. **أقيس:** أضبط مصدر الطاقة على جهد مستمر (10 V)، ثم أشغله، وأضع المجس على نقطة في محيط الدائرة الأولى (الصغرى)، ثم أدون قراءة الفولتميتر ونصف قطر الدائرة الأولى (الصغرى) في جدول خاص، وأكرر ذلك على نقطتين أخريين بنفس المحيط.
5. **أضبط المتغيرات:** بتثبيت الجهد وتغيير المسافة، أكرر الخطوة (4) بالنسبة للدوائر جميعها المرسومة على الورقة، وأدون قراءات الفولتميتر ونصف قطر الدائرة في الجدول.
6. **أستخدم الأرقام:** أحسب متوسطات الجهد لكل دائرة، وأرسم العلاقة البيانية بين الجهد على محور (y) والمسافة على محور (x).

التحليل والاستنتاج:

1. **أفسر:** لماذا وضعت في الحوض محلول كبريتات النحاس وليس الماء؟
2. **أستنتج** العلاقة بين الجهد الكهربائي والبعد عن الشحنة النقطية الموجبة (القطب الموجب).
3. **أصدر حكمًا** عما إذا كانت النتائج قد توافقت مع فرضيتي أم لا.

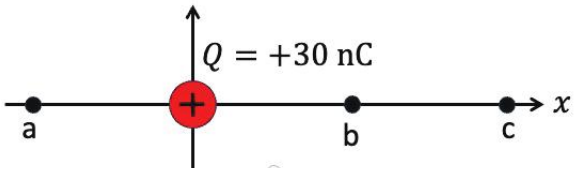
المثال 12

شحنة كهربائية في الهواء مقدارها (30 nC) موضوعة عند نقطة الأصل على محور (x) . أحسب الجهد الكهربائي على المحور، عند كل من المواقع (a, b, c) المبيّنة في الشكل (30)، حيث:

$(x_a = -50\ cm)$

$(x_b = 50\ cm)$

$(x_c = 1\ m)$



الشكل (30): الجهد الكهربائي بالقرب من شحنة نقطية.

المعطيات:

$$Q = 30 \times 10^{-9}\ C,\ \ r_a = 0.5\ m,\ \ r_b = 0.5\ m,\ \ r_c = 1\ m$$

المطلوب:

$$V_a = ?,\ \ V_b = ?,\ \ V_c = ?$$

الحل:

$$V_a = k\frac{Q}{r_a} = 9 \times 10^9 \times \frac{30 \times 10^{-9}}{0.5} = 540\ V$$

$$V_b = k\frac{Q}{r_b} = 9 \times 10^9 \times \frac{30 \times 10^{-9}}{0.5} = 540\ V$$

$$V_c = k\frac{Q}{r_c} = 9 \times 10^9 \times \frac{30 \times 10^{-9}}{1} = 270\ V$$

نستنتج أن الجهد الكهربائي يتساوى عند جميع النقاط التي تتساوى في بعدها عن الشحنة النقطية المولّدة للمجال. ويتناسب عكسيًّا مع بعد النقطة عن الشحنة الموجبة.

تمرين

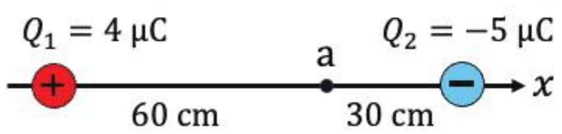
أستخدم الأرقام: شحنة كهربائيّة موضوعة في الهواء، والجهد الكهربائيّ الناشئ عنها عند نقطة تبعد مسافة (0.08 m) عن تلك الشحنة يساوي $(-4.5 \times 10^3\ V)$. أجيب عمّا يأتي:

أ . ما نوع الشحنة الكهربائيّة المولدة للمجال؟ وما مقدارها؟

ب. هل يقل الجهد أم يزداد بزيادة البعد عن الشحنة؟

المثال 13

يوضّح الشكل (31) شحنتين نقطيتين مختلفتين (Q_1, Q_2) في الهواء تفصلهما مسافة (90 cm). أحسب الجهد الكهربائي الكلي عند النقطة (a) المبينة في الشكل.



الشكل (31): الجهد الكهربائي عند نقطة بين شحنتين مختلفتين.

المعطيات: $Q_1 = 4 \times 10^{-6}$ C, $Q_2 = -5 \times 10^{-6}$ C, $r_1 = 0.6$ m, $r_2 = 0.3$ m

المطلوب: $V_a = ?$

الحل:

الجهد الناتج عن الشحنة (Q_1) عند النقطة (a):

$$V_1 = k\frac{Q_1}{r_1} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{0.6}$$

$$V_1 = 6 \times 10^4 \text{ V}$$

الجهد الناتج عن الشحنة (Q_2) عند النقطة (a):

$$V_2 = k\frac{Q_2}{r_2} = 9 \times 10^9 \times \frac{-5 \times 10^{-6}}{0.3}$$

$$V_2 = -15 \times 10^4 \text{ V}$$

الجهد الكلي عند النقطة (a) يساوي المجموع الجبري للجهدين:

$$V = V_1 + V_2 = 6 \times 10^4 + (-15 \times 10^4) = -9 \times 10^4 \text{ V}$$

الربط بالعلوم الحياتية

أسماك صاعقة تُنتج جهدًا كهربائيًّا يصل إلى 860 V

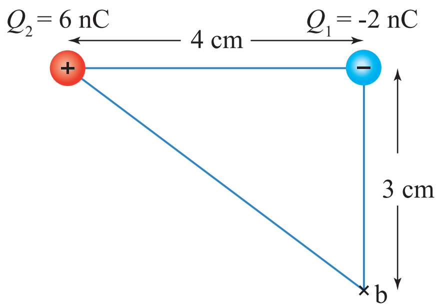
الأنقليس Eels نوع من الأسماك يعيش في حوض الأمازون، عند ملامسة السطح السفلي لرأس السمكة جسم الفريسة؛ فإنّه يتفاعل معها ويُنتج فرق جهد كهربائيّ يصل عند بعض الأنواع إلى 860 V على شكل صعقة كهربائيّة تُصيب الجهاز العصبي للفريسة بالشلل المؤقت، وهذه الميزة تستعملها تلك الأسماك وسيلة دفاع عن نفسها أيضًا.

المثال 14

شحنتان موضوعتان في الهواء كما في الشكل (32). بناءً على البيانات المُبيّنة في الشكل، أحسبُ الجهد الكهربائيّ:

أ . عند النقطة (b).

ب . عند موقع الشحنة الأولى (الناشئ عن الشحنة الثانية).



الشكل (32): الجهد الكهربائيّ الناشئ عن شحنتين نقطيتين.

المعطيات: البيانات على الشكل.

المطلوب: $V_b = ?,\ V_1 = ?$

الحلّ:

أ. جهد النقطة (b) الناشيء عن الشحنتين:

$$V_b = V_{b1} + V_{b2}$$

$$V_b = k\left(\frac{Q_1}{r_{b1}} + \frac{Q_2}{r_{b2}}\right) = 9 \times 10^9 \left(\frac{-2 \times 10^{-9}}{3 \times 10^{-2}} + \frac{6 \times 10^{-9}}{5 \times 10^{-2}}\right) = 4.8 \times 10^2 \text{ V}$$

ب . الجهد عند موقع الشحنة الأولى (الناشئ عن الشحنة الثانية):

$$V_1 = k\frac{Q_2}{r_2} = 9 \times 10^9 \frac{6 \times 10^{-9}}{4 \times 10^{-2}} = 1.35 \times 10^3 \text{ V}$$

فرق الجهد الكهربائي Electric Potential Difference

الجهد الكهربائي عند نقطة لا يعتمد على الشحنة الموضوعة عند النقطة. فإذا افترضنا أن مقدار الجهد (V) عند نقطة كان معلومًا، ووضعنا عند النقطة شحنة (q)، فإن طاقة الوضع المختزنة في الشحنة الموضوعة عند تلك النقطة تحسب من العلاقة:

$$PE = qV$$

فإذا انتقلنا من نقطة ابتدائية (i) إلى نقطة نهائية (f) في مجال كهربائي، فإن فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين يرمز إليه (ΔV)، حيث:

$$\Delta V = V_f - V_i$$

وبذلك فإن التغير في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة (q) عند انتقالها بين النقطتين يعطى بالعلاقة:

$$\Delta PE = \Delta Vq = (V_f - V_i)q$$

يمكن أن يكون التغير في طاقة الوضع موجبًا أو سالبًا، حسب إشارة (q) و (ΔV). كما يمكن أن يساوي التغير في طاقة الوضع صفرًا، عند نقل الشحنة بين نقطتين متساويتين في الجهد.

ومن ثم، فإن فرق **الجهد الكهربائي** **Electric Potential Difference** بين نقطتين يساوي التغير في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة (q) عند انتقالها من نقطة إلى أخرى مقسومًا على تلك الشحنة.

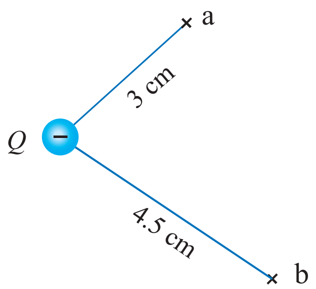
أُفكّر: في المثال (15)، هل يكون التغير في طاقة الوضع الكهربائية لشحنة اختبار موجبة منقولة من النقطة (b) إلى النقطة (a) موجبًا أم سالبًا؟ وما تفسير الإشارة؟

المثال 15

شحنة كهربائيّة $Q = -0.05\ \mu C$ موضوعة في الهواء كما في الشكل (33)، أحسبُ:

أ . الجهد الكهربائيّ عند كل من النقطتين (a ,b).

ب . الفرق في الجهد الكهربائيّ ($V_a - V_b$).



الشكل (33): الفرق في الجهد الكهربائيّ بين نقطتين.

المعطيات: $Q = -0.05\ \mu C,\ r_a = 3\ cm,\ r_b = 4.5\ cm$

المطلوب: $V_a = ?,\ V_b = ?\ , V_a - V_b = ?$

الحلّ:

أ. الجهد الكهربائيّ (V_a):

$$V_a = k\frac{Q}{r_a} = 9 \times 10^9 \frac{-0.05 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-2}} = -1.5 \times 10^4\ V$$

الجهد الكهربائيّ (V_b):

$$V_b = k\frac{Q}{r_b} = 9 \times 10^9 \frac{-0.05 \times 10^{-6}}{4.5 \times 10^{-2}} = -1 \times 10^4\ V$$

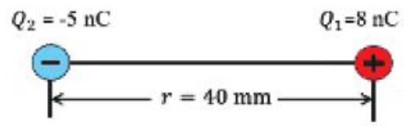
ب . الفرق في الجهد ($V_a - V_b$):

$$V_a - V_b = -1.5 \times 10^4 - (-1 \times 10^4) = -5 \times 10^3\ V$$

الإشارة السالبة في مقدار الفرق في الجهد ($V_a - V_b$) تعني أن جهد النقطة b أعلى من جهد النقطة a.

المثال 16

شحنتان موضوعتان في الهواء (Q_1, Q_2) المسافة بينهما (40 mm). ، كما في الشكل (34/ أ) أجد بُعد نقطة عن الشحنة (Q_2) تقع على الخطّ الواصل بين الشحنتين، بحيث يكون الجهد الكهربائيّ عندها يساوي صفرًا.



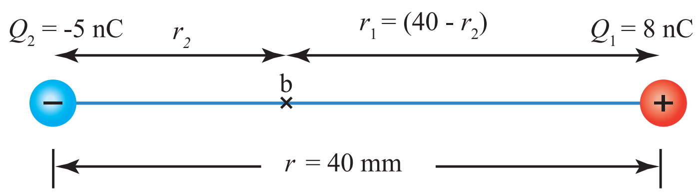
الشكل (34/ أ) شحنتات موضوعتان في الهواء.

المعطيات: $Q_1 = 8\ \text{nC},\ Q_2 = -5\ \text{nC},\ r = 40\ \text{mm},\ V_b = 0.$

المطلوب: $r_2 = ?$

الحلّ:

أفترضُ نقطة مثل b تقع على بعد r_2 من الشحنة الثانية، وعلى بعد r_1 من الشحنة الأولى كما هو مُبيّن في الشكل (34/ ب)، والجهد الكهربائيّ عندها يساوي صفرًا. ومن ثمّ:



الشكل (34/ ب): جهد النقطة b يساوي صفرًا.

$$V_b = V_1 + V_2$$

$$0 = V_1 + V_2 \Rightarrow V_1 = -V_2$$

$$k\frac{Q_1}{r_1} = -k\frac{Q_2}{r_2}, \quad r_1 = 40 - r_2$$

$$\frac{8}{40 - r_2} = -\frac{-5}{r_2}$$

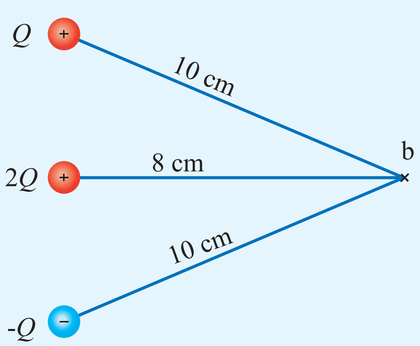
$$8\,r_2 = 5(40 - r_2) \Rightarrow 13\,r_2 = 200 \Rightarrow r_2 = 15.4\ \text{mm}$$

تمرين

أستخدم الأرقام: ثلاث شحنات كهربائيّة $(Q, 2Q, -Q)$ موضوعة في الهواء كما في الشكل، إذا علمتُ أنّ الجهد الكهربائيّ الناشئ عن الشحنة Q عند النقطة b يساوي (360 V)؛ فأحسبُ:

أ. مقدار كلّ من الشحنات الكهربائيّة الثلاث.

ب. الجهد الكهربائيّ الكلي عند النقطة b.



العلاقة بين الشغل والتغيّر في طاقة الوضع الكهربائيّة
Relation between Work and Electric Potential Energy

تعلمتُ أن المجال الكهربائي يؤثر في الشحنات بقوة كهربائية، وهي قوة محافظة، ودرست سابقًا أن شغل القوة المحافظة يساوي سالب التغير في طاقة الوضع. هذا يعني أنه عند انتقال شحنة بين نقطتين في مجال كهربائي، فإن شغل القوة الكهربائية (W_E) المبذول على الشحنة يعطى بالصورة الآتية:

$$W_E = -\Delta PE = -(V_f - V_i)q$$

من المهم أن نميز بين حالتين:

- حركة الشحنة بتأثير القوة الكهربائية فقط؛ فتكون الطاقة الميكانيكية محفوظة (القوة الكهربائية قوة محافظة).
- حركة الشحنة بسرعة ثابتة؛ بتأثير قوة خارجية مساوية للقوة الكهربائية ومعاكسة لها في الاتجاه.

أُصمّم باستعمال برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح العلاقة بين الشغل المبذول بوساطة قوّة خارجية، والتغيّر في كلّ من طاقة الوضع الكهربائيّة والجهد الكهربائيّ مع أمثلة تطبيقية، ثم أُشاركه زملائي/ زميلاتي في الصف.

حفظ الطاقة الميكانيكية Conservation of Mechanical Energy

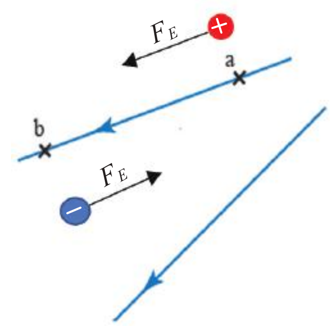
عندما تكون القوة الكهربائية هي القوة الوحيدة المؤثرة في الشحنة، فإن مجموع الطاقة الميكانيكية للنظام يكون ثابتًا، أي أنّ الطاقة الميكانيكية للنظام محفوظة، ويمكن صياغة ذلك بالعلاقة:

$$\Delta PE + \Delta KE = 0$$

أي أن النقصان في أحد شكلي الطاقة الميكانيكية يقابله زيادة مساوية في الشكل الآخر:

$$\Delta KE = -\Delta PE$$

فإذا تحركت الشحنة الكهربائية (الموجبة أو السالبة) تحت تأثير القوة الكهربائية (F_E) وباتجاهها، كما يبين الشكل (35)، فإن ذلك يؤدي إلى نقصان طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في الشحنة، مقابل زيادة مساوية في الطاقة الحركية.



الشكل (35): الشحنة الموجبة تتأثر بقوة كهربائية باتجاه المجال والشحنة السالبة تتأثر بقوة كهربائية عكس اتجاه المجال. وحركة الشحنة باتجاه القوة الكهربائية يؤدي إلى نقصان طاقة الوضع الكهربائية مقابل زيادة مساوية في الطاقة الحركية.

شغل القوة الخارجية Work by External Force

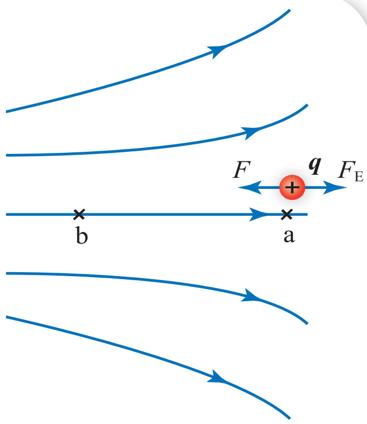
لنقل شحنة بين نقطتين في المجال الكهربائي بسرعة ثابتة، يجب التأثير فيها بقوة خارجية مساوية للقوة الكهربائية في المقدار ومعاكسة لها في الاتجاه، كما يبين الشكل (36)، وفي هذه الحالة فإن الشغل الكلي المبذول على الشحنة يساوي صفرًا؛ من مبرهنة (الشغل–الطاقة الحركية):

$$W_{\text{Total}} = \Delta KE$$

وبما أن $(\Delta KE = 0)$، فإن شغل القوة الخارجية (W) يساوي سالب شغل القوة الكهربائية، ويعطى بالعلاقة:

$$W = -W_E = \Delta PE = (V_f - V_i)q$$

أتحقّق: أصف العلاقة التي تربط بين الشغل الذي تبذله قوة خارجية وشغل القوة الكهربائية، عند نقل بروتون بسرعةٍ ثابتةٍ من نقطة إلى أخرى بعكس اتجاه المجال.



الشكل (36): عند نقل شحنة موجبة بسرعة ثابتة من النقطة (a) إلى النقطة (b) يلزم التأثير فيها بقوة خارجية مساوية في المقدار ومعاكس في الاتجاه للقوة الكهربائية.

أصف التغيرات في طاقة الوضع الكهربائية والطاقة الحركية للشحنة عند انتقالها من (a) إلى (b).

المثال 17

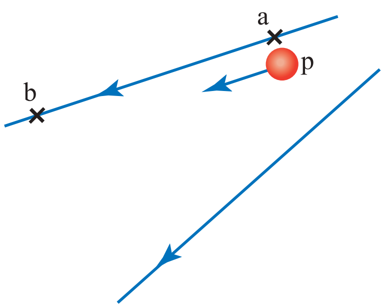
تحرّك بروتون من النقطة a إلى النقطة b باتجاه المجال الكهربائيّ كما في الشكل (37). إذا علمتُ أنّ فرق الجهد بين النقطتين $(V_b - V_a = -5\ \text{V})$ وشحنة البروتون 1.6×10^{-19} C؛ فأحسبُ:

أ. شغل القوّة الكهربائيّة المبذول لتحريك البروتون من a إلى b.

ب. التغيّر في طاقة الوضع الكهربائيّة للبروتون.

المعطيات: $q_p = 1.6 \times 10^{-19}\,\text{C},\ V_b - V_a = -5\ \text{V}$

المطلوب: $W_{E(a\to b)} = ?,\ \Delta PE = ?$



الشكل (37): حركة بروتون في مجال كهربائيّ.

الحلّ:

أ .

$$W_{E(a\to b)} = -q(V\text{b} - V\text{a}) = -(1.6 \times 10^{-19}) \times -5 = 8 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

ب .

$$W_{E(a\to b)} = -\Delta PE \Rightarrow \Delta PE = -8 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

والإشارة السالبة تعني أنّ طاقة الوضع الكهربائيّة للبروتون قلّت عند انتقاله من النقطة a إلى النقطة b.

المثال 18

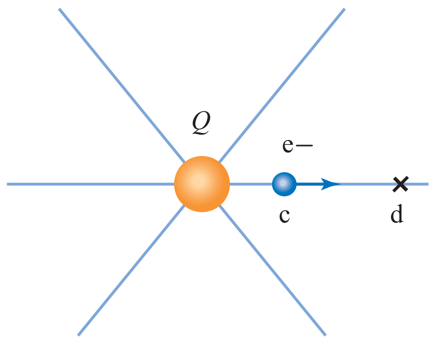
وُضِع إلكترون في حالة السكون عند النقطة c في المجال الكهربائيّ للشحنة Q؛ فتحرّك بفعل قوّة المجال الكهربائيّ إلى النقطة d كما في الشكل (38) ليخسر من طاقة وضعه الكهربائيّة 3.2×10^{-18} J إذا علمتُ أنّ شحنة الإلكترون -1.6×10^{-19} C؛ فأُجيب عمّا يأتي:

أ . أُحدّد اتّجاه خطوط المجال الكهربائيّ.

ب . أحسبُ مقدار فرق الجهد بين النقطتين.

جـ . أيّهما أكبر، جهد النقطة c أم النقطة d؟

د . أحسبُ مقدار الشغل الذي بذلتـه القوّة الكهربائيّة في تحريك الإلكترون من النقطة c إلى النقطة d.



الشكل (38): إلكترون موضوع في مجال الشحنة Q.

المعطيات: $q_e = -1.6 \times 10^{-19}$ C, $\Delta PE = -3.2 \times 10^{-18}$ J

المطلوب: $V_d - V_c = ?$, $W_{E(c \to d)} = ?$

الحلّ:

أ. بما أنّ شحنة الإلكترون سالبة؛ فإنّ حركته تكون بعكس اتّجاه المجال الكهربائيّ تحت تأثير القوّة الكهربائيّة. وبما أنّ الحركة من النقطة c إلى النقطة d بعكس اتّجاه المجال، أستنتجُ أنّ اتّجاه خطوط المجال نحو مركز الشحنة؛ ما يدلّ على أنّ الشحنة سالبة.

ب.

$$\Delta PE = q\,\Delta V$$

$$-3.2 \times 10^{-18} = -1.6 \times 10^{-19}\,(V_d - V_c)$$

$$V_d - V_c = 20 \text{ V}$$

جـ. بما أنّ $V_d - V_c = 20$ فهذا يعني أنّ V_d أكبر من V_c؛ إذ إنّ خط المجال يكون دائمًا باتّجاه تناقص الجهد.

د .

$$W_{E(c \to d)} = q\Delta V = -(-1.6 \times 10^{-19}) \times 20 = 3.2 \times 10^{-18} \text{ J}$$

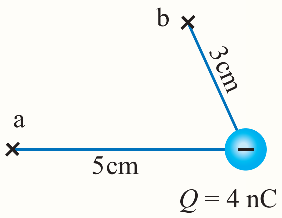
أو مباشرة من العلاقة:

$$W_{E(c \to d)} = -\Delta PE = -(-3.2 \times 10^{-18}) = 3.2 \times 10^{-18} \text{ J}$$

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة**: أُوضّح المقصود بكلّ من المفاهيم الآتية: جهد نقطة في مجال كهربائيّ، فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائيّ.

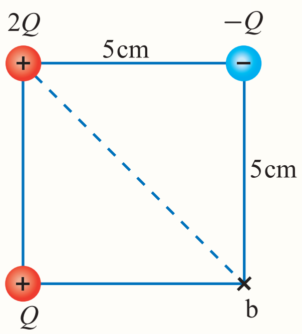
2. **التفكير الناقد**: نقطتان لهما الجهد الكهربائيّ نفسه. هل هذا يعني عدم الحاجة إلى بذل شغل لنقل شحنة من إحدى النقطتين إلى الأُخرى؟ أُوضّح إجابتي.



3. **أستخدم الأرقام**: شحنة كهربائيّة سالبة مقدارها (4 nC) موضوعة في الهواء، النقطة a تبعد عنها (5 cm) والنقطة b تبعد عنها (3 cm) كما في الشكل. أحسبُ:

أ . فرق الجهد بين النقطتين $(V_a - V_b)$.

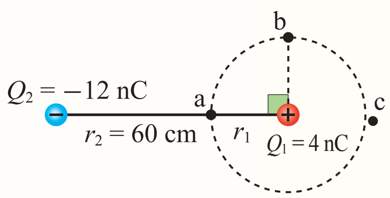
ب. الشغل الذي تبذله القوّة الكهربائيّة لنقل بروتون من النقطة a إلى النقطة b.



4. **أستخدم الأرقام**: (3) شحنات نقطية موضوعة في الهواء، وموزّعة على رؤوس مربّع طول ضلعه (5 cm) كما في الشكل. إذا علمتُ أنّ الجهد الكهربائيّ عند النقطة b يساوي (400 V)؛ فأحسبُ:

أ . مقدار الشحنة Q.

ب. التغيّر في طاقة الوضع الكهربائيّة لإلكترون عند نقله من اللانهاية إلى النقطة b.



5. **التفكير الناقد**: يبيّن الشكل المجاور شحنتين نقطيتين في الهواء، والنقاط (a, b, c) تقع جميعها على محيط دائرة مركزها الشحنة (Q_1). إذا كان جهد النقطة (a) يساوي صفرًا، فما مقدار الجهد الكهربائي عند كل من النقطتين (b) و (c)؟

6. حصلت ليان على بيانات تجريبية للجهد الكهربائي لنقطة وبُعدها عن الشحنة النقطية المولدة للمجال. اعتمادًا على البيانات، أجيب عما يأتي:

المسافة (m)	0.1	0.2	0.3	0.4
الجهد (V)	720	360	240	180

أ . **أضبط المتغيرات**: أحدّد المتغيّرات المستقلة والتابعة ثم المضبوطة.

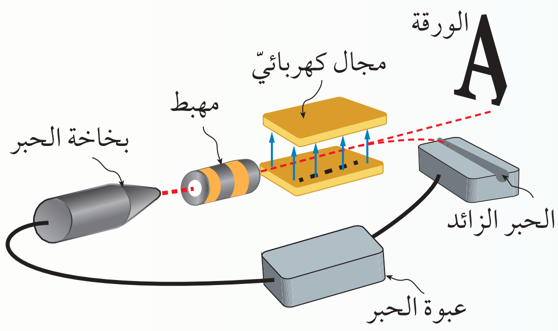
ب. أمثّل البيانات في رسم بياني مناسب.

جـ. **أستنتج** العلاقة بين الجهد الكهربائي لنقطة وبعد النقطة عن الشحنة المُولِّدة للمجال.

الإثراء والتوسّع

الطابعات النافثة للحبر Ink Jet Printers

توصل الطابعات النافثة للحبر عادة مع جهاز الحاسوب؛ لطباعة النصوص والصور الملوّنة التي تُعدّ بوساطة الجهاز، وتُنفّذ عملية الطباعة عند إعطاء أمر بذلك. تُستعمل في هذا النوع من الطابعات عبوّات حبر سائل أسود اللون وعبوّات أُخرى ملوّنة بالألوان الأساسية الثلاثة؛ (الأصفر والسيان والماغنتا).

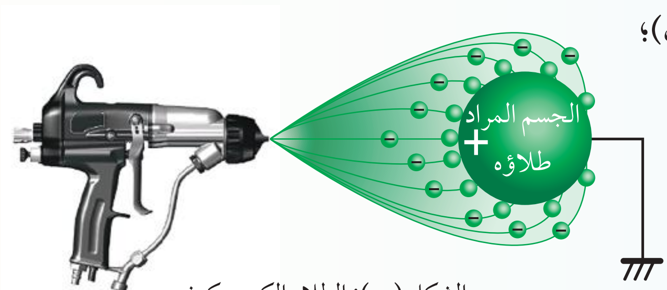


الشكل (أ): الطابعة النافثة للحبر.

تحتوي الطابعة على عبوّات الحبر السائل، وبخّاخة مزوّدة بفتحة ضيقة لخروج الحبر، ومهبط كهربائيّ لشحن قطرات الحبر بشحنة كهربائيّة سالبة، ومجال كهربائيّ منتظم، كما في الشكل (أ). تبدأ عملية الطباعة بخروج الحبر من فتحة البخّاخة على شكل قطرات صغيرة جدًّا باتّجاه المهبط الذي تمر عن طريقه فيزوّدها بشحنة كهربائيّة سالبة، ثم تعبر مجالًا كهربائيًّا. وبما أنّ قطرات الحبر مشحونة فإنّها تتأثّر بالمجال الكهربائيّ، وعن طريق التحكّم الإلكتروني بمقدار المجال واتّجاهه، فإن قطرات الحبر تُوجّه بدقّة متناهية لتُشكّل الأحرف والصور عند ملامستها الورقة.

الطلاء الكهرسكوني Electrostatic Painting

أمّا عند الطلاء الكهرسكوني المُبيّن في الشكل (ب)؛ فإنّ خروج قطرات الطلاء من المصدر يكون بفعل ضغط الهواء، وتخرج القطرات مشحونة بشحنة كهربائيّة مشابهة لشحنة المصدر، فتتنافر القطرات معه مبتعدة. وبما أنّ الجسم المراد طلاؤه يُشحن بشحنة كهربائيّة مخالفة لشحنة مصدر الطلاء؛ فإنّ قطرات الطلاء تتجاذب مع الجسم وتلتصق به، وبخاصّة في الأماكن التي يصعب الوصول إليها من دون التجاذب الكهربائيّ.



الشكل (ب): الطلاء الكهرسكوني.

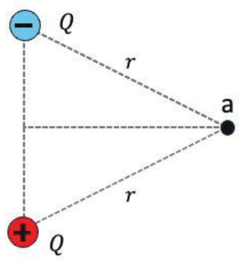
أبحثُ أستعين بمصادر المعرفة الموثوقة والمُتاحة ومنها شبكة الإنترنت، وأبحثُ عن تطبيقات أُخرى للكهرباء الساكنة، مثل تنقية عوادم المصانع من الدقائق العالقة، وآلات التصوير والنسخ، وأعد وأفراد مجموعتي تقريرًا مدعّمًا بالرسومات التوضيحية لطريقة العمل وخطواته.

مراجعة الوحدة

1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:

1. عند دلك مسطرة بلاستيكية بقطعة من القماش تصبح شحنة المسطرة:
   أ . موجبة؛ نتيجة انتقال البروتونات إليها من القماش.
   ب. سالبة؛ نتيجة انتقال الإلكترونات إليها من القماش.
   جـ. موجبة؛ نتيجة انتقال الإلكترونات منها إلى القماش.
   د . سالبة؛ نتيجة انتقال البروتونات منها إلى القماش.

2. إذا وُضعت شحنتان متساويتان مقدارًا في الهواء، كما في الشكل المجاور، فإن القوة الكهربائية المحصلة المؤثرة في إلكترون موضوع عند النقطة (a) تكون باتجاه:



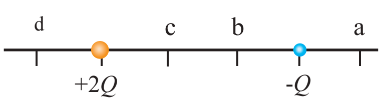
   أ . $(-x)$ ب. $(+x)$
   جـ. $(-y)$ د . $(+y)$

3. وضعت شحنة اختبار $(3\times10^{-9}\ C)$ عند نقطة فتأثرت بقوة كهربائية $(1.5 \times 10^{-5}\ N)$ باتجاه محور $(-x)$. إذا أزيلت شحنة الاختبار ووضعت في النقطة نفسها شحنة $(-8 \times 10^{-6}\ C)$ فإنها ستتأثر بقوة:
   أ . $(4 \times 10^{-2}\ N)$ باتجاه $(-x)$ ب. $(4 \times 10^{-2}\ N)$ باتجاه $(+x)$
   جـ. $(1.2 \times 10^{-2}\ N)$ باتجاه $(-x)$ د . $(1.2 \times 10^{-2}\ N)$ باتجاه $(+x)$

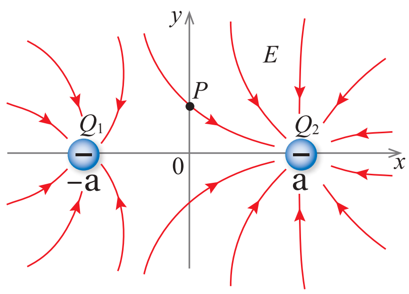
4. نقلت شحنة $(3 \times 10^{-6}\ C)$ بسرعة ثابتة من اللانهاية إلى نقطة ضمن مجال كهربائي بتأثير قوة خارجية، إذا بذلت القوة الخارجية شغلًا مقداره $(6 \times 10^{-3}\ J)$ فإن جهد النقطة بوحدة الجول يساوي:
   أ . 18×10^{-9} ب. 5×10^{-4} جـ. 6×10^{-3} د. $2 \times 10^{+3}$

5. وحدة قياس الجهد الكهربائي وفق النظام العالمي تكافئ إحدى الوحدات الآتية:
   أ . N/C ب. J.m/C
   جـ. N/C.m د. N.m/C

6. النقطة التي يمكن أن يكون الجهد عندها صفرًا على الخط الذي تقع عليه الشحنتان في الشكل، هي:
   أ . a ب. b
   جـ. c د . d

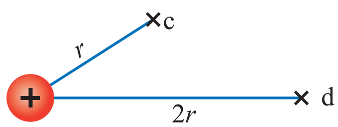


7. يوضح الشكل المجاور خطوط المجال الكهربائي لشحنتين كهربائيتين (Q_2) تقع عند (a)، و (Q_1) تقع عند (a−).
النقطة (P) تقع في المجال الكهربائي للشحنتين الإجابة الصحيحة التي تصف المركبتين الأفقية والعمودية للمجال الكهربائي المحصل عند النقطة النقطة (P) أي هي:



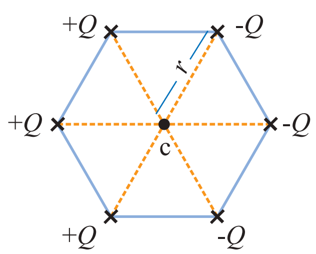
أ . $(E_x > 0)$ و $(E_y > 0)$
ب. $(E_x > 0)$ و $(E_y < 0)$
جـ. $(E_x < 0)$ و $(E_y > 0)$
د . $(E_x < 0)$ و $(E_y < 0)$

8. نسبة جهد النقطة (c) إلى جهد النقطة (d)؛ أي $\frac{V_c}{V_d}$ في الشكل المجاور تساوي:



أ. $\frac{1}{2}$ ب. $\frac{2}{1}$ جـ. $\frac{1}{4}$ د. $\frac{4}{1}$

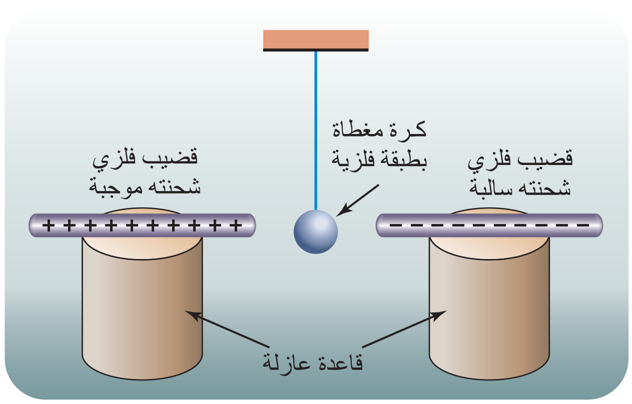
9. ست شحنات على رؤوس شكل سداسي منتظم، كما في الشكل. إذا أزيلت واحدة من الشحنات السالبة، فإن جهد النقطة (c) في مركز الشكل يساوي:



أ . $V = k\frac{5Q}{r}$ ب. $V = k\frac{-Q}{r}$
جـ. $V = k\frac{+Q}{r}$ د . $V = 0$

10. شحنتان كهربائيتان مختلفتان مقدارًا، تقعان على محور (x)، وتبعدان عن نقطة الأصل (+5 cm) و(-5 cm).
فإن خطوط المجال الكهربائي لهما تكون:
أ . متماثلة حول محور (x) ومتماثلة حول محور (y).
ب. متماثلة حول محور(x) وغير متماثلة حول محور(y).
جـ. غير متماثلة حول محور (x) ومتماثلة حول محور(y).
د . غير متماثلة حول محور (x) وغير متماثلة حول محور(y).

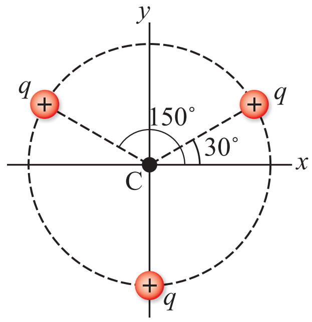
2. **أتوقع:** قضيبان فلزيان مشحونان، الأول بشحنة موجبة والثاني بشحنة سالبة، وضعا أفقيًّا على قاعدتين عازلتين كما يبين الشكل المجاور، علقت كرة صغيرة مغلفة بطبقة من مادة موصلة بين القضيبين. ماذا يحدث للكرة؟ أقدم دليلًا يدعم إجابتي.



3. **أستخدم الأرقام:** ثلاث شحنات متساوية مقدار كل منها $(5.0 \times 10^{-3}\ C)$، وزعت على محيط دائرة نصف قطرها $(2.0\ m)$ في المواقع المبينة في الشكل. أحسب:

أ . المجال الكهربائي عند مركز الدائرة (C).

ب. الجهد الكهربائي عند مركز الدائرة (C).

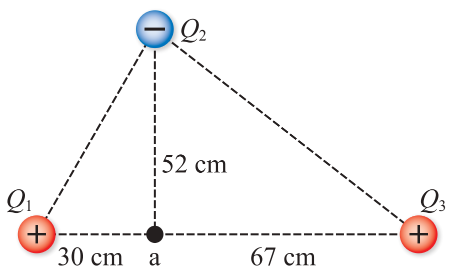


4. **أستخدم الأرقام:** شحنتان نقطيتان موجبتان (Q_1 , Q_3) مقدار كل منهما $(0.2\ \mu C)$ وشحنة سالبة (Q_2) مقدارها $(1.8\ \mu C)$، موضوعة جميعها في الهواء، كما في الشكل المجاور.

أعتمد على الشكل والبيانات عليه، وأحسبُ كلًّا من:

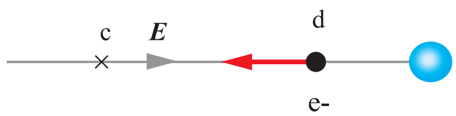
أ . المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (a) وأحدد اتجاهه.

ب. الجهد الكهربائي الكلي للنقطة (a).



5. **أستخدم الأرقام:** شحنة نقطية مقدارها $(-2\ \mu C)$ والنقطتان (c, d) تقعان في المجال الكهربائية لتلك الشحنة وتبعدان عنها مسافة (10 cm,4 cm) على الترتيب. أستعين بالشكل المجاور وأحسبُ.

الشغل الذي تبذله القوة الكهربائية لنقل إلكترون من النقطة (d) إلى النقطة (c).



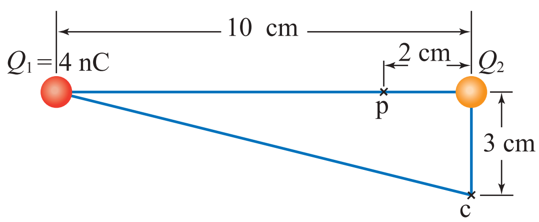
6. **أستخدم الأرقام:** شحنتان نقطيتان (Q_1, Q_2) موضوعتان في الهواء كما في الشكل، والنقطة (p) تقع على الخط الواصل بينهما وجهدها يساوي صفرًا.

أستعين بالشكل وأجيب عما يأتي:

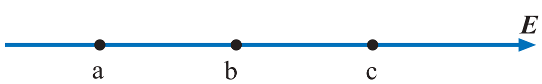
أ . ما نوع الشحنة (Q_2)؟ وما مقدارها؟

ب. ما مقدار الجهد الكهربائي للنقطة (c).

جـ. مقدار المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (p).

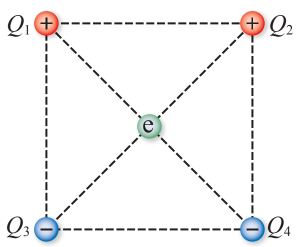


7. ثلاث نقاط (a, b, c) تقع على خط مجال كهربائي، كما يبين الشكل المجاور.



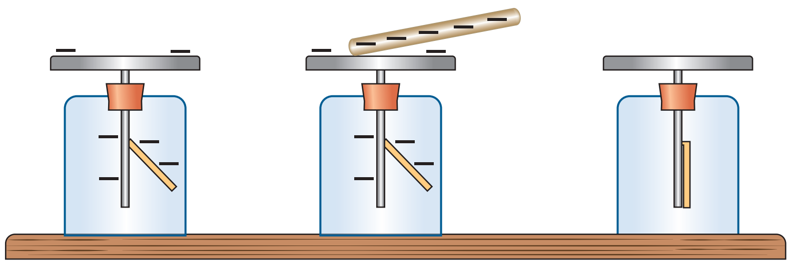
أ . **أتوقع** بأي اتجاه ستتحرك شحنة نقطية $(-q)$ عند وضعها عند النقطة (b)، هل تتحرك نحو (a) أم نحو (c)؟ وماذا يحدث لكل من الطاقة الحركية وطاقة الوضع الكهربائية للشحنة. أبرر إجابتي.

ب. **أستنتج:** عند نقل شحنة $(+q)$ من (c) إلى (b) بسرعة ثابتة. أحدد القوى المؤثرة في الشحنة، وإشارة الشغل لكل قوة.



8. **أستخدم الأرقام:** تتوزع أربع شحنات كهربائية على رؤوس مربع قطره يساوي (2 cm) في الفراغ، كما في الشكل المجاور؛ الشحنتان $(Q_1 = Q_2 = 2\ \mu C)$ والشحنتان $(Q_3 = Q_4 = -3\ \mu C)$.
أحسب مقدار القوة الكهربائية المحصلة المؤثرة في إلكترون موضوع في مركز المربع، وأحدد اتجاهها.

9. **أصمم استقصاء:** الكشاف كهربائي أداة تستخدم للكشف عن الشحنات الكهربائية. والشكل أدناه يبين مخططًا لتجربة استخدمت فيها مجموعة من الطالبات كشافًا كهربائيًا، قمن بشحنة باستخدام قضيب بلاستيك مشحون بشحنة سالبة؛ وذلك بملامسة القضيب المشحون لقرص الكشاف. تفترض الطالبات أنه يمكن استخدام الكشاف المشحون للكشف عن نوع الشحنة على جسم مشحون وذلك بتقريب الجسم من قرص الكشاف وملاحظة التغير في انفراج ورقة الكشاف.



أ . **أصوغ فرضية** حول العلاقة بين نوع الشحنة المجهولة والتغير في انفراج الورقتين.

ب. **أختبر فرضيتي:** كيف يمكن اختبار صحة الفرضية؟ أوضح ذلك بكتابة خطوات التجربة المناسبة لاختبار صحة الفرضية.

10. **أستخدم الأرقام:** شحنتان كهربائيتان نقطيتان موجبتان مقدار كل منهما $(6\ \mu C)$، تفصلهما في الهواء مسافة (0.2 m)، كما في الشكل أدناه، النقطة (a) تنصف المسافة بين الشحنتين. أحسب كلًا من:

أ . فرق الجهد الكهربائي $(V_a - V_b)$.

ب. طاقة الوضع الكهربائية المختزنة في الشحنة (Q_1).

جـ. مقدار الشغل الذي تبذله قوة خارجية لنقل شحنة اختبار (2 nC) من النقطة (b) إلى النقطة (a).

الوحدة 4

الحركة التذبذبية والحركة الموجية

Oscillatory Motion and wave Motion

أتأمّل الصورة

برج تايبيه Taipei 101 أحد أطول المباني في العالم؛ يتكوّن من 101 طابق، ويبلغ ارتفاعه أكثر من 509 m ويقع في مدينة تايبيه في تايوان، في منطقة يمكن أن تشهد زلازل بقوّة 6 درجات، ورياحًا عاتية بسرعة تزيد على 200 km/h. استخدم المصمّمون كرة فلزّية كتلتها 660000 kg عُلّقت داخل البرج على ارتفاع 370 m تقريبًا عن سطح الأرض؛ لإخماد أيّ اهتزازات قد تحدث له والحفاظ على ثباته.

كيف تُخمد الكرة الاهتزازات التي قد يتعرّض لها البرج، عند حدوث الزلازل والأعاصير؟

الفكرة العامّة:

الحركة التذبذبية هي حركة يتذبذب أو يهتزّ الجسم فيها حول موضع اتزانه. وتُعدّ الحركة التوافقية البسيطة نوعًا خاصًّا من الحركة التذبذبية، وهي تشكّل الأساس الذي يُبنى عليه فهم الموجات الميكانيكية.

الدرس الأول: الحركة التوافقية البسيطة

الفكرة الرئيسة: تتميّز الحركة التوافقية البسيطة بأنّها حركة تذبذبية يتناسب فيها تسارع الجسم طرديًّا مع إزاحته من موقع الاتّزان، ويكون اتّجاهه دائمًا باتّجاه موقع الاتّزان.

الدرس الثاني: التداخل والموجات الموقوفة

الفكرة الرئيسة: تتكوّن الموجات الموقوفة نتيجة تداخل موجتين ضمن شروط مُحدَّدة، وهي ظاهرة تحدث في الموجات الطولية والمستعرضة، ولها تطبيقات عدّة، منها: إنتاج النغمات في الآلات الموسيقية.

الدرس الثالث: التداخل والحيود لموجات الضوء

الفكرة الرئيسة: لفهم طبيعة الضوء وتفسير الظواهر الضوئية؛ افترض العلماء أنّ للضوء طبيعة مزدوجة (جسيمية-موجية)؛ إذ تظهر صفاته الجسيمية في بعض الظواهر الفيزيائية كالتأثير الكهرضوئي، وتظهر صفاته الموجية في ظواهر فيزيائية أخرى كالتداخل والحيود.

تجربة استهلالية

دراسة الحركة التذبذبية لجسم معلّق في نابض

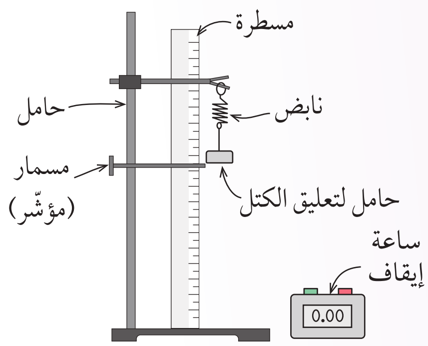
الموادّ والأدوات: نابض، حامل فلزي، ساعة إيقاف، حامل لتعليق الكتل، كتل مقدار كل منها (50 g)، مسمار (مؤشّر).

إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين.

أصوغ فرضيتي: حول العلاقة بين الكتلة المعلقة بنابض والزمن الدوري لنظام (الكتلة –النابض).

أختبر فرضيتي:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:



1 أُركّب الأدوات كما هو مُبيَّن في الشكل المجاور، وأعلّق حامل الكتل بطرف النابض من دون إضافة كتل عليه، وأسجّل كتلته.

2 أسحب حامل الكتل رأسيًّا إلى الأسفل (مسافة 5 cm مثلًا) وأضبط المؤشّر عند نقطة بداية الحركة، ثم أتركه يتذبذب إلى الأعلى وإلى الأسفل.

3 **أجرّب:** أقيس الزمن اللازم لإتمام 10 ذبذبات مثلًا، حيث تمثل الذبذبة الحركة التي يُحدثها الجسم المهتزّ كي يمرّ بالنقطة نفسها (المؤشّر) مرّتين متتاليتين بالاتجاه نفسه.

4 **أستخدم الأرقام:** أحسب الزمن الدوري (T) بقسمة الزمن اللازم لإتمام 10 ذبذبات على 10، ثم أحسب مربّع الزمن الدوري (T^2).

5 **أجرّب:** أضيف كتلة (50 g) إلى الحامل وأكرّر الخطوات السابقة. أحرص على سحب الكتلة إلى الأسفل للمسافة نفسها قبل تركها.

6 أكرّر خطوات التجربة، وذلك بزيادة الكتل المعلّقة بالحامل تدريجيًّا، بإضافة (50 g) في كل مرّة.

التحليل والاستنتاج:

1. **أضبط المتغيرات:** أحدّد المتغير المستقل، والمتغير التابع، ومتغيرين ضُبِطا في التجربة.
2. **أمثّل البيانات** التي أحصل عليها بيانيًّا؛ الكتلة (m) على محور (x) ومربع الزمن الدوري (T^2) على محور (y)، ثم أحسب ميل الخط ($\frac{\Delta T^2}{\Delta m}$)
3. **أستنتج:** يُحسَب الزمن الدوري لنظام (النابض–الكتلة) من العلاقة ($T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$)، وبتربيع هذه العلاقة فإن: ($T^2 = 4\pi^2 \frac{m}{k}$). أستخدم هذه العلاقة، وأعوّض ميل الخط المستقيم ($\frac{\Delta T^2}{\Delta m}$) الذي حسبته، لأتوصّل إلى ثابت المرونة للنابض (k).
4. **أصدر حكمًا** عما إذا كانت النتائج قد توافقت مع فرضيتي أم لا.

الحركة التوافقية البسيطة
Simple Harmonic Motion

الدرس 1

الفكرة الرئيسة:

تتميّز الحركة التوافقية البسيطة بأنّها حركة تذبذبية، يتناسب فيها تسارع الجسم طرديًّا مع إزاحته عن موقع الاتّزان، ويكون دائمًا باتجاه موقع الاتّزان.

نتاجات التعلّم:

- أصف الحركة التوافقية البسيطة، وأعبّر عنها بمعادلة رياضية.
- أصف حركة بندول بسيط.
- أحدّد العوامل التي يعتمد عليها الزمن الدوري لحركة البندول البسيط عمليًّا.
- أحسب تسارع السقوط الحرّ عمليًّا باستخدام البندول البسيط.

المفاهيم والمصطلحات:

الحركة التذبذبية Oscillatory Motion

الحركة التوافقية البسيطة Simple Harmonic Motion

التردّد الزاوي Angular Frequency

ثابت الطور Phase Constant

الحركة الدورية Periodic Motion

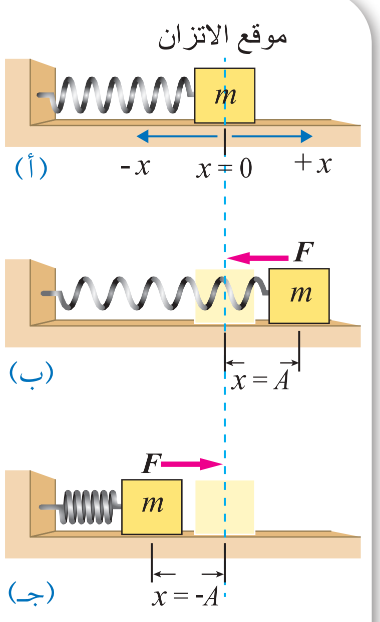
تتحرّك الأجسام بأشكال مختلفة، وأحد أشكالها يُسمّى الحركة الدورية Periodic motion، وهي حركة تكرّر نفسها على المسار نفسه في فترات زمنية متساوية، ومن الأمثلة عليها: دوران العجلة حول محورها، ودوران الكواكب حول الشمس. ويوجد نوع خاص من الحركة الدورية يُسمّى **الحركة التذبذبية (الاهتزازية) Oscillatory motion**، وهي حركة دورية تُكرّر نفسها ذهابًا وإيابًا على المسار نفسه في فترات زمنية متساوية حول موقع الاتّزان، مثل حركة الأرجوحة المُبيَّنة في الشكل (1)، واهتزاز وتر آلة موسيقية، وتذبذب جُسيمات المادة الصلبة وغيرها. والحركة التذبذبية حركة دورية، ولكن ليس كلّ حركة دورية هي حركة تذبذبية؛ فمثلًا: حركة الكواكب حول الشمس حركة دورية ولكنّها ليست تذبذبية. في هذا الدرس ستتعرّف نوعًا خاصًّا من الحركة التذبذبية يُسمّى الحركة التوافقية البسيطة.

✓ **أتحقّق:** ما الفرق بين الحركة التذبذبية والحركة الدورية؟

الشكل (1): الحركة التذبذبية لأرجوحة.

وصف الحركة التوافقية البسيطة
Describing Simple Harmonic Motion

تُعدّ الحركة التوافقية البسيطة نمطًا خاصًّا من أشكال الحركة التذبذبية، ويشكّل فهمها الأساس لدراسة أنماط أكثر تعقيدًا من الحركات التذبذبية ودراسة الحركة الموجية أيضًا. ويُعدّ النظام المُوضَّح في الشكل (2) مثالًا نموذجيًّا للحركة التوافقية البسيطة. يتكوّن النظام من نابض مُهمَل الكتلة مُثبَّت من أحد طرفيه، في حين يتصل الطرف الآخر بجسم كتلته (m) يتحرّك على سطح أفقي أملس.



الشكل (2): جسم متّصل بنابض يتذبذب على سطح أفقي أملس.

(أ) الجسم عند موقع الاتزان.

(ب) النابض في حالة استطالة.

(جـ) النابض في حالة انضغاط.

عندما لا يكون النابض مشدودًا أو مضغوطًا، يكون الجسم ساكنًا عند الموقع ($x = 0$)، ويُسمّى موقع الاتزان، كما يبيّن الشكل (2/ أ). وعند إزاحة الجسم سواء إلى اليمين أو إلى اليسار مسافة (A) ثم تركه، فإن النظام يبدأ بالتذبذب ذهابًا وإيابًا حول موقع اتزانه، بحيث يمثّل موقع الجسم ($x = A$) سعة الذبذبة وهي أقصى إزاحة يتحرّكها الجسم عن موقع الاتزان، ويكون للسعة المقدار نفسه على يسار موقع الاتزان؛ ($x = -A$).

تعلمت سابقًا أنّه عند إزاحة الجسم عن موقع الاتزان، فإن النابض يؤثّر في الجسم بقوّة تُسمّى القوّة المعيدة، وهي تتناسب طرديًّا مع الإزاحة (x)، وتعطى بالعلاقة الرياضية الآتية التي تُعرف بقانون هوك Hook's law:

$$F = -kx$$

حيث (k): ثابت مرونة النابض، (x): إزاحة الكتلة عن موقع الاتزان.

تدل الإشارة السالبة في قانون هوك على أن اتجاه القوّة المعيدة يكون دائمًا باتجاه موقع الاتزان؛ أي عكس اتجاه الإزاحة، هذا يعني أنه عند إزاحة الجسم إلى يمين الموقع ($x = 0$) يكون اتجاه القوّة المعيدة نحو اليسار، كما يبيّن الشكل (2/ ب). وعند إزاحته إلى يسار الموقع ($x = 0$) يكون اتجاه القوّة المعيدة نحو اليمين، كما يبيّن الشكل (2/ جـ). أمّا عند الموقع ($x = 0$) فإن القوّة المؤثّرة في الجسم تساوي صفرًا. وبتطبيق القانون الثاني لنيوتن ($\Sigma F = ma$) نتوصّل إلى علاقة لحساب تسارع النظام، وهي:

$$-kx = ma$$

$$a = -\frac{k}{m}x$$

يتضح من هذه العلاقة أن مقدار التسارع يتناسب طرديًّا مع مقدار الإزاحة، واتجاهه عكس اتجاهها، أي يكون اتجاه التسارع باتجاه القوّة

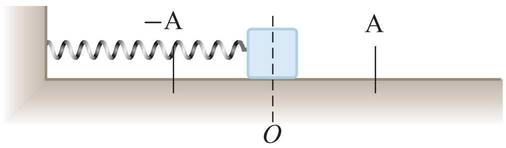
أُصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح كيف تتغيّر كلّ من السرعة والتسارع والقوّة المُعيدة والإزاحة في الحركة التوافقية البسيطة، مثل حركة جسم يتصل بنابض، ثمّ أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

أتحقّق: في الحركة التوافقية البسيطة، ما الكمّيتان من الكميات الآتية (الإزاحة، القوّة المُعيدة، التسارع) اللتان يكون اتجاههما دائمًا بالاتجاه نفسه؟

المعيدة. وتُسمّى حركة النظام التي تحقّق هذا الشرط **الحركة التوافقية البسيطة** **Simple harmonic motion(SHM)**، وهي حركة الجسم بتسارع يتناسب مقداره طرديًّا مع إزاحة الجسم عن موقع الاتزان، واتجاهه باتجاه موقع الاتزان ومعاكسًا لاتجاه الإزاحة. وبغياب قوى الاحتكاك يُفترَض أن تستمر هذه الحركة مدة لا نهائية؛ لأن قوّة النابض قوّة محافظة، لكن الأنظمة الحقيقية تتأثر بقوى الاحتكاك؛ لذا تتلاشى حركة الجسم تدريجيًّا إلى أن يتوقف.

المثال 1

جسم كتلته (m) متصل بنابض ويتحرك حركة توافقية بسيطة على سطح أفقي أملس، كما يبيّن الشكل (3). النقطة (O) تمثّل موقع الاتزان، والنقطتان (A) و ($-A$) تمثّلان أقصى موقعين للجسم عن موقع الاتزان.



الشكل (3): وصف الحركة التوافقية البسيطة.

أ. أحدّد المواقع التي يكون للقوةّ المعيدة والتسارع فيها قيمة عظمى، مع توضيح اتجاه القوة والتسارع في كل موقع منها. وأحدّد المواقع التي تكون فيها القوّة المعيدة والتسارع تساوي صفرًا.

ب. أحدّد المواقع التي يكون للسرعة فيها قيمة عظمى، والمواقع التي تكون السرعة فيها تساوي صفرًا.

المعطيات: الشكل (3).

الحل:

أ. القوّة المعيدة تتناسب طرديًّا مع التسارع، ولهما الاتجاه نفسه.

وباستخدام العلاقة ($a = -\frac{k}{m}x$)، فإن التسارع يتناسب طرديًّا مع الإزاحة ومعاكسًا لها في الاتجاه. فيكون للتسارع (والقوة المعيدة) قيمة عظمى عند الموقع (A) وباتجاه ($-x$)، ولكل منهما قيمة عظمى عند الموقع ($-A$) وباتجاه ($+x$). وتكون قيمة كل منهما صفرًا في الموقع (O).

ب. عند وصول الجسم إلى أقصى إزاحة تكون سرعته صفرًا، أي أن سرعته تساوي صفرًا في الموقعين (A) و ($-A$)، أما لحظة مرور الجسم في الموقع (O) فيكون لسرعته قيمة عظمى.

يمكن تلخيص الإجابة في الجدول الآتي:

الكمية الفيزيائية	الموقع (A)	الموقع (O)	الموقع ($-A$)
القوّة والتسارع	قيمة عظمى، باتجاه ($-x$)	صفر	قيمة عظمى، باتجاه ($+x$)
السرعة	صفر	قيمة عظمى	صفر

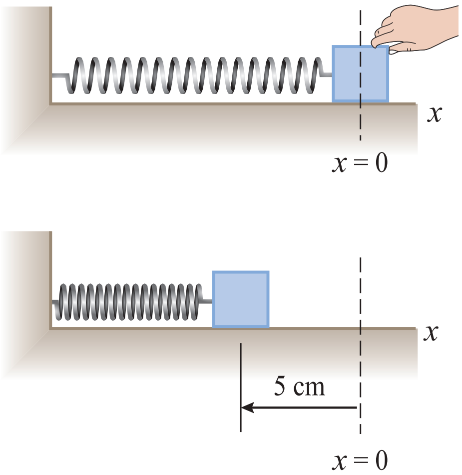
المثال 2

ضُغِط جسم متّصل بنابض موضوع على سطح أفقي أملس إلى نقطة تبعد مسافة 5 cm عن موقع اتّزانه على نحو ما هو مبيَن في الشكل (4)، وتُرِك يتذبذب ذهابًا وإيابًا. إذا كان مقدار القوّة المُعيدة عند تلك النقطة 4 N فأحسب ما يأتي.

أ . مقدار سَعة الذبذبة.

ب. ثابت مرونة النابض.

جـ. القوّة المُعيدة عندما يُصبح الجسم على بعد 2 cm عن موقع الاتّزان في أثناء عودته.



الشكل (4): تذبذب جسم متّصل بنابض أفقيًّا على سطح أملس.

المعطيات:

$x = -5\ \text{cm} = -0.05\ \text{m}\ ,\quad F = +4\ \text{N}$

المطلوب:

$A = ?\ ,\quad k = ?\ ,\quad F_{2cm} = ?$

الحلّ:

أ . سَعة الذبذبة هي أقصى إزاحة عن موقع الاتّزان، وتساوي: $A = 0.05\ \text{m}$

ب. ثابت مرونة النابض k:

$F = -k\,x$

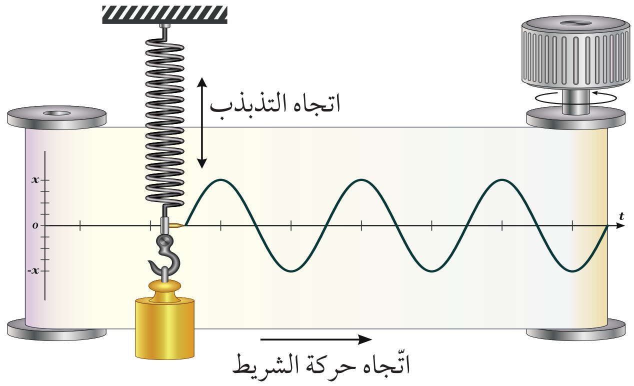
$4 = -k \times (-0.05)$

$k = 80\ \text{N/m}$

جـ. القوّة المُعيدة عند الموقع $x = -2\ \text{cm}$:

$F_{2cm} = -k\,x = -80 \times (-0.02) = 1.6\ \text{N}$

الإشارة الموجبة للقوّة تدل على أن القوّة باتجاه محور($+x$)؛ أي بعكس اتجاه الإزاحة.



الشكل (5): عند سحب شريط الورق بالتزامن مع تذبذب الجسم يرسم القلم المثبَّت في طرف النابض منحنى يوضح تغير الإزاحة مع الزمن للحركة التوافقية البسيطة.

التمثيل الرياضي للحركة التوافقية البسيطة

Mathematical Representation of Simple Harmonic Motion

الحركة التوافقية البسيطة هي حركة دورية تتكرّر بانتظام، وهذا النوع من الحركة يُوصف باستخدام مفاهيم خاصة، سبق وأن تعرفت بعضها في صفوف سابقة، مثل: الزمن الدوري، والتردد.

لتوضيح المفاهيم الخاصة بالحركة التوافقية، سوف ندرس حركة نظام يتكوّن من جسم يتصل بنابض معلّق رأسيًّا، كما يبيّن الشكل (5). عند سحب الجسم إلى الأسفل وتركه يهتز، بالتزامن مع سحب شريط الورق أفقيًّا بسرعة ثابتة، سوف يرسم القلم المثبَّت في طرف النابض على شريط الورق منحنى يبيّن التغير في الإزاحة مع الزمن للحركة التوافقية البسيطة.

تُعرَّف الدورة (الذبذبة الكاملة) بأنها الحركة التي يُحدثها الجسم المهتزّ كي يمرّ بالنقطة الواحدة في مسار حركته بالاتجاه نفسه مرّتين متتاليتين. أمّا الزمن الدوري (T) فهو الزمن اللازم لإتمام دورة كاملة، ويعتمد الزمن الدوري على كل من ثابت المرونة للنابض (k) وكتلة الجسم (m) حسب العلاقة الآتية:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

في حين يُعرَّف التردد (f) بأنه عدد الدورات في الثانية الواحدة، ويُقاس في النظام الدولي للوحدات بوحدة (s^{-1}) وتُعرَف بالهيرتز (Hz)، ويتناسب التردد عكسيًّا مع الزمن الدوري حسب العلاقة الآتية:

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

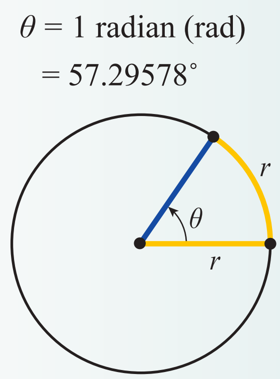
كما توصف الحركة التوافقية باستخدام **التردد الزاوي** **Angular frequency (ω)** وهو عدد الدورات الكاملة في وحدة الزمن

الربطُ بالرياضيات

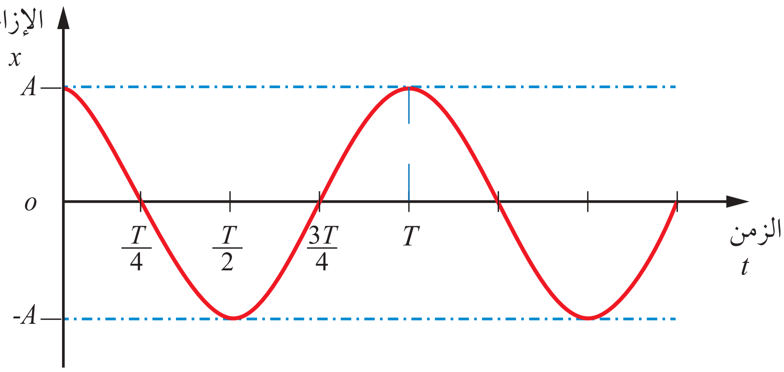
الراديان Radian (ويُرمز إليه بالرمز rad) هو زاوية مركزية في دائرة تقابل قوسًا طوله مساوٍ لطول نصف قطر الدائرة، على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (6)؛ إذ إنّ:

$$360° = 2\pi \text{ rad}$$

$$1 \text{ rad} = \frac{180°}{\pi} = 57.29578°$$



الشكل (6): تمثيل الراديان بالدرجات.



الشكل (7): منحنى (الإزاحة-الزمن) لحركة توافقية بسيطة، عند بدء الحركة من أقصى إزاحة عن موقع الاتزان.

مضروبًا في (2π) وهو مقياس لمدى سرعة حدوث الذبذبات؛ فكلما زاد عدد الذبذبات في وحدة الزمن زاد مقدار (ω). ويُقاس التردد الزاوي بوحدة (rad/s)، ويحسب بالعلاقة:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

يبيّن الشكل (7) منحنى (الإزاحة - الزمن) للحركة التوافقية، بدءًا من اللحظة ($t = 0$)، حيث بدأت حركة النظام من أقصى إزاحة ($x = +A$). كما يتضح من الشكل أن منحنى تغير الإزاحة (x) مع الزمن (t) للحركة التوافقية البسيطة يُمثّل بيانيًا باقتران جيب التمام، ويُعبَّر عنه بالعلاقة:

$$x(t) = A\cos \omega t$$

تنطبق هذه الصيغة على الحركة التوافقية البسيطة التي تبدأ من الموقع (A) عند الزمن ($t = 0$)؛ لذلك لا تُعدّ هذه العلاقة صيغة عامة للحركة التوافقية البسيطة، بل حالة خاصة.

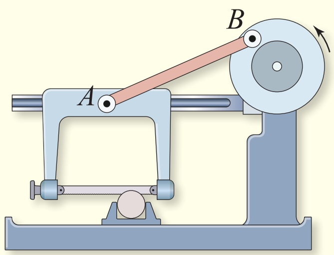
أما إذا بدأ الجسم من إزاحة مقدارها (x_i) عند اللحظة ($t = 0$)؛ كما يبيّن الشكل (8)، فإن الصيغة العامة لمعادلة الحركة التوافقية البسيطة تعطى بالعلاقة الآتية:

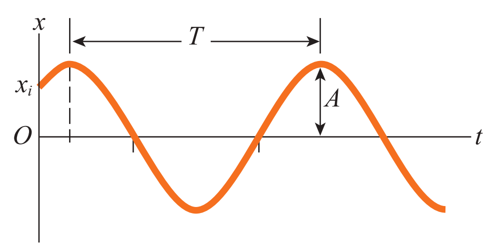
$$x(t) = A\cos(\omega t+\phi)$$

حيث (ϕ): ثابت الطور **Phase constant** (أو زاوية الطور الابتدائية)، وهي الزاوية التي تحدّد موقع الجسم عند لحظة بداية الحركة.

الربط بالحياة

للحركة التوافقية البسيطة تطبيقات في المجال الصناعي، منها الأدوات التي تحوّل الحركة الدائرية إلى حركة تذبذبية أو العكس. ومثال على ذلك منشار القطع الكهربائي الذي يعمل عن طريق وصله بمحرك كهربائي يتّصل بقرص ويتحرّك حركة دائرية بسرعة زاويّة ثابتة؛ لتتحوّل حركته الدائرية إلى حركة تذبذبية ذهابًا وإيابًا في المنشار على نحو ما يظهر في الشكل.





الشكل (8): منحنى (الإزاحة-الزمن) لحركة توافقية بسيطة، عند بدء الحركة من الموقع (x_i) بالنسبة لموقع الاتزان.

المثال 3

يتّصل جسم بطرف نابض موضوع على سطح أفقي أملس، سُحِب الجسم إلى أقصى إزاحة عن موقع الاتّزان على نحو ما يظهر في الشكل (9)، ثم تُرِك ليبدأ بالتذبذب عند الزمن $(t = 0)$. إذا علمتُ أنّ معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن:

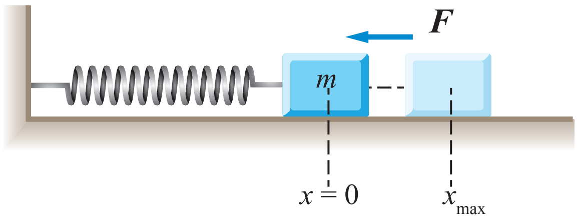
$$x(t) = 0.05 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$$

إذ تُقاس الإزاحة بوحدة (m) والزمن بوحدة (s)، فأجد:

أ. السّعة والتردّد الزاوي.

ب. الزمن الدوري والتردّد.

جـ. الإزاحة بعد نصف ثانية من بدء الحركة.



الشكل (9): جسم متّصل بنابض يتذبذب على سطح أفقي بعد سحبه إلى أقصى إزاحة.

المعطيات: $x(t) = 0.05 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$, $t = 0.5$ s

المطلوب: $A = ?$, $\omega = ?$, $T = ?$, $x(0.5) = ?$, $f = ?$

الحلّ:

أ. عن طريق مقارنة معادلتَي تغيّر الإزاحة مع الزمن:

$$x(t) = A \cos(\omega t)$$

$$x(t) = 0.05 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$$

أجد أنّ: السعة: $A = 0.05$ m

التردّد الزاوي: $\omega = \frac{\pi}{2}$ rad.s^{-1}

ب. الزمن الدوري:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{\pi}{2} = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow T = 4 \text{ s}$$

التردّد:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4} \text{ s}^{-1}$$

جـ. الإزاحة بعد نصف ثانية:

أجد أولًا الزاوية (ωt) بوحدة الدرجة باستخدام العلاقة $(\pi \text{ rad} = 180^o)$:

$$(\omega\, t) = \left(\frac{\pi}{2} \times 0.5\right) \text{rad} = 0.25\,\pi \text{ rad} = 0.25\,\pi \times \frac{180^o}{\pi} = 45^o$$

أُعوّض مقدار الزاوية $(\omega t = 45^o)$ في معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن:

$$x(t) = 0.05 \cos(\omega\, t) = 0.05 \cos 45^o = 0.05 \times 0.7 = 0.035 \text{ m} = 3.5 \text{ cm}$$

المثال 4

يتحرك جسم حركة توافقية بسيطة بحيث يكون التغير في إزاحته مع الزمن وفق المعادلة:

$$x(t) = 5\cos\left(2t + \frac{\pi}{6}\right)$$

حيث تُقاس الإزاحة بوحدة (cm) والزمن بوحدة (s). أجد ما يأتي:

أ . موقع الجسم عند اللحظة $(t = 0)$.

ب. التردد الزاوي.

جـ. الزمن الدوري.

المعطيات: $x(t) = 5\cos\left(2t + \frac{\pi}{6}\right),\ t = 0$

المطلوب: $x(0) = ?,\quad \omega = ?,\quad T = ?$

الحل:

أ . لإيجاد الموقع عند اللحظة $(t = 0)$:

$$x(0) = 5\cos\left(0 + \frac{\pi}{6}\right) = 5\cos\frac{\pi}{6}$$

نجد الزاوية $\left(\frac{\pi}{6}\right)$ بوحدة الدرجة:

$$\frac{\pi}{6}\ \text{rad} \times \frac{180°}{\pi\ \text{rad}} = \frac{180°}{6} = 30°$$

ثم نعوض في المعادلة:

$$x(0) = 5\cos 30° = 4.3\ \text{cm}$$

ب. بمقارنة معادلتي تغير الإزاحة مع الزمن:

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

$$x(t) = 5\cos\left(2t + \frac{\pi}{6}\right)$$

فإن التردد الزاوي: $\omega = 2\ \text{rad.s}^{-1}$

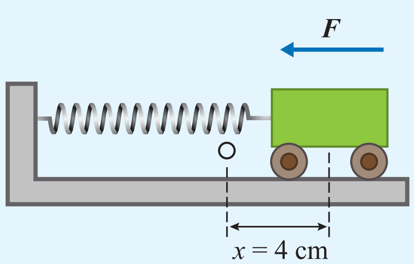
جـ. الزمن الدوري يُحسَب من العلاقة:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2 \times 3.14}{2} = 3.14\ \text{s}$$

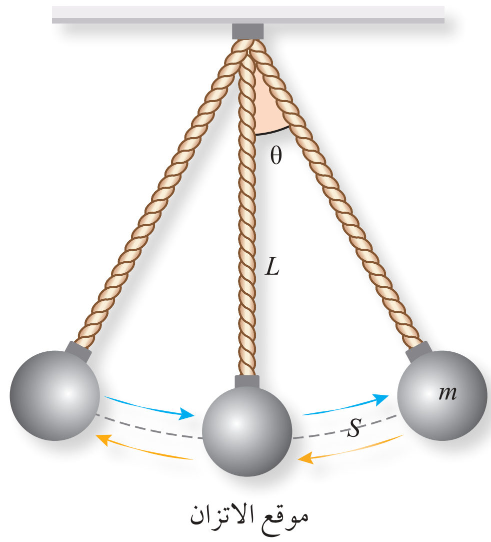
تمرين

أستخدم الارقام: عربة كتلتها 2 kg تتّصل بأحد طرفَي نابض موضوع على سطح أفقي أملس، والطرف الآخر للنابض مثبّت في الجدار كما في الشكل (10)، سُحبت العربة إزاحة $x = +4\ \text{cm}$ عن موقع الاتّزان، ثم تُركت تتذبذب بدءًا من الزمن $(t = 0)$. إذا كان ثابت مرونة النابض 32 N/m فأُجيب عمّا يأتي:

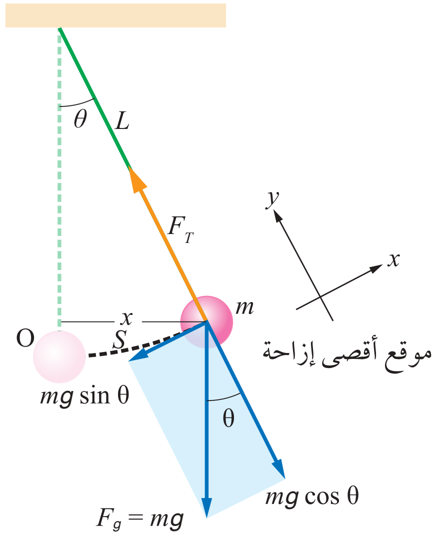
أ . أحسبُ التردّد الزاوي. ب. أكتب معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن.



الشكل (10): عربة تتّصل بنابض سُحبت مسافة 4 cm وتُركت تتذبذب.



الشكل (11/ أ): الحركة التذبذبية للبندول البسيط.



الشكل (11/ ب): مخطط الجسم الحر للكرة عند أقصى إزاحة.

البندول البسيط Simple Pendulum

من الأمثلة الأخرى على الحركة التذبذبية حركة البندول البسيط. يتكوّن البندول البسيط من جسم (قد يكون كرة) كتلته (m) معلّق بواسطة خيط خفيف كتلته مهملة وطوله (L). عند تعليق البندول كما هو مبين في الشكل (11/ أ)، ثم سحبه إلى اليمين (أو اليسار) بحيث يصنع الخيط زاوية (θ) مع موقع الاتزان ثم تركه، فإنه يتذبذب ذهابًا وإيابًا على المسار نفسه حول موقع الاتزان، بحيث تقطع الكرة مسافة (S) تشكّل قوسًا من دائرة نصف قطرها يساوي طول خيط البندول.

تتأثر الكرة في أثناء حركتها بقوّة الشد في الخيط (T)، وقوّة الجاذبية الأرضية (mg). ويبيّن الشكل (11/ ب) مخطط الجسم الحر للكرة عند أقصى إزاحة لها عن موقع الاتزان. باختيار محور (x) باتجاه يوازي المماس للقوس الدائري ورسم محور (y) عموديًّا عليه، فإنه يمكن تحليل قوّة الجاذبية إلى مركّبتين: مركّبة مماسية ($mg \sin \theta$)، ومركّبة عمودية على المماس ($mg \cos \theta$). وبما أنه لا يوجد حركة على امتداد المحور (y)، فإن القوّة المحصلة بهذا الاتجاه تساوي صفرًا:

$$\Sigma F_y = T - mg \cos \theta = 0$$

أما القوّة المحصلة باتجاه المماس فهي تساوي:

$$\Sigma F_x = mg \sin \theta$$

أتحقّق: في البندول البسيط، ما القوى المؤثرة في الكرة في أثناء حركتها؟ وما القوة المحصلة المؤثرة فيها على امتداد المحور (y)، والمحور (x)؟

وهي قوّة يتغير اتجاهها بتغير الموقع، بحيث تتجه دائمًا نحو موقع الاتزان، وبعكس اتجاه الإزاحة، إذا فهي تمثّل قوّة معيدة تعطى بالعلاقة الآتية:

$$F = -mg \sin \theta$$

عندما تكون الزاوية (θ) صغيرة ($\theta \leq 10^{\circ}$)، فإن مقدار الزاوية (θ) بوحدة راديان يساوي تقريبًا ($\sin \theta$)، وطول القوس (s) يساوي تقريبًا الإزاحة الأفقية (x). في هذه الحالة يمكن وصف حركة البندول بأنها حركة توافقية بسيطة. ويمكن إعادة كتابة العلاقات السابقة كما يأتي:

$$\sin \theta = \theta = \frac{x}{L}$$

والقوّة المعيدة تساوي تقريبًا:

$$F = -mg\,\theta = -mg\,\frac{x}{L}$$

تحقّق هذه المعادلة شروط الحركة التوافقية البسيطة، إذ يتناسب مقدار القوّة المعيدة طرديًّا مع الإزاحة، واتجاهها بعكس اتجاه الإزاحة.

الزمن الدوري للبندول البسيط Period of Simple Pendulum

يمكن التعبير عن القوّة المعيدة للبندول البسيط بالصورة الآتية:

$$F = -\frac{mg}{L}x$$

وتتفق هذه المعادلة مع الصورة العامة للقوّة المعيدة في قانون هوك: $F = -kx$؛ لذا فإن حركة البندول البسيط في هذه الحالة هي حركة توافقية بسيطة تتشابه مع حركة نظام (الكتلة-النابض). وعند مقارنة كلا الحركتين نتوصّل إلى الآتي:

- قيمة ثابت النابض (k) في قانون هوك يقابله في حالة البندول المقدار ($\frac{mg}{L}$).
- الزمن الدوري للنابض يعطى بالعلاقة ($T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$)، وفي حالة البندول البسيط فإن ($k = \frac{mg}{L}$)، وبذلك فإن الزمن الدوري للبندول البسيط يعطى بالعلاقة:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

توضح هذه العلاقة أن الزمن الدوري للبندول البسيط، الذي يحقق شرط الحركة التوافقية البسيطة، يبقى ثابتًا ما دام طول الخيط وتسارع السقوط الحر ثابتًا.

أفكّر: هل يتغير الزمن الدوري للبندول بتغير أي من سعة الذبذبة أو كتلة البندول؟ أفسر إجابتي.

الربط بالفلك

بندول فوكو Foucault Pendulum

بندول فوكو هي تجربة صمّمها الفيزيائي الفرنسي جان ليون فوكو لتقديم إثبات علمي بسيط لحقيقة دوران الأرض حول محورها؛ عن طريق تعليق ثقل كتلته 28 kg بسلك طوله 67 m في سقف قبة البانثيون في باريس بطريقة تسمح للبندول بالتذبذب في أيّ اتّجاه.

المثال 5

استخدم جيولوجي بندولًا طوله 17.1 cm لقياس مقدار تسارع السقوط الحر في منطقة على سطح الأرض. إذا أكمل البندول 72 دورة في مدّة زمنية (60 s)، فأحسبُ تسارع السقوط الحر في تلك المنطقة.

المعطيات: عدد الدورات 72 دورة خلال 60 s ، $L = 17.1\ \text{cm} = 0.171\ \text{m}$

المطلوب: $g = ?$

الحلّ: أحسبُ الزمن الدوري عن طريق قسمة الزمن الكلّي للدورات (t) على عدد الدورات الكاملة:

$$T = \frac{60}{72} = 0.833\ \text{s}$$

أُطبّق المعادلة:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow T^2 = 4\pi^2\frac{L}{g}$$

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{4 \times (3.14)^2 \times 0.171}{(0.833)^2} = 9.73\ \text{m/s}^2$$

أبحثُ

البندول الإيقاعي Metronome هو جهاز يعمل على إصدار صوت منتظم ومكرر على شكل تكة أو نقرة بعد إكمال ذبذبة كاملة. قد يكون البندول الإيقاعي ميكانيكيًّا على نحو مايظهر في الشكل الذي اخترع عام 1815م، أو كهربائيًّا أو إلكترونيًّا. يستخدمه الموسيقيون للتأكد من أن العزف يجري بوتيرة تامة وأداء دقيق. أبحث عن استخدامات أخرى للبندول الإيقاعي.

أُفكّر: ساعة بندولية يكمل بندولها ذبذبة واحدة في زمن مقداره ثانية واحدة عندما يكون طوله L. إذا تضاعف طول البندول أربع مرّات ($4L$)، فكم ذبذبة يكمل البندول في زمن مقداره ثانية واحدة؟

تمرين

ما مقدار الزمن الدوري للبندول نفسه المذكور في المثال (5) على سطح القمر، حيث مقدار تسارع السقوط الحر $1.62\ \text{m/s}^2$؟

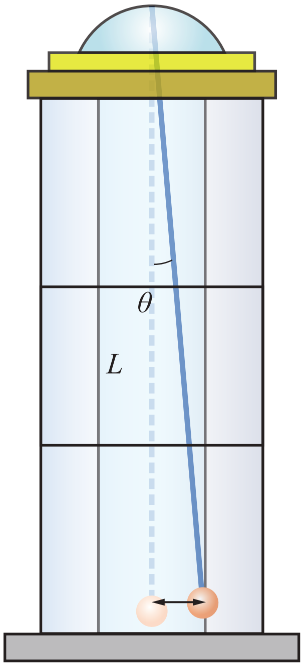
المثال 6

أراد مصطفى قياس ارتفاع برج، فلاحظ وجود حبل معلّق في سقف البرج ويصل إلى الأرض تقريبًا. ربط كرة كتلتها 10 kg بالطرف السفلي للحبل وأزاحه مسافة مقدارها 3 m عن موقع اتّزانه، وتركه يتذبذب على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (12)، وحسب زمن الذبذبة الواحدة للبندول (عن طريق قياس زمن ذبذبات عدة) فكان 10 s. أحسبُ:

أ . ارتفاع البرج.

ب. التردّد والتردد الزاوي للبندول.

جـ. القوّة المُعيدة عند أقصى إزاحة.



الشكل (12): حبل معلق في سقف برج.

المعطيات: $m = 10\ \text{kg}\ ,\ T = 10\ \text{s}\ ,\ x = 3\ \text{m}$

المطلوب: $\omega = ?\ ,\ f = ?\ ,\ L = ?\ ,\ F = ?$

الحلّ:

أ . ارتفاع البرج:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow T^2 = 4\pi^2\frac{L}{g}$$

$$L = \frac{T^2 g}{4\pi^2} = \frac{10^2 \times 10}{4 \times (3.14)^2} = 25.3\ \text{m}$$

ب. التردّد:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10} = 0.1\ \text{Hz}$$

التردّد الزاوي:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \times 3.14}{10} = 0.628\ \text{rad/s}$$

جـ. القوّة المُعيدة:

$$F = -(\frac{mg}{L})\ x = -(\frac{10 \times 10}{25.3}) \times 3 = -11.86\ \text{N}$$

التجربة ١ استخدام البندول البسيط؛ لإيجاد تسارع السقوط الحرّ عمليًّا

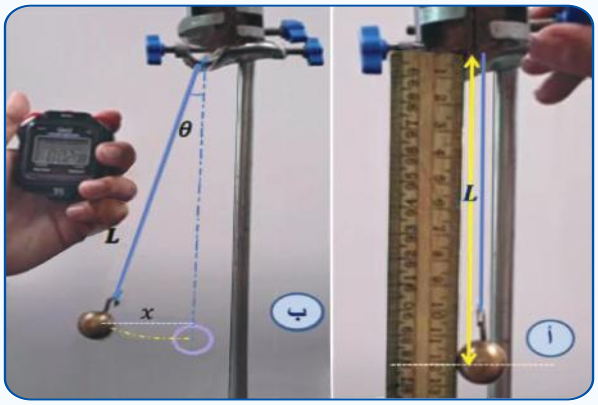
الموادّ والأدوات: كرتان فلزّيتان مختلفتان في الكتلة، حامل فلزّي، خيط غير قابل للاستطالة (أو سلك رفيع)، ساعة إيقاف رقمية، مسطرة مترية.

إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الأدوات والأثقال على القدمين.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أنفّذ الخطوات الآتية:

1. أضع الحامل على سطح الطاولة، وأُثبّت اللواقط على قمّة الحامل ثمّ أربط أحد طرفَي الخيط بإحدى الكرتين، في حين أُثبّت الطرف الآخر للخيط باللواقط على نحو ما في الشكل، على أنْ أتمكّن من تغيير طول الخيط L.
2. **أقيس** طول الخيط (L) باستخدام المسطرة المترية على نحو ما يظهر في الشكل (أ)، وأُدوّن النتيجة في الجدول.
3. **أقيس:** أسحبُ الكرة جانبًا مسافة أفقية صغيرة على أنْ تكون الزاوية θ أقل من 10^{o} تقريبًا على نحو ما في الشكل (ب)، وأتركها تتذبذب بالتزامن مع تشغيل ساعة الإيقاف من قِبَل أحد أفراد مجموعتي؛ لقياس زمن 10 ذبذبات كاملة (t_1)، وأُدوّن نتائجي في الجدول.
4. أُكرّر الخطوة (3) مرّتين، وأُدوّن زمن عشر ذبذبات في كلّ مرّة (t_2, t_3)، ثمّ أدوّن نتائجي في الجدول.
5. أُكرّر الخطوتين (3-4) باستخدام أطوال مختلفة للخيط، وأُدوّن نتائجي في الجدول.
6. أُكرّر الخطوتين (3-4) باستخدام الكرة الثانية، وأُدوّن نتائجي في الجدول.



التحليل والاستنتاج:

1. **أستخدم الأرقام:** أحسب المتوسّط الحسابي (t) للفترات الزمنية الثلاث (t_1, t_2, t_3) ثمّ أحسبُ الزمن الدوري (T) ؛بقسمة متوسّط الزمن (t) على عدد الذبذبات، وأُكرّر ذلك عند تغيّر طول الخيط، ثمّ أُدوّن نتائجي في الجدول.
2. **أرسمُ** العلاقة البيانية بين مربّع الزمن الدوري (T^2) على محور y وطول الخيط L على محور x، ثمّ أجد ميل الخطّ الناتج $(\frac{\Delta T^2}{\Delta L})$، وأُطبّق العلاقة:
$$g = (\frac{L}{T^2}) \times 4\pi^2 = \frac{4\pi^2}{(\frac{\Delta T^2}{\Delta L})}$$
لحساب تسارع السقوط الحرّ g.
3. **أستنتج:** هل تتّفق قيمة تسارع السقوط الحر g المحسوبة مع القيمة المعروفة $g = 9.8\ m/s^2$؟ وما سبب الاختلاف إن وجد؟
4. **أستنتج:** هل تغير الزمن الدوري بتغير الكتلة؟ أُفسّر إجابتي.
5. **أتوقع:** هل سيتغيّر الزمن الدوري للبندول؛ عند إجراء التجربة في منطقة أعلى؟ أُفسّر إجابتي.

تطبيقات حياتية على الحركة التوافقية البسيطة

Life Applications of Simple Harmonic Motion

توجد تطبيقات كثيرة في حياتنا اليومية على الحركة التوافقية البسيطة يمكن ملاحظتها أو التعامل معها، نذكر منها:

القفز بالحبال المطّاطية (بنجي) Bungee Jumping

يُعدُّ القفز بالحبال أو ما يُعرف بالبنجي على نحو ما يظهر في الشكل (13)، تطبيقًا على الحركة التوافقية البسيطة، وهو نشاط رياضي ينطوي على القفز من مناطق شاهقة الارتفاع، في حين يكون القافز مربوطًا بحبل مطّاطي يُحقّق مواصفات الأمان؛ ويقفز من مناطق ثابتة كالجسور والمباني، أو متحرّكة كالقفز من منطاد أو من طائرة عمودية. وأُدخلت في السنوات الأخيرة رياضة القفز من الرافعات إلى بعض المدن الترفيهية بوصفها وسيلة للترفيه. وعندما يقفز الشخص ويصل إلى أقصى إزاحة يبدأ بالتذبذب إلى أعلى وأسفل، وتكون الحركة توافقية بسيطة إذا تحقّقت شروطها.

أُفكّر: ما مصدر القوة المعيدة في رياضة القفز بالحبال المطاطية؟

الشكل (13): القفز من ارتفاعات شاهقة؛ باستخدام حبل مطّاطي.

الحركة التوافقية المُخمدة Damped Harmonic motion

عند دراسة الحركة التوافقية البسيطة (مثل حركة البندول وحركة الكتلة المعلقة بالنابض وغيرها) افترضنا عدم وجود قوى احتكاك؛ ولذلك فالنظام لا يفقد طاقة، وسعة التذبذب تبقى ثابتة ويستمر في الحركة إلى اللانهاية، وهذا الافتراض لتسهيل التعامل مع الحركة التوافقية البسيطة رياضيًّا، لكن في الواقع تقل سعة التذبذب مع الزمن بالتدريج حتى تتوقف الحركة التذبذبية؛ لأن قوى أخرى تؤثر في النظام (مثل قوى الاحتكاك) فتبدّد من طاقة النظام حتى تؤول سعة التذبذب إلى الصفر، حيث تتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة داخلية في الجسم والوسط الذي يتذبذب فيه.

بوجهٍ عام فإن أنظمة التذبذب الطبيعية تكون متخامدة. ويطلق على الحركة التذبذبية التي تقل سعتها مع الزمن بسبب قوى المقاومة؛ مثل قوة الاحتكاك اسم الحركة التوافقية المخمدة.

في حالة التخامد فإن الحركة التذبذبية لا تُعدّ حركة توافقية بسيطة. من الأمثلة على الحركة التوافقية المخمدة غالق الباب الهيدروليكي Hydraulic door closer أو ما يُسمّى ردّاد الباب على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (14)؛ حيث يوجد في داخل الغالق نابض ينضغط عند فتح الباب، وعند ترك الباب يعود النابض لطوله الأصلي فيؤثّر بقوّة في الزيت لدفعه عبر ثقب صغير؛ إذ تعمل هذه القوّة على تخميد النظام؛ لذا، يُغلق الباب ببطء.

أتحقّق: في أنظمة التذبذب العملية، لماذا نلاحظ أن سعة التذبذب تقل مع الزمن إلى أن تتوقف عن الحركة؟

الشكل (14): غالق (ردّاد) الباب.

الربط بالهندسة

مُخمّد الرياح والزلازل في برج Taipei

استفاد المهندسون من فكرة التخامد الحرج في تصميم أكثر المخمّدات شهرة في العالم، وهو برج Taipei 101 المُبيَّن في الشكل؛ ويتكوّن من كرة عملاقة ترتكز على مكابس هيدروليكية ضخمة تشبه قليلًا ممتصّ الصدمات في المركبات. وعند حدوث زلزال أو هبوب رياح عاتية تحاول إحداث ميلان في البرج باتّجاه معين؛ فإنّ الكرة تتحرّك في الاتجاه المعاكس للتقليل من ميلان البرج بحيث لا يشعر الشخص داخل البرج بتلك الاهتزازات.

صورة لبرج Taipei.

أبحثُ

للحركة التوافقية المخمدة تطبيقات أخرى في حياتنا اليومية. أستعين بمصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة ومنها شبكة الإنترنت، و أبحث عن بعض تلك التطبيقات، وأعد عرضًا تقديميًا يتضمن صورًا ومقاطع مرئية (فيديوهات) توضيحية، وأعرضه أمام زملائي/ زميلاتي.

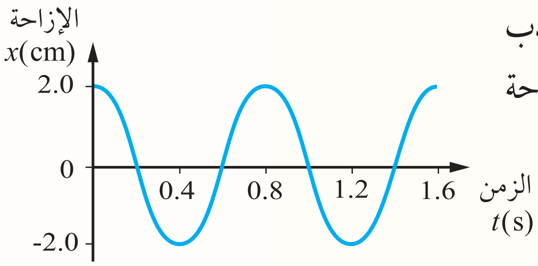
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما الشروط اللازم تحقيقها في الحركة التذبذبية؛ كي تكون حركة توافقية بسيطة؟ وما المعادلة التي تصف التغير في الإزاحة مع الزمن لحركة توافقية بسيطة؟

2. **أستخدمُ الأرقام:** بدأ جسم التذبذب في حركة توافقية بسيطة من أقصى إزاحة 15 cm، بحيث يُكمل الدورة الواحدة في فترة زمنية مقدارها 3.4 s أحسبُ:

أ. التردّد. ب. التردّد الزاوي. جـ. الإزاحة بعد 3.0 s من بدء الحركة.

3. **أستنتج:** يتحرّك جسم حركة توافقية بسيطة، فإذا بدأ التذبذب من أقصى إزاحة عن موقع اتّزانه ومُثّلت العلاقة بين الإزاحة والزمن بيانيًّا كما في الشكل المجاور، فأُجيب عمّا يأتي:



أ. ما مقدار كلّ من السعة والزمن الدوري.

ب. أكتبُ معادلة تغيّر الإزاحة مع الزمن لحركة الجسم.

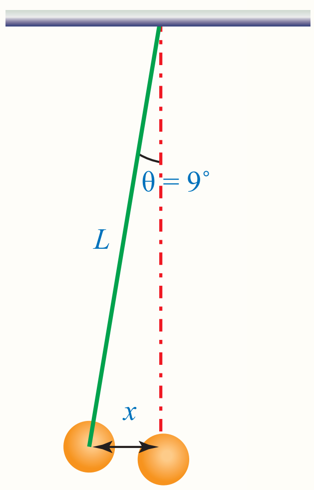
4. **التفكير الناقد:** يستخدم جدّ ليلى ساعة بندولية تعتمد على الزمن الدوري للبندول، وذات يوم لاحظ أنّ ساعته غير دقيقة؛ فنظرت ليلى إلى ساعتها فكانت 5:15 PM في حين كانت ساعة جدّها 5:00 PM . كيف يمكن لليلى ضبط ساعة جدّها على أنْ تقيس الزمن دون تقديم أو تأخير.

5. **أستخدمُ الأرقام:** طفل كتلته 15 kg يجلس في أرجوحة كتلتها 5 kg مربوطة بحبل مثبّت من الأعلى. إذا دُفِع الطفل مسافة صغيرة ثمّ تُرِك ليبدأ بالتحرّك حركة توافقية بسيطة زمنها الدوري 4 s فأحسبُ:

أ . التردّد الزاوي.

ب. طول الحبل.

6. **أستخدمُ الأرقام:** بندول بسيط كتلته 0.25 kg وطوله 80 cm. إذا أُزيح زاوية 9° على نحو ما هو مبيَّن في الشكل المجاور، ثمّ تُرِك يتذبذب في حركة توافقية بسيطة، فأحسبُ:



أ . الزمن الدوري.

ب. أقصى إزاحة x.

جـ. القيمة العظمى للسرعة.

التداخل والموجات الموقوفة
Interference and Standing Waves

الفكرة الرئيسة:

تتكوّن الموجات الموقوفة نتيجة تداخل موجتين ضمن شروط مُحدَّدة، وهي ظاهرة تحدث في الموجات الطولية والمستعرضة، ولها تطبيقات عدّة، منها: إنتاج النغمات في الآلات الموسيقية.

نتاجات التعلّم:

- أوظّف مفهوم فرق الطور لوصف الأثر الناتج من تراكب موجتين.
- أعرف الموجات الموقوفة على وتر مشدود.
- أحدّد شروط تكوّن الموجات الموقوفة.
- أحسب تردد النغمات الأساسية والنغمات الأخرى التي يهتزّ بها وسط ما (وتر مشدود، عمود هواء في أنبوب مفتوح الطرفين، عمود هواء في أنبوب مغلق الطرف الواحد).

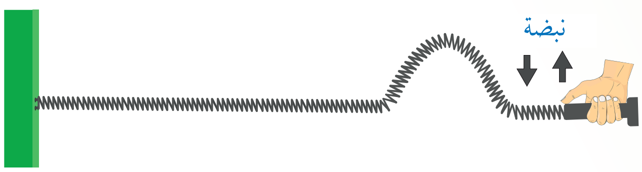
المفاهيم والمصطلحات:

تراكب	Superposition
موجة موقوفة	Standing Wave
عقدة	Node
بطن	Antinode
توافقات	Harmonics
تداخل بناء	Constructive Interference
تداخل هدام	Destructive Interference

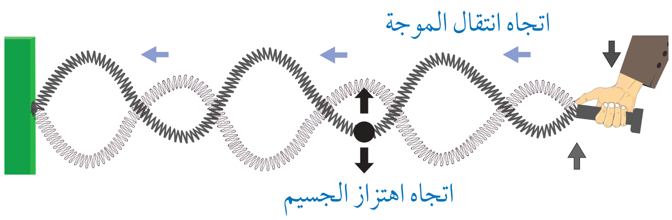
الحركة الموجية Wave Motion

تُعدّ الحركة الموجية من الظواهر الطبيعية التي نشاهدها كثيرًا في الحياة. ويبيّن الشكل (15/ أ) إحدى أبسط الطرق لتوليد الموجات؛ وذلك بتثبيت نابض من أحد طرفيه، وتحريك طرفه الآخر إلى الأعلى وإلى الأسفل. فإذا كان طرف النابض متصلًا بمولّد ذبذبات يهتزّ بانتظام بحركة توافقية بسيطة، فسيتولّد في النابض موجات دورية تتكرّر بانتظام.

عند مراقبة نقطة مفردة (جسيم) على النابض، نلاحظ أنه عند انتقال نبضة موجية من اليمين إلى اليسار فإن الجسيم يهتزّ إلى الأعلى وإلى الأسفل حول موقع اتزانه، كما يبيّن الشكل (15/ ب)، ونظرًا إلى أن مصدر الموجات يهتزّ بحركة توافقية بسيطة، فإن اهتزاز الجسيم يكون بحركة توافقية بسيطة أيضًا. ويتضح من الشكل أن الموجة – في هذه الحالة– يمكن تمثيلها بيانيًّا باقتران الجيب Sine Wave؛ لذا تُسمّى موجة جيبية.



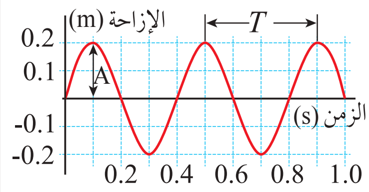
أ . يمكن توليد نبضة موجية عند تحريك طرف النابض إلى الأعلى أو إلى الأسفل.



ب. عند انتقال الموجة الجيبية الصادرة عن مصدر مهتزّ إلى اليسار، فإن كل جسيم على النابض يهتزّ إلى الأعلى وإلى الأسفل بحركة توافقية بسيطة.

الشكل (15): توليد موجات تنتقل عبر نابض.

يمكن تمثيل التغير في الإزاحة الرأسية لجسيم من جسيمات الوسط مع الزمن بيانيًّا كما يبيّن الشكل (16)، إذ يصف المنحنى كيف يتغيّر موقع هذا الجُسيم مع مرور الزمن. فالجسيم الواحد يصل إلى أقصى موقع رأسي له عن موقع الاتزان، ثمّ ينخفض إلى أسفل موقع، ثم يعود إلى موقع اتّزانه خلال دورة واحدة.



الشكل (16): تمثيل الحركة الموجية باستخدام منحنى (الإزاحة – الزمن).

توصف الحركة الموجية باستخدام المفاهيم نفسها المستخدمة لوصف الحركة التوافقية البسيطة، حيث تُعرَّف سَعة الموجة (A) بأنها أقصى إزاحة رأسية للجسيم عن موقع الاتزان. أما الزمن الدوري للموجة (T) فهو الزمن اللازم لمرور موجة كاملة خلال نقطة محددة، ويتناسب الزمن الدوري للموجة عكسيًّا مع تردّدها (f)، حسب العلاقة:

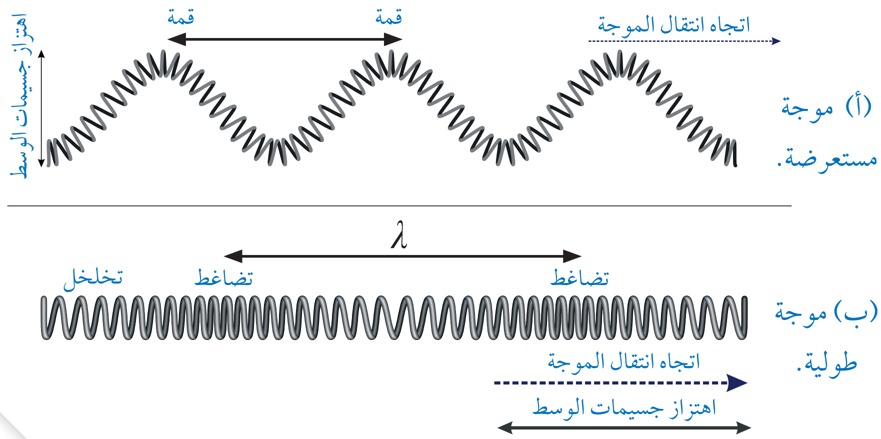
$$T = \frac{1}{f}$$

الموجات الميكانيكية Mechanical Waves

تُصنَّف الموجات المنتقلة عبر النابض بأنها موجات ميكانيكية، وهي موجات تحتاج إلى وسط مادي تنتقل خلاله. وتُقسَم الموجات الميكانيكية من حيث طريقة الاهتزاز الذي تُحدثه الموجات في جسيمات الوسط الناقل إلى نوعين، هما: الموجات المستعرضة، والموجات الطولية، ألاحظ الشكل (17).

من المفاهيم المهمة المستخدمة لوصف الحركة الموجية: الطول الموجي ويُرمَز إليه بالرمز (λ). ويبيّن الشكل (17/أ) أن الطول الموجي للموجة المستعرضة هو المسافة بين قمّتين متتاليتين، أو المسافة بين قاعين متتاليين. أمّا الطول الموجي للموجة الطولية فهو المسافة بين مركزَي تضاغطين متتاليين أو تخلخلين متتاليين، كما يبيّن الشكل (17/ ب).

أتحقّق: أوضح المقصود بكل من التردّد والزمن الدوري، ثم أصف العلاقة بينهما.



الشكل (17): الموجات المستعرضة والموجات الطولية.

أما سرعة الموجة في الوسط الواحد فهي ثابتة، ويعتمد مقدارها على نوع الوسط وصفاته، وترتبط سرعة الموجة (ورمزها (v)) بكلّ من التردّد والطول الموجي بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$v = f\lambda$$

أفكّر: يولد مصدر مهتز موجة جيبية تنتقل عبر نابض. عند مضاعفة تردد المصدر، ماذا يحدث لكل من: الطول الموجي للموجة، وسرعة الموجة؟

المثال 7

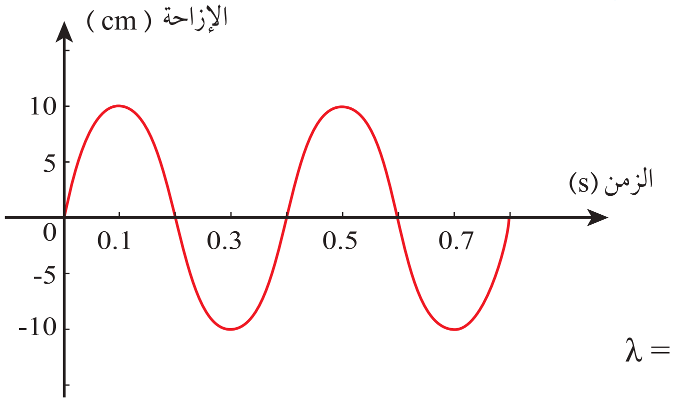
يبين الشكل (18) منحنى (الإزاحة – الزمن) لحركة موجية. بالاعتماد على البيانات المثبتة على الشكل، وإذا علمت أن الطول الموجي (10 cm). أجد ما يأتي:

أ . السعة

ب. الزمن الدوري

جـ. التردد

د . سرعة انتشار الموجات.



الشكل (18): منحنى (الإزاحة– الزمن) لحركة موجية.

المعطيات: منحنى (الإزاحة – الزمن)، $\lambda = 10$ cm

المطلوب: $A = ?,\ T = ?,\ f = ?,\ v = ?$

الحل:

أ. من الشكل أجد السعة؛ وهي أقصى إزاحة عن موقع الاتزان:

$$A = 10 \text{ cm}$$

ب. من الشكل أتوصل إلى أن زمن الدورة الواحدة (الزمن الدوري):

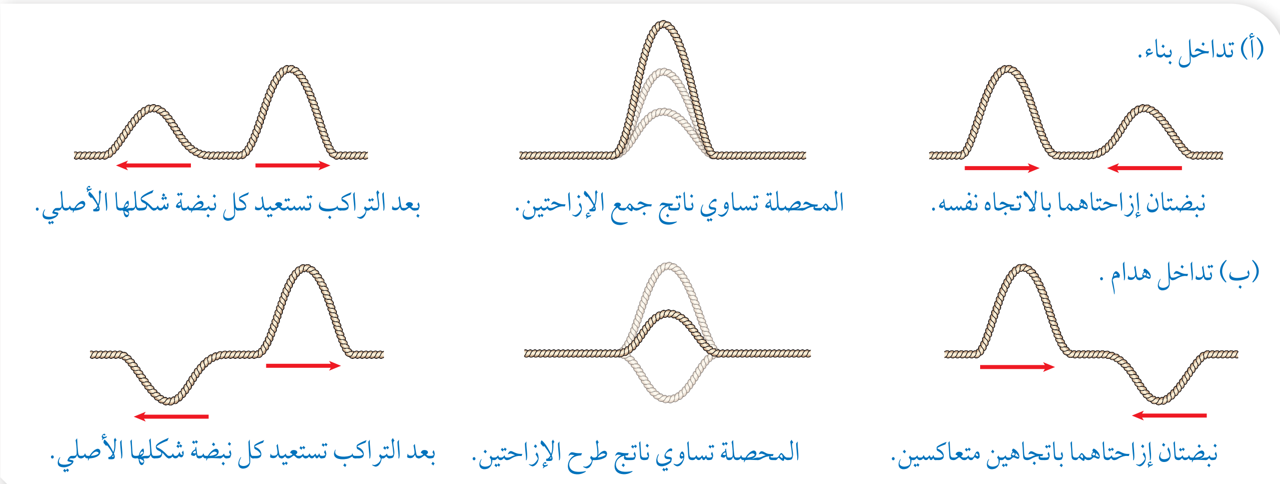
$$T = 0.4 \text{ s}$$

جـ. أحسب التردد من العلاقة:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.4} = 2.5 \text{ Hz}$$

د. أحسب السرعة من العلاقة:

$$v = f\lambda = 2.5 \times 10 = 25 \text{ cm/s}$$



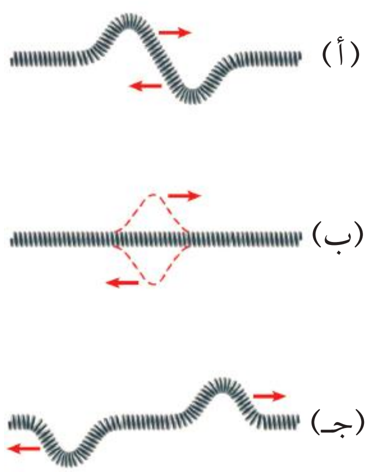
الشكل (19): التداخل البناء والتداخل الهدام

تداخل الموجات Interference of Waves

درست في صفوف سابقة ظواهر موجية، مثل: الانكسار، والانعكاس. وتعرفت ظاهرة تميّز الموجات عن الجسيمات المادية تُسمّى التداخل. تحدث ظاهرة التداخل عند التقاء موجتين أو أكثر عند النقطة نفسها، وفي اللحظة التي تلتقي فيها الموجتان تتشكّل موجة محصلة، وتكون الإزاحة الكلية عند أي نقطة مساوية لناتج جمع الإزاحتين الناتجتين من الموجتين، وتُعرَف هذه الطريقة في جمع الإزاحات الناتجة من التقاء موجتين أو أكثر **بمبدأ التراكب** **Superposition**. وبعدَ التراكبِ تستعيد كلّ من الموجتين المتراكبتين شكلها الأصلي الذي كانت عليه. ويبيّن الشكل (19) مثالًا على تداخل نبضتين (موجتين) تنتقلان عبر حبل، وتتحركان نحو بعضهما. وبدراسة الشكل أتوصّل إلى الأمور الآتية:

- عند التقاء موجتين إزاحتاهما بالاتجاه نفسه، فإن المحصلة تساوي ناتج جمع إزاحتيهما، وتكون السعة الناتجة أكبر من السعة لكل منهما، كما يبيّن الشكل (19/ أ). يُسمّى نمط التراكب هذا **التداخل البنّاء** **Constructive interference**.
- عند التقاء موجتين إزاحتاهما متعاكستان، مثلًا: قمة موجة مع قاع موجة، فإن المحصلة تساوي ناتج طرح الإزاحتين وتكون باتجاه الإزاحة الأكبر، كما يبيّن الشكل (19/ ب). يُسمّى نمط التراكب هذا **التداخل الهدّام** **Destructive interference**.

أتحقّق: نبضتان موجيّتان متساويتان في السعة تنتقلان في نابض، كما هو مُبيَّن في الشكل (20). أصف ما يحدث لحظة التقاء النبضتين وبعد التقائهما.



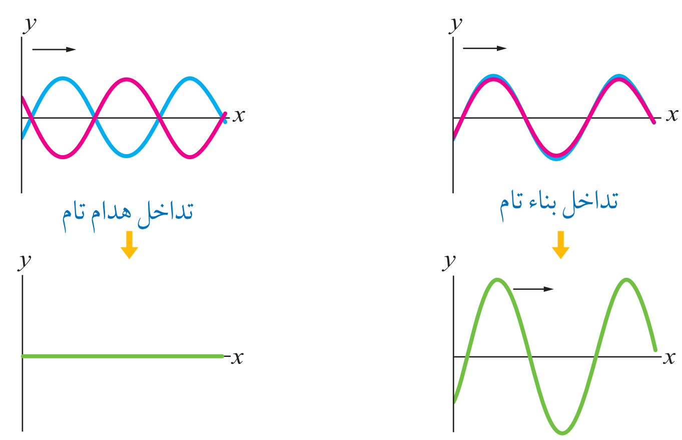
الشكل (20): تداخل نبضتين تنتقلان في نابض.

التداخل وفرق الطور Interference and Phase difference

ذكرنا سابقًا أن زاوية الطور (⌀) تحدّد موقع الجسم المهتزّ لحظة بداية الحركة. وعند تطبيق مبدأ التراكب على موجتين جيبيتين متساويتين في السعة والتردد والطول الموجي، فإن نمط التداخل الناتج من تراكب الموجتين يعتمد على مقدار الفرق في الطور بين الموجتين بالنسبة إلى بعضهما؛ أي يعتمد على مقدار فرق الإزاحة الذي تتقدّم فيه إحدى الموجتين عن الأخرى. ويبيّن الشكل (21) نمطَي تداخل خاصَّين لموجتين جيبيتين متساويتين في السعة والتردد والطول الموجي وتتحرّكان بالاتجاه نفسه، عبر وتر مشدود.

- الشكل (21/ أ): القمم والقيعان للموجة الأولى متطابقة تمامًا مع القمم والقيعان للموجة الثانية، فيكون فرق الطور بينهما صفرًا ($\varnothing = 0°$)، وتوصف الموجتان بأنهما متفقتان في الطور In phase. وتكون سعة الموجة الناتجة من التداخل البنّاء للموجتين ضعف سعة أيّ من الموجتين، ويُسمّى التداخل في هذه الحالة تداخلًا بنّاءً تامًّا.
- الشكل (21/ ب) : القمم للموجة الأولى متطابقة مع القيعان للموجة الثانية، فيكون فرق الطور بينهما يساوي ($\varnothing = \pi$ rad) أو (180°)، وتوصف الموجتان بأنهما مختلفتان في الطور Out of phase، وتكون الإزاحة المحصلة صفرًا؛ أي تلغي الموجتان بعضهما، ويُسمّى التداخل في هذه الحالة تداخلًا هدّامًا تامًّا.

أتحقّق: موجتان متساويتان في السعة والتردد والطول الموجي، وتتحركان بالاتجاه نفسه عبر نابض. ما الشرط اللازم للحصول على نمط:
- تداخل بنّاء تام.
- تداخل هدّام تام.



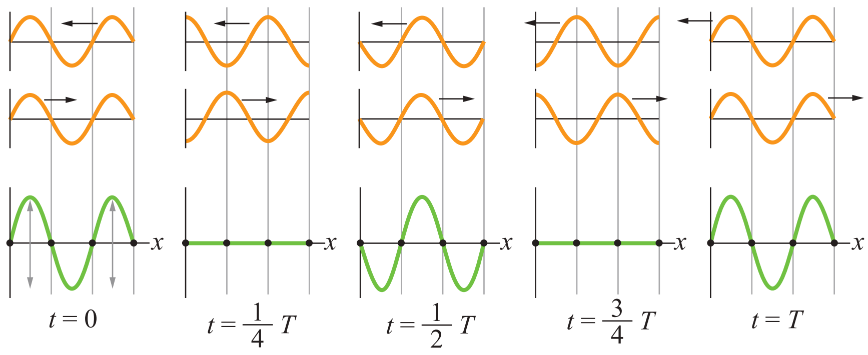
(أ) موجتان متفقتان في الطور.

(ب) موجتان مختلفتان في الطور.

الشكل (21): تداخل موجتين متساويتين في التردّد والطول الموجي والسعة وتتحرّكان بالاتجاه نفسه.

أ. موجتان متساويتان في السعة والتردد والطول الموجي تنتقلان باتجاهين متعاكسين عبر الوسط نفسه.

ب. نمط التداخل الناتج من تراكبهما يتكوّن من بطون وعقد.



الشكل (22): تداخل موجتين متساويتين في التردد والطول الموجي والسعة وتتحركان باتجاهين متعاكسين.

الموجات الموقوفة في الأعمدة والأوتار
Standing Waves in Strings and Columns

في الشكل (21) تعرفنا نمط تداخل موجتين جيبيتين تتحرّكان بالاتجاه نفسه. ماذا لو كانت الموجتان تتحركان باتجاهين متعاكسين؟ يمكننا مرة أخرى إيجاد المحصلة بتطبيق مبدأ التراكب.

يبيّن الشكل (22/ أ) خمسة مشاهد متتالية لموجتين جيبيتين؛ الأولى تنتقل عبر وتر مشدود من اليمين إلى اليسار، والثانية تنتقل عبر الوتر نفسه من اليسار إلى اليمين، ويبيّن الشكل (22/ ب) المحصلة الناتجة من تراكب الموجتين. ألاحظ أن نمط التداخل يتميز بوجود مواقع على طول الوتر تنعدم عندها الإزاحة تُسمّى **عقدًا nodes**. وفي منتصف المسافة بين العقد المتجاورة توجد مواقع يكون للإزاحة عندها قيم عظمى تُسمى **بطونًا antinodes**. ويُسمّى نمط التداخل في هذه الحالة **الموجة الموقوفة**؛ لأن الموجة الناتجة تبدو كأنها ثابتة على الوتر، ومواقع البطون والعقد لا تتغيّر أيضًا.

تنتج الموجات الموقوفة من تراكب موجتين ضمن شروط محدّدة، إذ تعرف **الموجات الموقوفة Standing waves** بأنها أنماط موجية ثابتة الأشكال تنتج من تراكب موجتين متساويتين في التردّد والطول الموجي والسعة، تنتقلان في اتّجاهين متعاكسين في الوسط نفسه. وهي ظاهرة تحدث في الموجات المستعرضة والموجات الطولية، وسنتناول مثالًا على الموجات المستعرضة الموقوفة وهي موجات الوتر، ومثالًا على الموجات الطولية الموقوفة وهي موجات الأعمدة الهوائية.

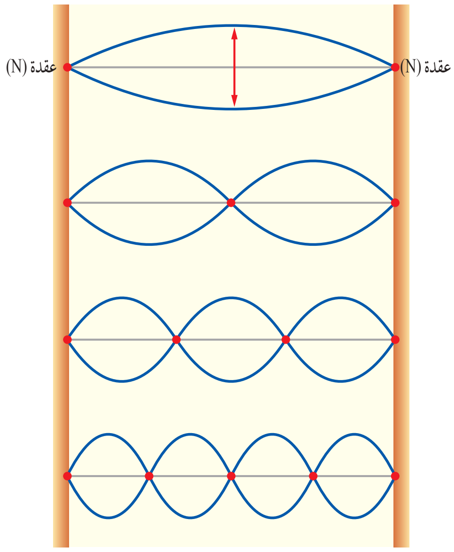
الموجات الموقوفة في وتر Standing Waves in a String

عند تثبيت وتر من طرفيه، وتوليد موجة جيبية عند أحد طرفيه، تتحرّك نحو اليمين، سوف تنعكس الموجة عند وصولها إلى الطرف الآخر لتتحرك نحو اليسار، ما يؤدي إلى حدوث تداخل بين الموجات الساقطة والمنعكسة. وعند تردّدات محدّدة يمكن الحصول على أنماط موجات موقوفة تتكوّن من عقد وبطون متتالية، مثل المبيَّنة في الشكل (23).

بدراسة الأنماط المبينة في الشكل (23)، ألاحظ أن طرفي الوتر يجب أن يكونا عقدتين، وأن البعد بين كل عقدتين متتاليتين يكافئ نصف الطول الموجي. هذا يعني أن الترددات المناسبة للحصول على موجات موقوفة هي الترددات التي تحقق هذين الشرطين.

يتضح من الشكل أيضًا أن النمط الأول يتكون من بطن وعقدتين، ويحدث هذا النمط عندما يكون طول الوتر مساويًا لنصف الطول الموجي. أما النمط الثاني فيتكون من بطنين وثلاث عقد، أي أن الطول الموجي للموجة المتكونة في النمط الثاني يساوي طول الوتر.... وهكذا لبقية الأنماط.

يمكن التوصل تجريبيًّا إلى علاقة رياضية لحساب الترددات اللازمة لإحداث موجات موقوفة على وتر بإجراء التجربة الآتية.



الشكل (23): أربعة أنماط مختلفة من الموجات الموقوفة المتكوّنة في وتر مشدود.

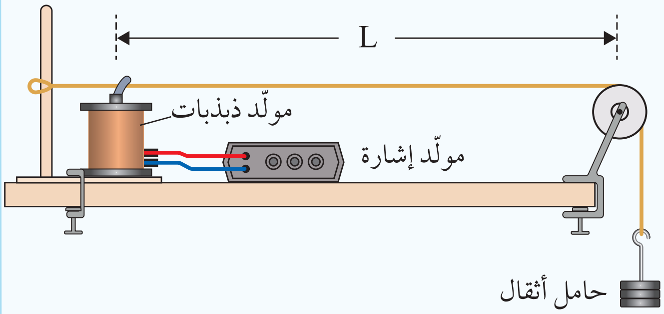
الربط بالموسيقى

عادةً ما تتكون الاهتزازات على أوتار الآلات الموسيقية، مثل الغيتار، من العديد من الموجات الموقوفة معًا في الوقت نفسه، ولكل منها طول موجي وتردد مختلف. لذا فإن الأصوات التي نسمعها من الآلات الوترية، حتى تلك التي تبدو وكأنها نغمة واحدة، تتكون في الواقع من ترددات متعددة.

التجربة 2

استقصاء تردّدات الموجات الموقوفة في وتر مشدود

الموادّ والأدوات: مولّد ذبذبات ومولّد إشارة، خيط نايلون، بكرة صغيرة، ملزمتان للتثبيت، حامل أثقال ومجموعة أثقال.



إرشادات السلامة: الحذر من سقوط الأجسام والأدوات على القدمين، ووضع النظّارات الواقية خوفًا من انقطاع الخيط.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُركّب أدوات التجربة على نحو ما يظهر في الشكل المجاور، باستخدام الملزمتين في تثبيت البكرة ومولّد الذبذبات في الطاولة.
2. أُعلّق كتلة (50 g) في الخيط، ثمّ أُشغّل مولّد الذبذبات على أقلّ تردّد ممكن.
3. **أجرب:** أبدأ بزيادة التردّد وأُراقب الخيط حتى تبدأ الموجات الموقوفة بالتكوّن، أُلاحظ عدد البطون والعُقد المتكوّنة، وأقيس المسافة بين العقدتين وأُدوّنها في جدول، ثمّ أُدوّن قياس التردّد.
4. **أجرب:** أزيد من مقدار التردّد، وأُراقب تكوّن نمط آخر من الموجات الموقوفة. أُلاحظ عدد البطون والعُقد المتكوّنة، وأقيس المسافة بين عقدتين وأُدوّنها في جدول، ثمّ أُدوّن قياس التردّد.
5. أُكرّر الخطوة (4)، وأُدوّن القياسات والملاحظات في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. **أصف** النمط الأول وأرسمُ شكل الموجة المتكوّنة، وأُحدّد عدد العقد والبطون فيها، ثمّ أُقارن بين طول الخيط وطول الموجة المتكوّنة.
2. **أصف** النمطين الثاني والثالث بالطريقة نفسها التي وصفت بها النمط الأول.
3. **أستنتجُ** علاقة بين طول الخيط وعدد العُقد والطول الموجي للنمط الأول، ثمّ للأنماط المتكوّنة جميعها.
4. **أستنتجُ** علاقة بين طول الخيط والطول الموجي والتردّد للنمط الأول، ثمّ للأنماط المتكوّنة جميعها.
5. **أتوقّع** أثر زيادة الكتلة المعلّقة في القياسات السابقة.

توصلت في التجربة السابقة إلى الترددات المناسبة للحصول على موجات موقوفة في وتر مشدود. ولاحظت وجود تردد أدنى للمصدر المولّد للموجات الموقوفة؛ وهو التردد اللازم للحصول على النمط الأول المكوّن من عقدتين وبطن واحد ويسمى التوافق الأول. وبما أن طول الوتر (L) في هذه الحالة يكون مساويًا لنصف الطول الموجي (λ_1)، فإن:

$$\lambda_1 = 2L$$

وباستخدام العلاقة ($v = \lambda f$)؛ حيث (v) سرعة الموجات، فإن تردد التوافق الأول يعطى بالعلاقة:

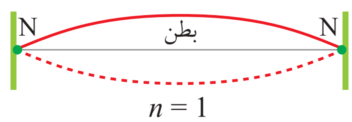
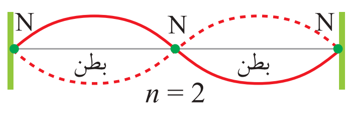
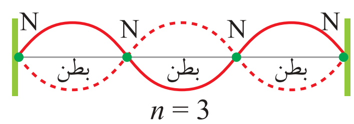
$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L}$$

حيث (f_1) التردد الأساسي للموجات الموقوفة المتكونة في الوتر، أي أن ترددات الموجات الموقوفة هي من مضاعفات (f_1) وتسمى التوافقات، حيث يمكن حساب تردد التوافق ذو الرقم (n) باستخدام العلاقة:

$$f_n = n\frac{v}{2L} = nf_1$$

ويبين الجدول (1) ملخصًا للطول الموجي والتردد لأنماط الموجات الموقوفة في وتر.

جدول 1: الطول الموجي والتردد للتوافقات الأول والثاني والثالث في وتر.

التوافق	الطول الموجي	التردد
أ 	$\lambda_1 = 2L$	$f_1 = \frac{v}{2L}$
ب 	$\lambda_2 = L$	$f_2 = 2f_1$
جـ 	$\lambda_3 = \frac{2}{3}L$	$f_3 = 3f_1$

المثال 8

أقلّ تردّد يمكن توليده في وتر قيثارة (196 Hz). أحسبُ التردّدين التاليين اللذين يمكن توليدهما في الوتر، مع ثبات العوامل الأخرى.

المعطيات: $f_1 = 196\ \text{Hz}\ ,\ n = 1$

المطلوب: $f_2 = ?\ ,\ f_3 = ?$

الحلّ:

أرسمُ الموجات الموقوفة في الوتر في التوافقات الثلاثة الأولى، على نحو ما في الشكل (24)، حيث:

$n = 1\ ,\ n = 2\ ,\ n = 3$

التوافق الأول:

$$f_n = \frac{nv}{2L} \Rightarrow f_1 = \frac{1 \times v}{2L}$$

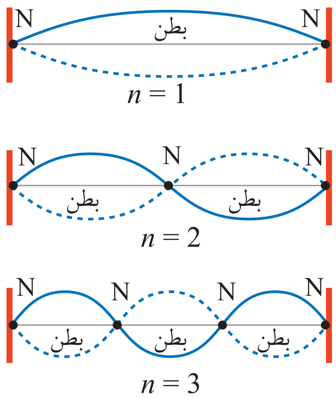
$$196 = \frac{1 \times v}{2L} \Rightarrow \frac{v}{2L} = 196$$

التوافق الثاني:

$$f_2 = \frac{2v}{2L} = 2 \times 196 = 392\ \text{Hz}$$

التوافق الثالث:

$$f_3 = \frac{3v}{2L} = 3 \times 196 = 588\ \text{Hz}$$



الشكل (24): موجات موقوفة في وتر قيثارة، في التوافقات الأول والثاني والثالث.

المثال 9

يُبيّن الشكل (25) موجات موقوفة في وتر طوله (75 cm)، وتردّد الموجات يساوي (18 Hz). أحسبُ كلًّا من:

أ. الطول الموجي.

ب. سرعة الموجة في الوتر.

المعطيات: الشكل، $f_3 = 18\ \text{Hz}\ ,\ L = 0.75\ \text{m}$

المطلوب: $\lambda_3 = ?\ ,\ v = ?$

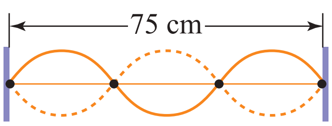
الحلّ:

أ. أجد من الشكل أنّ: $n = 3$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} = \frac{2 \times 0.75}{3} = 0.5\ \text{m}$$

ب. لحساب سرعة الموجة أستخدمُ العلاقة:

$$v = \lambda_n f_n = 0.5 \times 18 = 9\ \text{m/s}$$



الشكل (25): موجات موقوفة في وتر مشدود طوله (75 cm).

الشكل (26): عازف البوق.

الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية

Standing Waves in Air Columns

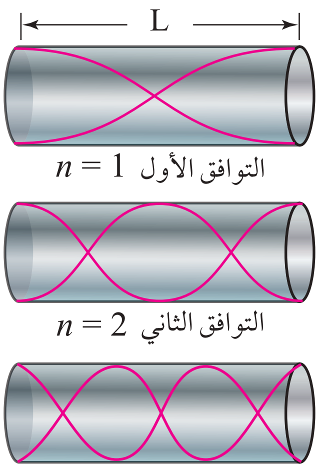
يُحدِث عازف البوق الذي يظهر في الشكل (26) اهتزازات عند طرف البوق، تنتقل خلال عمود الهواء إلى داخل البوق على شكل موجات صوتية، وتنعكس عن الطرف الثاني للبوق، سواء أكان مغلقًا أم مفتوحًا، فيحدث تداخل بين الموجات الصادرة والموجات المنعكسة، وتنشأ موجات طولية موقوفة في عمود الهواء، كتلك المستعرضة التي تحدث في وتر مشدود. يُغيّر العازف التردّد بتغيير طول عمود الهواء، عندما يفتح الصمام بضغط الأصبع؛ فتتغيّر النغمة.

أبحثُ

أبحث في مصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة، كيف تنعكس موجات الصوت في الأعمدة الهوائية عند الطرف المفتوح؟

الأعمدة الهوائية المفتوحة Open Air Columns

نقصد بعمود الهواء المفتوح أن يكون مفتوح البداية ومفتوح النهاية. تتكوّن الموجات الموقوفة في الأعمدة الهوائية المفتوحة على أنْ تكون سَعة الاهتزاز عظمى عند نهايتَي الأنبوب، وتظهر في الشكل (27) على هيئة بطون. تنشأ الموجات الموقوفة بتردّدات مختلفة بما يُحقّق مجموعة من التوافقات، فنحصل على التوافق الأول والثاني والثالث، وغيرها، كما في حالة الوتر تمامًا. يُحسب الطول الموجي للموجات الصوتية الموقوفة للتوافق (n)



الشكل (27): تمثيل بياني لموجات طولية موقوفة في عمود هواء مفتوح النهاية.

فـي عمـود الهـواء المفتـوح النهايـة وفقًـا للعلاقـة المسـتخدمة فـي الموجـات المسـتعرضة.

$$n\lambda_n = 2L$$

وكذلك التردّد للتوافق رقم (n) يساوي:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} = nf_1$$

حيث ($\frac{v}{2L} = f_1$) تردد التوافق الأول

الأعمدة الهوائية المغلقة Closed Air Columns

نقصـد بعمـود الهـواء المغلـق أن يكـون مفتـوح البدايـة ومغلـق النهايـة. تتكـوّن الموجـات الموقوفـة فـي الأعمـدة الهوائيـة المغلقـة النهايـة، علـى أنْ تكـون سـعة الاهتـزاز صفـرًا عنـد النهايـة المغلقـة للأنبـوب، وتظهـر فـي الشـكل (28) علـى هيئـة عُقـد. وتختلـف التوافقـات الناتجـة هنـا عمّـا سـبق، إذ تتكـوّن التوافقـات الفرديـة فقـط، وذلك كـي يتحقّق تكـوّن العُقد عنـد النهاية المغلقـة للأنبوب. ويُحسـب الطـول الموجـي للتوافـق (n)، حيـث (n) عـدد صحيـح فـردي، وفقًـا للعلاقـة:

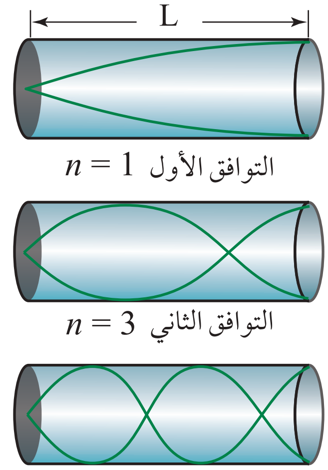
$$n\lambda_n = 4L$$

وكذلك التردّد للتوافق رقم (n) يساوي:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{4L}$$

أتحقّق: ما الفرق بين التوافقات الناتجة في عمود الهواء المغلق وعمود الهواء المفتوح.

أعـدّ فيلـمًا قصـيرًا باسـتعمال برنامـج صانـع الأفـلام (movie maker) يعـرض التوافقـات المختلفـة التـي يتغـيّر فيهـا الـتردّد والطـول الموجـي في كلّ مـرّة، ويوضّـح كيـف يتغـيّر نمـط الموجـات الموقوفـة بتغـيّر الطـور بـين الموجتـين المتداخلتين، ثـم بتغيـير الـتردّد.



الشكل (28): تمثيل بياني لموجات طولية موقوفة في عمود هواء مغلق النهاية.

المثال 10

أجرت حنين تجربة لقياس طول موجة الصوت المتولّدة في عمود هواء مغلق النهاية، طوله (62.5 cm). إذا كان أقلّ تردّد (136 Hz)، فأحسبُ كلًّا من:

أ . الطول الموجي.

ب. سرعة الموجة في الهواء داخل الأنبوب.

جـ. التردّد اللاحق.

المعطيات: $f_1 = 136\ \text{Hz}\ ,\ \text{L} = 0.625\ \text{m}\ ,\ \ n = 1$

المطلوب: $\lambda_1 = ?\ ,\ \ v = ?\ ,\ \ f_3 = ?$

الحلّ:

أ . الطول الموجي للتوافق الأول في العمود المغلق:

$$n\lambda_n = 4\text{L}$$

$$1 \times \lambda_1 = 4 \times 0.625$$

$$\lambda_1 = 2.5\ \text{m}$$

ب. سرعة الموجة في الهواء داخل الأنبوب:

$$v = \lambda_n f_n = 2.5 \times 136 = 340\ \text{m/s}$$

جـ. يحدث التردّد اللاحق عند $(n = 3)$؛ لأنّ العمود مغلق النهاية.

$$f_n = \frac{nv}{4\text{L}} = \frac{3 \times 340}{4 \times 0.625} = 408\ \text{Hz}$$

أبحثُ

أبحث في مصادر المعرفة الموثوقة والمتاحة في الآلات الموسيقية المختلفة، وأحصر من بينها آلات النفخ، ثمّ أستخرجُ منها أمثلة على الأعمدة المفتوحة النهاية والأعمدة المغلقة النهاية.

تمرين

أُقارن بين الموجات الصوتية الموقوفة المتولّدة في التوافق الأول في عمودَي هواء طول كلّ منهما (90 cm)؛ الأول مفتوح النهاية والثاني مغلق النهاية، علمًا بأنّ سرعة الصوت في الهواء (340 m/s)؛ من حيث:

أ . الطول الموجي.

ب. التردّد.

مراجعة الدرس

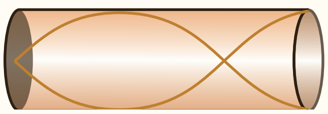
1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بالموجات الموقوفة، ثم أذكرُ شروط تكوّنها في وتر مشدود.

2. **أُقارن** بين أنماط التوافقات المختلفة للموجات الموقوفة التي تنشأ في الأعمدة الهوائية المفتوحة، وتلك التي تنشأ في الأعمدة الهوائية المغلقة.

3. **أستنتج:** ما أهمّية تغيير طول الوتر عند العزف على آلة موسيقية وترية مثل العود؟

4. **أستنتج:** يهتزّ وتر مشدود محدثًا موجات موقوفة فيه، مشكّلة (3) عقد وبطنين. أُعبّر عن الطول الموجي والتردّد بدلالة كلّ من طول الوتر وسرعة الموجة.

5. **أستخدم الأرقام:** إذا كان تردّد التوافق الثاني الذي يمكن توليده في وتر قيثارة هو (392 Hz). فأحسبُ الترددين الأول والثالث اللذين يمكن توليدهما في الوتر نفسه مع ثبات بقيّة العوامل الأخرى.



6. **أستخدم الأرقام:** يُبيّن الشكل رسمًا بيانيًّا لموجات موقوفة في عمود هواء مغلق النهاية طوله (0.6 m). إذا علمتُ أنّ سرعة الصوت في الهواء (340 m/s)، فأحسبُ كلًّا من:

أ . الطول الموجي.

ب. تردّد الموجات الموقوفة.

التداخل والحيود لموجات الضوء
Interference and Diffraction of Light Waves

الدرس 3

الفكرة الرئيسة:

افترض العلماء أنّ للضوء طبيعة مزدوجة (جسيمية-موجية)؛ إذ تظهر صفاته الجسيمية في بعض الظواهر الفيزيائية كالتأثير الكهرضوئي، وتظهر صفاته الموجية في ظواهر فيزيائية أخرى كالتداخل والحيود.

نتاجات التعلم:

- أوضّح الطبيعة الموجية للضوء بوصفه موجات كهرمغناطيسية.
- أحدد مواقع الأهداب المضيئة والمعتمة الناتجة عن تداخل موجات الضوء.
- أعبّر عن حيود موجات الضوء بمعادلة.
- أستخدم المطياف الضوئي ومحزوز الحيود لتحليل الضوء الأبيض.
- أتنبّأ بمواضع الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة في نمط الحيود الناتج من إضاءة محزوز حيود بضوء أحادي اللون.

المفاهيم والمصطلحات:

ضوء متناغم Coherent Light

محزوز حيود Diffraction Grating

طبيعة الضوء The Nature of Light

تطورت النظرة إلى الضوء على يد كثير من العلماء. فقد افترض العالم نيوتن أن الضوء سيل من الجسيمات الصغيرة، واستخدم نموذجه الجسيمي في تفسير ظاهرتي انعكاس الضوء وانكساره. ثم اقترح العالم هيغنز أن الضوء موجات، وأثبت أن النموذج الموجي للضوء يمكنه أيضًا أن يُفسر ظاهرتي الانعكاس والانكسار. ثم جاءت بعد ذلك، تجربة العالم يانغ لتقدّم دليلًا تجريبيًّا قاطعًا على أن للضوء طبيعة موجية، حيث أثبت أن الأشعة الضوئية يمكنها أن تتداخل؛ هذا السلوك الذي لا يمكن تفسيره باستخدام النموذج الجسيمي. بالإضافة إلى ذلك، أدت الكثير من الإنجازات خلال القرن التاسع عشر إلى قبول النموذج الموجي للضوء، وأهمها ماتوصل إليه العالم ماكسويل بأن الضوء موجات كهرمغناطيسية.

في بدايات القرن العشرين، رُصدت ظواهر جديدة للضوء لم يتمكن النموذج الموجي من تفسيرها، مثل الظاهرة الكهرضوئية، حيث تمكن العالم آينشتين من تفسيرها معتمدًا على فرضية وضعها العالم بلانك تفترض أن للضوء طبيعة جسيمية.

في النهاية، توصل العلماء أن للضوء طبيعة مزدوجة؛ موجية وجسيمية. وسنتناول في هذا الدرس ظاهرتين توضحان الطبيعة الموجية للضوء، هما: التداخل، والحيود.

الطبيعة الموجية للضوء Wave Nature of Light

سبق أن درست أن الموجات نوعان؛ ميكانيكية، وكهرمغناطيسية. ويعد الضوء موجات كهرمغناطيسية، وأهم صفاتها:

- تتكوّن من مجالين؛ كهربائي، ومغناطيسي، يتذبذبان باتجاهين متعامدين، وهما متساويان في تردّدهما الذي يمثّل تردد الموجة نفسها.
- هي موجات مستعرضة يتعامد فيها اتجاه تذبذب كلا المجالين؛ الكهربائي، والمغناطيسي، مع اتجاه انتشارها.
- تنتقل في الفراغ بسرعة $(c = 3 \times 10^8\ m/s)$ مهما كان تردّدها، وتقل هذه السرعة في الأوساط المادية.

تداخل موجات الضوء Interference of Light Waves

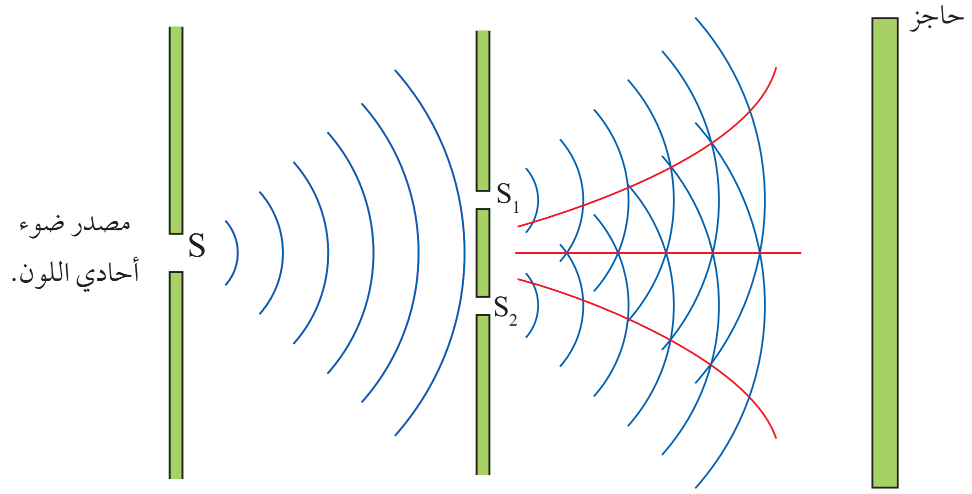
تعلمت أنّ ظاهرة التداخل تحدث في الموجات الميكانيكية الطولية والمستعرضة، وهي تحدث أيضًا في الموجات الكهرمغناطيسية، لكن ضمن شروط معينة.

عند وضع مِصباحين ضوئيين متجاورين كما في الشكل (29) ومراقبة الضوء الصادر منهما؛ لا يمكننا مشاهدة تداخل الضوء؛ وذلك لعدم وجود فرق ثابت في الطور بين الموجات الصادرة عن المصباحين. فالمصباح الضوئي العادي يُصدر ضوءًا طوره ثابت لمدة زمنية لا تتجاوز نانو ثانية (1.0 ns)، ثم بعد ذلك يتغير ثابت الطور تغيرًا عشوائيًّا، ما يعني أن نمط تداخل معين يمكن أن يحدث خلال هذه المدة فقط. ومثل هذه المصادر الضوئية تُسمّى مصادر غير متناغمة.

كي يظهر نمط تداخل منتظم يمكن ملاحظته في موجات الضوء، لا بدّ من أن تكون موجات المصدرين الضوئيين متناغمة **Coherent**، وهي موجات لها التردد نفسه وتحافظ على فرق ثابت في الطور بينها.

أتحقّق: هل يكون مصدران ضوئيان أحدهما أخضر والثاني أحمر متناغمين أم لا؟ أُوضّح إجابتي.

الشكل (29): مصباحان ضوئيان عاديان، يصدران ضوءًا أبيض.



الشكل (30): تجربة يانغ.

تداخل الشق المزدوج Double-Slit Interference

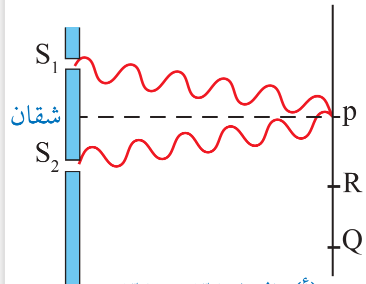
يمكن الحصول على مصدرَي ضوء متناغمين؛ بوضع حاجز يحتوي على شقّين أمام مصدر ضوئي أحادي اللون، بهذه الطريقة فإنّ الضوء الصادر من الشقّين يكون أحادي اللون ومتناغمًا. وقد أجرى العالم توماس يانغ تجربته الشهيرة التي أسهمت في إثبات الطبيعة الموجية للضوء؛ إذ مرّر الضوء خلال شقّ صغير في قطعة من الورق فحصل على شعاع رفيع، ثم استخدم بطاقة ورقية رقيقة تحتوي على شقّين ضيّقين متوازيين ومتجاورين، فنفذت موجات الضوء من الشقّين باتّجاه الحاجز. لاحظ يانغ نمط تداخل كالذي ينتج من تداخل موجات الماء.

يمكن الآن إجراء تجربة مماثلة لتجربة يانغ، باستخدام ضوء أحادي اللون، على نحو ما يُبيّن الشكل (30).

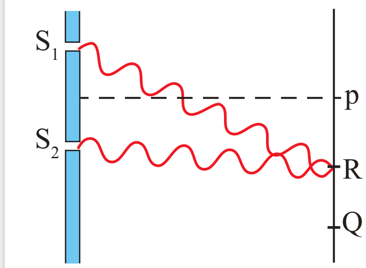
تنفذ موجات الضوء من الشقّين S_1، S_2 باتّجاه الحاجز ويكون لها الطور نفسه، لأنّها ناتجة من المصدر نفسه، يحدث لموجات كل مصدر حيود يشبه حيود موجات الماء، فتصل إلى المواقع كافّة على الحاجز. عندما يصدر عن الشقّين شعاعان ضوئيان يلتقيان عند نقطة على الحاجز، فإنّهما يتداخلان تداخلًا بنّاءً أو

هدّامًا، حسب فرق الطور بينهما، على النحو الآتي:

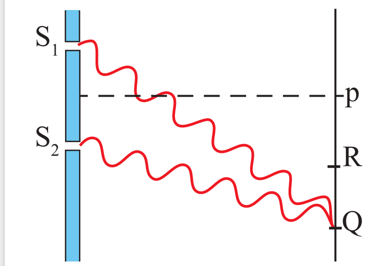
1. يتكوّن عند النقطة (P) في الشكل (31/ أ) هدب مضيء ناتج من تداخل بنّاء لشعاعين متّفقين في الطور، لأنّهما قطعا مسافة متساوية، ويُسمّى الهدب المركزي.
2. يتكوّن عند النقطة (R) في الشكل (31/ ب) هدب معتم ناتج من تداخل هدّام لشعاعين الفرق في الطور بينهما يساوي (π)؛ لأنّ فرق المسار بينهما ($\frac{1}{2}\lambda$).
3. يتكوّن عند النقطة (Q) في الشكل (31/ جـ) هدب مضيء ناتج من تداخل بنّاء لشعاعين متّفقين في الطور؛ لأنّ فرق المسار بينهما موجة كاملة (λ).
4. تتكوّن الأهداب المضيئة والمعتمة على جانبَي الهدب المركزي، وتكون متماثلة، وتفصلها مسافات متساوية، ويمكن الاطّلاع عليها في الجدول (2) الآتي:



(أ): التقاء قمّة مع قمّة.



(ب): التقاء قمّة مع قاع.

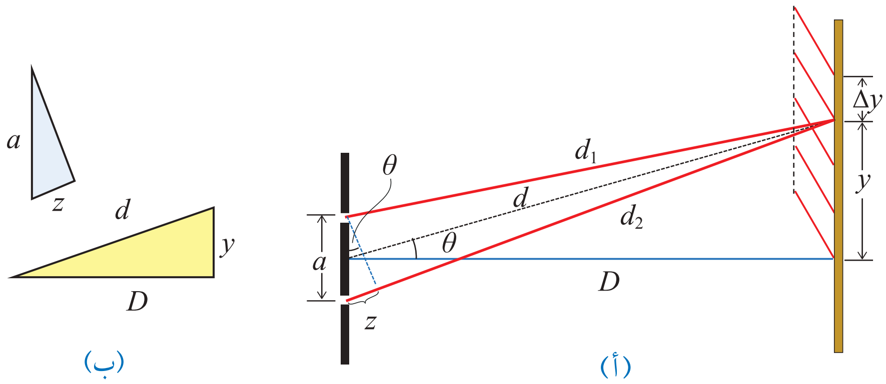


(جـ): التقاء قمّة مع قمّة.

الشكل (31): أهداب مضيئة ناتجة من تداخل بنّاء، وأهداب معتمة ناتجة من تداخل هدّام.

جدول 2: الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة وفرق المسار في تجربة يانغ.

الهدب	n	فرق المسار	الفرق في الطور بين الشعاعين
المضيء المركزي	0	صفر	0
المعتم الأول		$\frac{\lambda}{2}$	π
المضيء الأول	1	λ	0
المعتم الثاني		$\frac{3\lambda}{2}$	π
المضيء الثاني	2	2λ	0



الشكل (32):

(أ): مسارات الأشعّة المتداخلة، وتكوّن الأهداب المضيئة الناتجة من التداخل على الحاجز.

(ب): تشابه المثلثات.

يرتبط تكوّن الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة على الحاجز بعلاقات رياضية مع العوامل التي أدّت إلى تكوّن هذه الأهداب. إذا كانت المسافة بين الشقّين (a)، كما يُبيّن الشكل (32/ أ)، واستُخدم في التجربة ضوء له طول موجي (λ)، ووضع الحاجز على مسافة (D) عن الشقّين، فتتكوّن عليه أهداب مضيئة يرتفع كلّ هدب بمقدار (y) عن الهدب المركزي؛ نتيجة وجود فرق في مساري الموجات (d_2, d_1) مقداره (z). ألاحظ الشكل (32/ ب) الذي يُبيّن مثلّثين متشابهين حصلنا عليهما من الشكل السابق؛ إذ تتساوى زوايا المثلّثين، فتكون العلاقة بين نسب أضلاعهما:

$$\frac{z}{a} = \frac{y}{d}$$

نظرًا إلى أنّ المسافة الرأسية (y) صغيرة جدًّا بالمقارنة مع بعد الحاجز عن الشقين (D)، فإن الزاوية (θ) تكون صغيرة، ويمكن افتراض ($d \cong D$)، وعندها، فإنّ:

$$\frac{z}{a} = \frac{y}{D}$$

بالانتقال من الهدب المضيء الثالث (المُبيَّن في الشكل) إلى الهدب المضيء الرابع، تزداد المسافة (y) بمقدار (Δy)، وتزداد المسافة (z) بمقدار طول موجي واحد، فتصبح العلاقة السابقة على الصورة:

$$\frac{z+\lambda}{a} = \frac{y+\Delta y}{D} \Rightarrow \frac{z}{a} + \frac{\lambda}{a} = \frac{y}{D} + \frac{\Delta y}{D}$$

بطرح العلاقة السابقة من العلاقة الأخيرة نحصل على:

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{\Delta y}{D} \Rightarrow \Delta y = \frac{\lambda D}{a}$$

تربط هذه العلاقة المسافة الفاصلة بين هدبين مضيئين متتاليين على الحاجز Δy مع الطول الموجي للضوء المستخدم في التجربة، بمعرفة

الربط بالرياضيات

يتشابه المثلّثان عندما تكون زوايا المثلث الأول مساوية لزوايا المثلّث الثاني، وينتج من التشابه أن يكون ناتج قسمة كلّ ضلع من المثلث الأوّل على الضلع الذي يقابله من المثلث الثاني يساوي مقدارًا ثابتًا، وهذا يختلف عن تطابق المثلّثات الذي يتطلّب المساواة في الزوايا والأضلاع والمساحة.

أُصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضّح طريقة حدوث التداخل لموجات الضوء بعد نفاذها من شقّين متجاورين، وظهور الأهداب على حاجز، ثم أشاركه مع زملائي/ زميلاتي في الصف.

كلّ من المسافة بين الشقّين، وبعد الحاجز عنهما. حيث تكون المسافة (Δy) بحدود الملمتر أو أجزاء منه، وهي أكبر بكثير من الطول الموجي الذي يقاس بوحدة نانومتر ولا يمكن رصده بالعين.

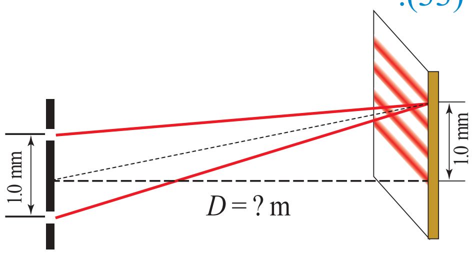
✓ **أتحقّق:** تخرج الأشعّة الضوئية جميعها من الشقّين وهي متفقة في الطور. ما الذي يؤدي إلى حدوث تداخل هدّام تنتج منه أهداب معتمة على الحاجز؟

المثال 11

يُصدر مصدر ليزر ضوءًا أحادي اللون طوله الموجي (650 nm)، وعند نفاذ الضوء من شقّين متجاورين تفصلهما مسافة (1.0 mm). حدث نمط تداخل نتجت عنه أهداب مضيئة تكوّنت على حاجز، فكانت بمعدل ثلاثة أهداب في مسافة رأسية مقدارها (1.0 mm)، كما يبيّن الشكل (33).

أ . ما مقدار المسافة بين الحاجز والشقّين؟

ب. عند إبعاد الحاجز إلى مثلَي المسافة السابقة، كم ستصبح المسافة بين هدبين مضيئين متتاليين؟



الشكل (33): أهداب مضيئة ناتجة من تداخل ضوء ليزر.

المعطيات: $\lambda = 650$ nm, $a = 1.0$ mm, $y = 1.0$ mm

المطلوب: $y = ?$, $D = ?$

الحلّ:

لإيجاد المسافة بين هدبين مضيئين متتاليين على الحاجز:

$$y = 1.0 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

$$\Delta y = \frac{1.0 \times 10^{-3}}{3} = 3.3 \times 10^{-4}\ \text{m}$$

أ . بُعد الحاجز عن الشقّين (D):

$$\Delta y = \frac{\lambda D}{a} \Rightarrow D = \frac{a\,\Delta y}{\lambda}$$

$$D = \frac{1.0 \times 10^{-3} \times 3.3 \times 10^{-4}}{650 \times 10^{-9}} = 0.51\ \text{m}$$

ب. العلاقة بين (y) و (D) طردية، ونظرًا إلى أن العوامل الأخرى لم تتغيّر عند تكرار التجربة، فإنّ:

$$\frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} = \frac{D_2}{D_1} \Rightarrow \frac{\Delta y_2}{\Delta y_1} = 2 \Rightarrow \Delta y_2 = 2\Delta y_1$$

$$\Delta y_2 = 3.3 \times 10^{-4} \times 2 = 6.6 \times 10^{-4}\ \text{m}$$

المثال 12

أُجريت تجربة يانغ لقياس الطول الموجي لضوء ليزر أخضر، على نحو ما في الشكل (34). كانت المسافة بين الشقّين (1.3 mm)، ووضع الحاجز على بعد (94.5 cm) منهما، وعند قياس المسافة بين الهدبين المضيئين الأول والثاني كانت (0.4 mm). أحسبُ مقدار الطول الموجي للضوء الأخضر.

الشكل (34): مصدر ضوء ليزر أخضر (أحادي اللون).

المعطيات: $\Delta y = 0.4\ \text{mm}\ ,\ a = 1.3\ \text{mm}\ ,\ D = 94.5\ \text{cm}$

المطلوب: $\lambda = ?$

الحلّ:

$$\lambda = \frac{a\Delta y}{D} = \frac{1.3 \times 10^{-3} \times 0.4 \times 10^{-3}}{94.5 \times 10^{-2}}$$

$$\lambda = 550 \times 10^{-9}\ \text{m} = 550\ \text{nm}$$

التداخل في الأغشية الرقيقة Interference in Thin Films

نشاهد أنماط تداخل موجات الضوء في الأغشية الرقيقة، مثل طبقة رقيقة من الزيت أو أحد المشتقات النفطية على سطح الماء، أو غشاء فقاعة الصابون. فعندما يسقط ضوء أبيض على هذه الأغشية، نلاحظ ألوانًا مختلفة كما في الشكل (35/ أ). تنتج من تداخل الموجات المنعكسة عن طبقتي الغشاء الداخلية والخارجية.

طلاء عدسات آلات التصوير: تطلى عدسات آلات التصوير بطبقة رقيقة من مادة شفافة لها معامل انكسار أقل من معامل انكسار زجاج العدسة، ويكون سمك هذه الطبقة بمقدار ربع طول موجي، فينتج من ذلك أن تتداخل الأشعة المنعكسة عن وجهي الطلاء الخارجي والداخلي تداخلًا هدامًا، ما يقلل من انعكاس الضوء عن العدسة بنسبة كبيرة جدًّا، وهذا يزيد من كمية الضوء التي تعبر العدسة ويحسن كفاءة التصوير. عند تحديد سمك طبقة الطلاء تكون المقارنة مع متوسط الأطوال الموجية للضوء المرئي، ما يجعل الأشعة التي تقع في طرفي الطيف المرئي تنعكس عن الطلاء. ألاحظ انعكاس اللون البنفسجي عن العدسة في الشكل (35/ ب).

(35 / أ) تداخل موجات الضوء المنعكس عن غشاء فقاعة الصابون.

(35 / ب) عدسة آلة تصوير مطلية بطبقة رقيقة مانعة للانعكاس.

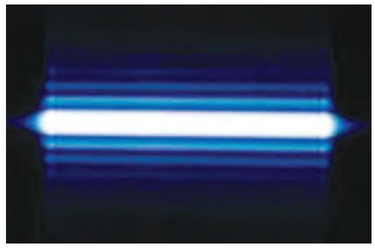
الشكل (35): التداخل في الأغشية الرقيقة.

حيود موجات الضوء Diffraction of Light Waves

الحيود ظاهرة موجية تحدث للموجات الميكانيكية وللموجات الكهرمغناطيسية أيضًا، مثل موجات الضوء، كما لاحظنا في تجربة يانغ بعد أن نفذ الضوء من الشقّين (S_1, S_2).

الحيود عبر شقّ ضيّق Diffraction due to a Narrow Slit

عند مرور شعاع ضوئي من شقّ ضيّق، ينتشر الضوء على جانبَي الشق، وإذا أتيح للضوء السقوط على حاجز بعيد مقابل للشقّ؛ فإنّه يكوّن أهدابًا مضيئة وأخرى معتمة، على نحو ما يُبيّن الشكل (36). تتكوّن هذه الأهداب نتيجة حدوث تداخل بنّاء وآخر هدّام لأشعّة الضوء التي نفذت خلال طرفَي الشقّ الضيّق. أي إنّ ظاهرة الحيود تؤدّي إلى التقاء الموجات، ما يُسبّب حدوث تداخل بينها.

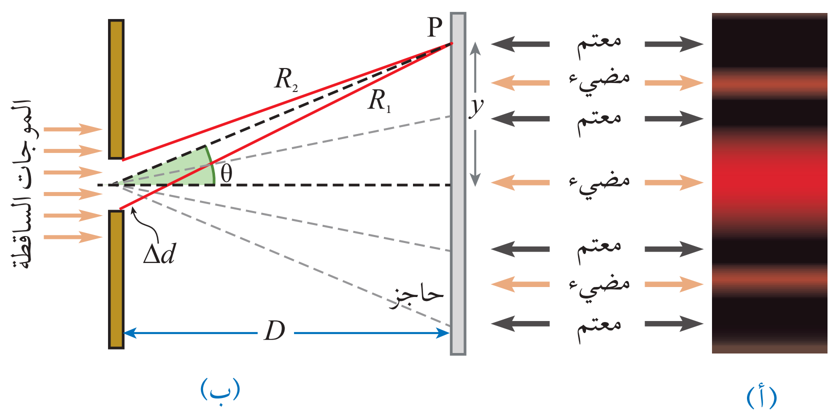


الشكل (36): تكوّن نمط من الأهداب المضيئة والمعتمة على حاجز، نتيجة ظاهرة الحيود.

أفترضُ أن R_1, R_2 شعاعان يتّجهان من طرفَي الشقّ إلى نقطة (P) على الحاجز يظهر عندها هدب معتم، وتبعد إلى الأعلى عن مركز الحاجز مسافة y، والمسافة بين الشقّ والحاجز D، على نحو ما يُبيّن الشكل (37). أعلمُ أنّ الموجات جميعها تغادر الشقّ وهي متّفقة في الطور كونها صادرة من المصدر نفسه. وهذا يعني أن تكوّن الهدب المعتم عند التقاء الشعاعين R_1, R_2 ناتج من قطع أحدهما مسافة أكبر من الثاني بفرق مسار مقداره $\Delta d = \frac{\lambda}{2}$.

لتحليل الحيود الناتج نقسم الفتحة إلى جزأين؛ كل جزء اتساعه نصف اتساع الشقّ $(\frac{a}{2})$، كما يظهر في الشكل (38)، ونأخذ شعاعين مثل (1) و(3) يتجهان نحو النقطة (P) على الحاجز، وينتج منهما هدب معتم بسبب التداخل الهدّام، حيث يكون فرق المسار بينهما نصف طول موجي:

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} = \frac{a}{2}\sin\theta \rightarrow \sin\theta = \frac{\lambda}{a}$$



الشكل (37): يبيّن الشكل
أ . حيود موجات الضوء بعد مرورها من شقّ ضيق وسقوطها على حاجز.
ب. تكوّن نمط تداخل من أهداب مضيئة وأخرى معتمة على الحاجز.

ونظرًا إلى أنّ الزاوية θ صغيرة، نجد أنّ:

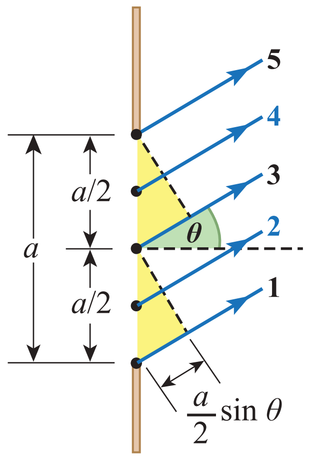
$$\sin\theta \cong \tan\theta = \frac{y}{D}$$

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{y}{D} \Rightarrow \lambda = \frac{ay}{D}$$

بصورة عامة تتكوّن الأهداب المعتمة على الحاجز على جانبي الهدب المركزي وفق العلاقة الآتية:

$$a\sin\theta = n\lambda$$

حيث n عدد صحيح.



الشكل (38): مسارات الأشعة بعد حيودها وانحرافها باتجاه النقطة (P) على الحاجز.

أتحقّق: ما الفرق بين ظاهرتَي التداخل والحيود؟

المثال 13

نفذ ضوء متناغم من شقّ صغير اتّساعه 16 μm، فتكوّنت أهداب حيود على حاجز يبعد عن الشقّ مسافة 2 m، إذا كان الهدب المعتم الأول يبعد لأعلى عن مركز الحاجز مسافة 4 cm؛ فأحسبُ الطول الموجي للضوء.

المعطيات: $y = 4\ \text{cm}\ ,\quad a = 16\ \mu\text{m}\ ,\quad D = 2\ \text{m}$

المطلوب: $\lambda = ?$

الحلّ:

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

$$\lambda = \frac{16\times10^{-6}\times4\times10^{-2}}{2}$$

$$\lambda = 32\times10^{-8} = 320\ \text{nm}$$

أفكّر:

- إذا كان الهدب المعتم الأول ينتج من فرق مسار بين الشعاعين مقداره λ، فما مقدار فرق المسار الذي ينتج منه الهدب المضيء الأول والهدب المضيء الثاني؟

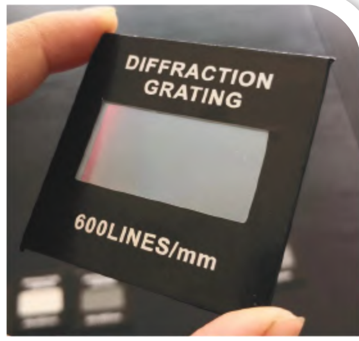
محزوز الحيود Diffraction Grating

لاحظتُ في موضوع التداخل، كيف تم الحصول على مصدرين متناغمين من مصدر واحد، بوضع حاجز يحتوي على شقّين متجاورين. بالطريقة نفسها تعمل أداة تسمى **محزوز الحيود Diffraction grating** وهي سلسلة من الشقوق المتوازية التي تفصلها مسافات متساوية يمرّ خلالها الضوء. وتُصنع من قطعة زجاجية أو بلاستيكية شفافة، تُرسم عليها خطوط سوداء رفيعة متوازية، تفصلها مسافات شفّافة تُشكّل الشقوق، التي قد يزيد عددها على 600 شقّ في الملمتر الواحد، على نحو ما يُبيّن الشكل (39/ أ).

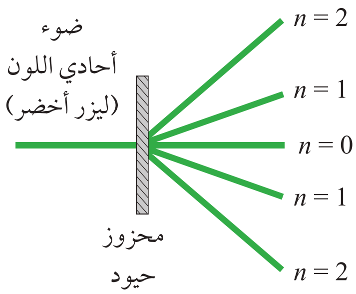
حيود ضوء أحادي اللون Diffraction of Monochromatic Light

عند سقوط ضوء أحادي اللون على محزوز الحيود؛ فإنّه ينفذ من الشقوق جميعها، ويحدث له حيود فيخرج من كلّ شقّ باتّجاهات عدّةٍ، على نحو ما في الشكل (39/ ب)، ثم تتداخل أشعّة الضوء كما يحدث في حالة الشقّين المتوازيين. وقد أُعطي رقم خاصّ لكلّ هدب مضيء ناتج من تداخل بنّاء، فالهدب المركزي رقمه (0)، ثم يليه الهدب رقم (1) من الجهتين، وهكذا... وتزداد الأرقام بزيادة زاوية حيود الأشعّة. ويكون نمط الحيود متماثلًا على جهتَي الشعاع المركزي. ألاحظ الشكل (39/ جـ) الذي يُبيّن نمط الحيود الناتج من إسقاط ضوء ليزر أخضر على محزوز حيود، يظهر الشعاع المركزي ($n = 0$)، وهو الأكثر سطوعًا، ثمّ الشعاعان ($n = 1$)، ثمّ الشعاعان ($n = 2$)، عن اليمين واليسار.

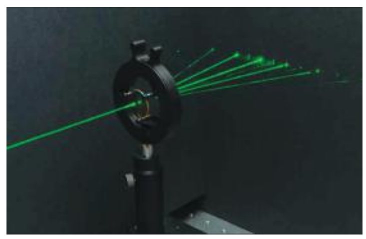
كلّ بقعة مضيئة على الحاجز في الشكل (39/ جـ) نتجت من عملية تداخل بنّاء بين الأشعّة الصادرة من شقوق محزوز الحيود، بسبب اتّفاقها في الطور. لتسهيل الحسابات؛ سنختار شعاعين فقط صادرين من شقّين متجاورين في المحزوز. بالنسبة إلى البقعة المركزية التي يُشار إليها بالرتبة ($n = 0$)؛ فإنّ فرق المسار بين الشعاعين يساوي صفرًا. أمّا البقعة المضيئة الأولى من جهتَي اليمين أو اليسار، فرتبتها ($n = 1$)، وفرق المسار بين شعاعيها (λ). والبقعة المضيئة الثانية التي رتبتها ($n = 2$)، فإنّ فرق المسار بين شعاعيها (2λ).بوجهٍ عامّ، عند البقعة المضيئة التي رتبتها (n)؛ فإنّ فرق المسار بين الشعاعين يُساوي ($n\lambda$). حيث n عدد صحيح.



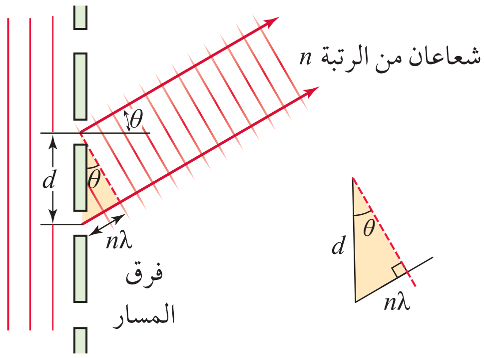
(أ): محزوز الحيود.



(ب): أشعّة الضوء عند حيودها.


(جـ): حيود شعاع ليزر.

الشكل (39): محزوز الحيود، وحيود ضوء أحادي اللون باستخدام محزوز الحيود.



الشكل (40): فرق المسار بين الشعاعين الضوئيين في البقعة المضيئة من الرتبة (n).

أُلاحظ الشكل (40) الذي يُبيّن العلاقة بين المسافة الفاصلة بين شقّين متجاورين في محزوز الحيود، وفرق المسار بين الشعاعين. يتّضح من الشكل أنّ:

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

إذ يُشير الرمز (d) إلى المسافة الفاصلة بين كلّ شقّين متجاورين، ويُشير الرمز (n) إلى رتبة البقعة المضيئة.

تُحسب المسافة بين الشقّين من عدد الخطوط في وحدة الأطوال، الذي يكون مكتوبًا على المحزوز. فمثلًا: المحزوز الذي يحتوي على 300 خطّ في ملمتر واحد، تكون فيه المسافة بين شقّين:

$$d = \frac{1\ \text{mm}}{300} = 3.3 \times 10^{-3}\ \text{mm} = 3.3 \times 10^{-6}\ \text{m}$$

يمكن التعبير عن هذه المسافة بوحدة الميكرومتر: 3.3 μm

أُعدّ فيلمًا قصيرًا باستخدام صانع الأفلام (Movie maker) يعرض عملية الحيود خلال محزوز الحيود وظهور أنماط التداخل على حاجز ثمّ تحريك الحاجز، وملاحظة التغيّر في المسافات بين الأهداب المضيئة المتكوّنة.

المثال 14

أجرى طلبة تجربة باستخدام محزوز حيود مكتوب عليه 450 خطّ في كلّ ملمتر، وضوء طول موجته 650 nm. أحسبُ مقدار الزاوية التي يميل بها الهدب المضيء الأول.

المعطيات: $n = 1,\ lines = 450\ \text{mm}^{-1},\ \lambda = 650\ \text{nm}$

المطلوب: $\theta_n = ?$

الحلّ:

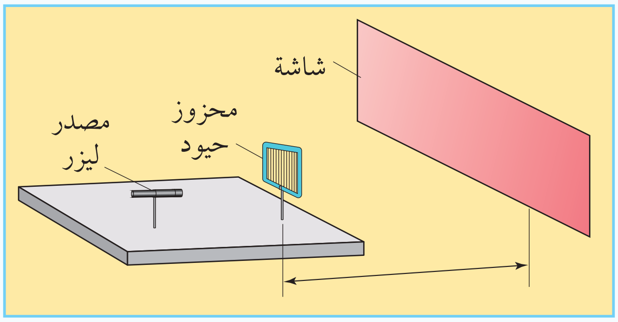
$$d = \frac{1}{450} = 2.2 \times 10^{-3}\ \text{mm} = 2.2 \times 10^{-6}\ \text{m}$$

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{d} = \frac{1 \times 650 \times 10^{-9}}{2.2 \times 10^{-6}} = 0.295$$

$$\theta_n = 17.16°$$

التجربة 3

قياس طول موجة ضوء أحادي اللون باستخدام محزوز الحيود



الموادّ والأدوات: مصدر ضوء ليزر، محزوز حيود عدد خطوطه معلوم، مشابك تثبيت، شاشة مناسبة للعرض، مسطرة مترية.

إرشادات السلامة: عدم النظر إلى مصدر الليزر أو انعكاساته.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي، أُنفّذ الخطوات الآتية:

1. أُركّب أدوات التجربة على نحو ما هو مُبيّن في الشكل أعلاه.
2. أُثبّت محزوز الحيود بشكل عمودي على سطح طاولة أفقي باستخدام المشبك، على أن يكون المحزوز في وضع رأسي تمامًا.
3. أُثبّت الشاشة في وضع رأسي، بحيث تبعد عن محزوز الحيود مسافة لا تقل عن(1.5 m)؛ كي أترك مجالًا لتعديل المسافة.
4. أستخدم مشبكًا آخر في تثبيت مصدر الليزر على مسافة مناسبة من محزوز الحيود.
5. أُشغّل مصدر الليزر، وألاحظ تكوّن الأهداب المضيئة والمعتمة على الشاشة.
6. أضبط المسافة بين المحزوز والحاجز بتحريك الشاشة.
7. **أقيس** المسافة بين الهدب المركزي (n_0) والهدب الأول الأيمن (n_1)، والمسافة بين الهدب المركزي والهدب الأول الأيسر، وأُدوّن القياسين في الجدول.
8. **أستخدم الأرقام:** أحسب قياس الزاوية بين الشعاع المركزي والشعاع الأول من أحد الجانبين، وذلك بقسمة المسافة بين الهدبين (n_0) و (n_1) على البعد بين الشاشة والمحزوز، فأحصلُ على ظل الزاوية، علمًا بأنّ:

$$(\theta \cong \sin\theta = \tan\theta)$$ (عند قياس الزاوية بالتقدير الدائري)

9. أُكرّر القياسات مع الهدب الثاني الأيمن والهدب الثاني الأيسر، وأُدوّن القياسات.

التحليل والاستنتاج:

1. أُوضّح لماذا يجب أن تكون المسافة بين المحزوز والشاشة أكبر ما يمكن.
2. **أقترحُ** طريقة للتأكّد من أنّ محزوز الحيود مثبّت بشكل موازٍ للشاشة.
3. **أُفسّر** أهمية قياس المسافة من الهدب المركزي إلى الهدب الأول من جهتَي اليمين واليسار، ثمّ استخراج المتوسط الحسابي للقيمتين.
4. **أستخدم الأرقام:** أحسب مقدار الطول الموجي للضوء بمعرفة الزاوية θ والقياسات الأخرى في الجدول.

حيود الضوء متعدد الألوان

Diffraction of Non Monochromatic Light

لاحظتُ أنّ الضوء أحادي اللون يحدث له حيود عند مروره خلال محزوز الحيود، فتظهر على الحاجز أهداب مضيئة برتب مختلفة. هل تنحرف الألوان جميعها بالزاوية نفسها؟ أم أنّ لكلّ لون زاوية؟

أُجريت تجربة لدراسة أثر الطول الموجي في مقدار زاوية الحيود، استُخدم فيها ثلاثة مصادر أحادية اللون (أزرق وأخضر وأحمر)، لإسقاط الضوء على محزوز حيود في اللحظة نفسها. يُبيّن الشكل (41/ أ) صورة الحاجز عند تكوّن الأهداب المضيئة عليه.

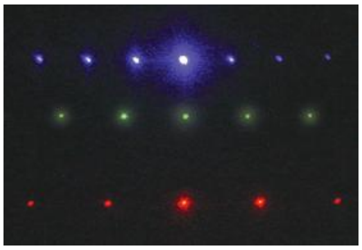
أُلاحظ في الشكل أنّ الهدب الأول لكلّ لون ينحرف بزاوية تختلف عن اللونين الآخرين، ما يعني أنّ زاوية الحيود تختلف باختلاف الطول الموجي. ويبيّن الشكل أيضًا أنّ الزاوية تزداد بزيادة الطول الموجي، فاللون الأحمر له أكبر زاوية حيود، واللون الأزرق له أصغرها. يتكوّن الضوء الأبيض من مجموعة من الأطوال الموجية المختلفة تنتج منها مكوّنات الطيف المرئي، وعند مرور هذه الموجات من محزوز الحيود؛ فإنّ كلّ موجة منها تحيد (تنحرف) بزاوية مختلفة، فتظهر على الحاجز مجموعة ألوان قوس قزح، على نحو ما يُبيّن الشكل (41/ ب).

أستنتجُ من ذلك أنّ محزوز الحيود يعمل على تحليل الضوء الأبيض إلى مكوّناته، على نحو ما يفعل المنشور.

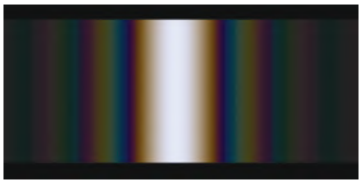
باستخدام العلاقة السابقة، يمكن قياس زاوية حيود أيّ من ألوان الضوء وحساب طوله الموجي. والعلاقة هي:

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

يمكن إجراء عملية تحليل الضوء بمزيد من الدقّة باستخدام جهاز المطياف الضوئي، الذي يتكوّن من منصة لوضع محزوز الحيود، وتلسكوب خاصّ لتحديد أيّ من الأهداب الملوّنة، وتدريج لقياس الزوايا بدقّة، على نحو ما يُبيّن الشكل (42)، ثمّ استخدام العلاقة السابقة لحساب الطول الموجي لكلّ لون.



(أ)



(ب)

الشكل (41): صورة الأهداب المتكوّنة على حاجز أبيض نتيجة حيود الضوء:

(أ): حيود الضوء لثلاثة مصادر نقطية أحادية اللون.

(ب): تحليل الضوء الأبيض إلى مكوّناته نتيجة الحيود.

الشكل (42): المطياف الضوئي.

تطبيقات على ظاهرتَي تداخل الضوء وحيوده
Application of interference and Diffraction of Light

يُستخدم محزوز الحيود لتحليل الطيف الناتج من التركيبات الذرية والجزيئية، وكذلك في تحليل أطياف النجوم لدراسة تركيبها وخصائصها الأخرى. ويستخدم أيضًا في تصوير بعض العيّنات الطبّية، باستخدام أطوال موجية محدّدة، أو تحفيز بعض الجزيئات في خلايا هذه العيّنات.

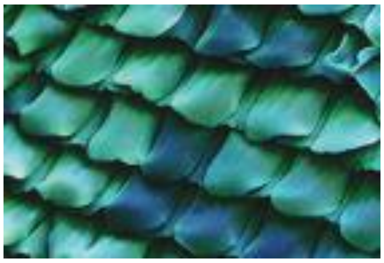
تعرّفنا محزوز الحيود الشفّاف الذي ينفذ منه الضوء، ثمّ يحيد ويتداخل. ولكن، يوجد محزوز حيود عاكس بحيث يحتوي على خطوط دقيقة عاكسة وأخرى معتمة لا تعكس الضوء، فيحدث للضوء المنعكس حيود وتداخل وتحليل إلى الألوان المختلفة، وهذا يوجد في الطبيعة ضمن تركيب ريش بعض الطيور؛ كما في الطائر الطنان، وتركيب أجنحة بعض الفراشات الملونة.

قوّة التفريق في محزوز الحيود

يُعدّ استخدام محزوز الحيود مع جهاز المطياف الضوئي عند تحليل طيف معيّن، أكثر دقّة من استخدام المنشور للغرض نفسه؛ وذلك لأنّ الخطوط الملوّنة في المنشور تكون عريضة ومتداخلة، في حين تكون الخطوط الملوّنة في محزوز الحيود دقيقة ومنفصلة بعضها عن بعض، وتكون إضاءتها أيضًا أكثر شدّة.

الربط بالعلوم الحياتية

الطائر الطنان من أصغر الطيور حجمًا؛ إذ لا يتعدّى طوله (5 cm). يتغذّى على الرحيق، ويُحرّك جناحيه بتردّد يصل إلى (80 Hz). يبدو هذا الطائر بألوان زاهية تتغيّر مع تغيّر زاوية النظر إليه؛ وذلك لأنّ التركيب الدقيق لريش الطائر يحتوي على أخاديد تُشبه تركيب محزوز الحيود، فيحدث حيود للضوء الذي يعكسه الريش، بحيث تنعكس بعض الألوان دون غيرها، ويختلف اللون باختلاف زاوية النظر.



صورة مجهرية لجناح فراشة تعمل عملَ محزوز حيود.

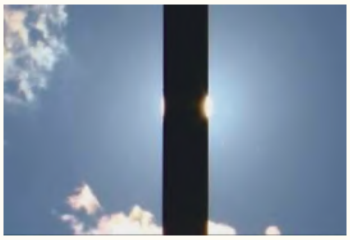
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضّح المقصود بكلّ من تداخل الضوء وحيوده، وأُبيّن الشروط التي يجب تحقّقها في مصدرين ضوئيين؛ كي يتكوّن نمط تداخل منتظم لموجاتهما.

2. **أُقارن** بين سبب تكوّن الأهداب المضيئة والأهداب المعتمة على حاجز أبيض، في تجربة يانغ.

3. **أُفسّر** سبب ظهور الألوان المختلفة عند انعكاس الضوء عن بعض أنواع عدسات آلات التصوير، على الرغم من أنّ الضوء الساقط عليها أبيض، وهي شفّافة عديمة اللون.

4. **أصنف:** أيّ الظواهر الضوئية الآتية يمكن تفسيرها باستخدام النموذج الجُسيمي للضوء؟ وأيّها باستخدام النموذج الموجي؟ وأيها باستخدام النموذجين؟ (الانعكاس، التداخل، الظاهرة الكهرضوئية، الحيود، الانكسار).



5. **أطرح سؤالًا:** يُمثّل الشكل المجاور، صورة عمود التُقطت في النهار والشمس تختفي خلفه، أطرح سؤالًا يتعلّق بالظاهرة العلمية التي تعرضها الصورة، وكيف تحدث.

6. **أستخدم الأرقام:** أُجريت تجربة يانغ لقياس الطول الموجي لضوء أحادي اللون، فكانت المسافة بين الشقّين (1.4 mm)، وكانت المسافة بين الحاجز والشقّين (140 cm)، وعند قياس المسافة بين الهدبين المضيئين الأول والثالث كانت (1.2 mm). أحسبُ مقدار الطول الموجي للضوء.

7. **أستخدم الأرقام:** في تجربة باستخدام محزوز حيود مكتوب عليه 250 خطًّا في كل ملمتر، كانت زاوية الحيود التي يميل بها الهدب المضيء الثاني n_2 بمقدار (15°). ما مقدار الطول الموجي للضوء المستخدم في التجربة؟

الإثراء والتوسّع

الرنين
Resonance

لاحظت أنَّ نظام الوتر المشدود أو عمود الهواء لديه القدرة على الاهتزاز وفقًا لنمط توافقٍ طبيعيٍّ واحد أو أكثر. أيْ إنّ للأجسام المهتزّة تردّدًا طبيعيًّا واحدًا على الأقل. وعند التأثير بقوّة دوريّة ذات تردّد معيّن في نظام مهتزّ، فإنَّ سعة اهتزازه تتزايد وتصبح قيمة عظمى عندما يتساوى تردّد القوة الخارجية مع التردّد الطبيعي للنظام، وتُعرف هذه الظاهرة بالرنين. وتعدّ الأرجوحة مثالًا على ذلك، فعند دفعها بقوّة خارجيّة دوريّة تتفق في تردّدها مع التردّد الطبيعيّ لها.

أمّا الأعمدة الهوائيّة فتمتلك أكثر من تردّد طبيعيّ، لكلٍّ منها نمط مختلف من الموجات الموقوفة، وعندما يتساوى تردّد القوّة المؤثّرة مع واحد من هذه التردّدات الطبيعيّة تصبح سعة الاهتزاز قيمة عظمى، وتحدث حالة الرنين. في الموجات الطوليّة يُعدُّ الرنين مهمًّا بالنسبة إلى الآلات الموسيقيّة الهوائيّة مثل البوق والناي؛ وذلك لتضخيم الصوت الذي تُصدره.

ومن الجدير بالذكر أنَّ ظاهرة الرنين غير مرغوب فيها في بعض الحالات؛ فعند تصميم المباني يُؤخذ في الحسبان ألّا تحدث ظاهرة الرنين عند حدوث الزلازل؛ فحدوث الرنين في المبنى عند اهتزازه يزيد من سعة الاهتزاز إلى درجة قد تؤدّي إلى أضرار في المبنى أو انهياره.

كذلك يصمّم المهندسون الجسور على ألّا يحدث لها رنين؛ بسبب حركة السيارات والمشاة فوقها أو هبوب الرياح عليها، نظرًا لما يشكّل ذلك من خطر على بقائها، على نحو ما حدث مع جسر تاكوما في أمريكا عام 1940م، الذي انهار بفعل تأثير الرياح فيه.

أبحثُ أبحثُ في مصادر المعرفة المتاحة والموثوقة عن استخدامات ظاهرة الرنين في مجال التصوير الطبي، وأعدّ عرضًا تقديميًّا أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة ممّا يأتي:

1. أيّ كمّيتين ممّا يأتي دائمًا في الاتّجاه في الحركة التوافقية البسيطة:

أ. السرعة والإزاحة. ب. السرعة والتسارع.

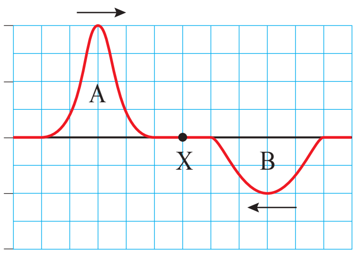
جـ. التسارع والإزاحة. د. القوة المعيدة والتسارع.

2. إذا تغيّرت السعة فقط لحركة كرة تتحرّك حركة توافقية بسيطة؛ فأيّ ممّا يأتي يبقى ثابتًا:

أ. الطاقة الميكانيكية للكرة. ب. القيمة العظمى للتسارع.

جـ. القيمة العظمى للسرعة. د. الزمن الدوري.

3. عند التقاء الموجتين الموضحتين في الشكل عند النقطة (X)، وباعتبار كل وحدة على محور (y) تمثل (1cm) فإن سعة الموجة الناتجة في منطقة التداخل:



أ. 2 cm، للأعلى ب. 2 cm، للأسفل

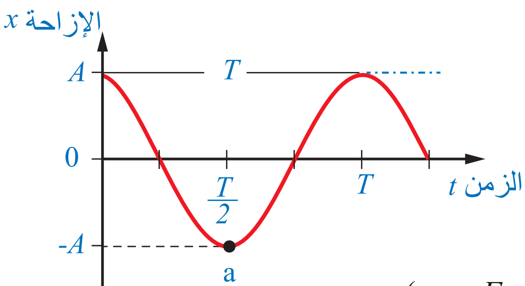
جـ. صفر د. 6 cm، للأعلى

4. تتكوّن الموجات الموقوفة وفقًا لأكثر من نمط توافق في الخيط الواحد، نُميّزها بالرقم (n). فأيّ العبارات الآتية توضّح العلاقة بين عدد العُقد والرقم التوافقي (n)؟

أ. عدد العُقد يساوي (n - 1). ب. عدد العُقد يساوي (n + 1).

جـ. عدد العُقد يساوي ($\frac{n}{2}$). د. عدد العُقد يساوي ($\frac{n}{2}+1$)

5. تتّصل كتلة بنابض على سطح أملس أفقي وتتحرّك حركة توافقية بسيطة، فإذا مُثّلت العلاقة بين الإزاحة والزمن على نحو ما في الشكل؛ فإنّ كلًّا من سرعة الكتلة والقوّة المُعيدة عند النقطة a توصف على النحو الآتي:



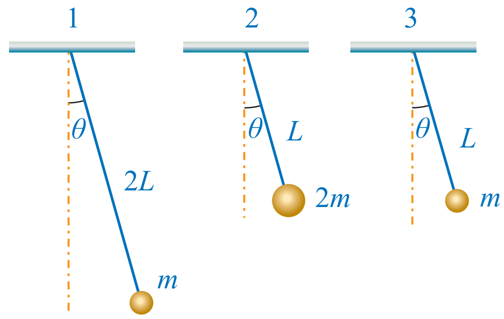
أ. (v : + , F: -) ب. (v: - , F = 0)

جـ.(v = 0 , F : +) د. (v = 0 , F : -)

6. تتأرجح فدوى في أرجوحة بحركة توافقية بسيطة بزمن دوري T، فإذا ركب معها في الأرجوحة شقيقها مصطفى وكتلته مساوية لكتلة فدوى واستمرّا في التأرجح؛ فإن الزمن الدوري يساوي:

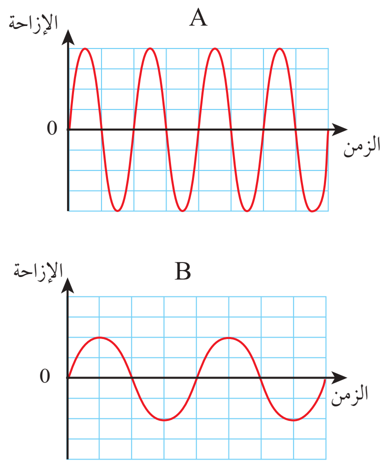
أ. $\sqrt{2}\,T$ ب. $2T$ جـ. T د. $\frac{T}{2}$

7. أجرت الطالبة تقوى ثلاث تجارب لقياس تسارع السقوط الحر؛ باستخدام البندول البسيط على نحو ما يظهر في الشكل المجاور. أيّ نتائج تلك التجارب تُمثّل القيمة الصحيحة لتسارع السقوط الحر؟



أ . 1 فقط. ب. 2 فقط. جـ. (1، 2) فقط. د . جميعها.

8. يبين الشكل منحنى (الإزاحة- الزمن) لحركتين موجيتين (A) و (B) تنتقلان في الوسط نفسه. العبارة الصحيحة التي تصف سرعة الموجتين وترددهما:



أ . سرعة (A) أكبر من (B)، وتردد (A) أكبر من (B).

ب. سرعة (A) أكبر من (B) وتردد (A) أقل من (B)

جـ. سرعة (A) تساوي سرعة (B)، وتردد (A) أكبر من (B)

د . سرعة (A) تساوي سرعة (B)، وتردد (A) أقل من (B).

9. سقط ضوء طوله الموجي 5×10^{-7} m على محزوز حيود، فكانت زاوية حيود الهدب المضيء الرابع (30°). فإن عدد الخطوط لكل (1mm) في المحزوز:

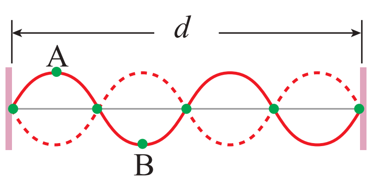
أ. 2.5×10^{2} ب. 2.5×10^{5} جـ. 1.0×10^{3} د. 1.0×10^{6}

2. **أفسّر:**

أ . تقيس الساعة البندولية الزمن بدقّة متناهية في منطقة تقع أسفل جبل. إذا نُقلت إلى منطقة أعلى الجبل فهل تتغيّر دقّة قياسها للزمن؟ أوضّح ذلك.

ب. بندول أزيح جانبا بزاوية ($\theta = 30°$) يتحرك حركة تذبذبية، هل تُعدّ حركته حركة توافقية بسيطة؟ أُفسّر إجابتي.

3. **أستنتج:** أجرى عمر تجربة باستخدام خيط مشدود، ولاحظ تكوّن موجات موقوفة فيه، ثم رسم الشكل المجاور لتوضيح ما حصل عليه. أُساعد عمر في الإجابة عمّا يأتي:



أ . أُعبّر عن طول الخيط بدلالة الطول الموجي.

ب. أُبيّن العلاقة في الطور بين النقطتين A و B على الخيط، وأشرح إجابتي.

4. **أستخدم الأرقام:** تكوّنت موجات موقوفة في وتر مشدود بين نقطتين ثابتتين المسافة بينهما (86 cm). أُجيب عمّا يأتي:

أ . عند تكوّن بطن واحد؛ ما المسافة بين عُقدتين متتاليتين؟ ما مقدار الطول الموجي؟

ب. عند تكوّن بطنين؛ ما المسافة بين عُقدتين متتاليتين؟ ما مقدار الطول الموجي؟

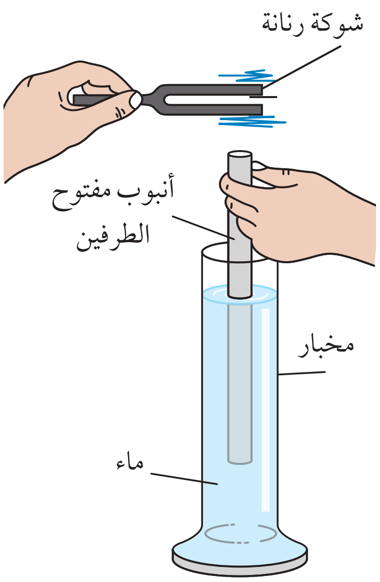
5. **أصدر حكمًا:** لدى وسيم ناي مفتوح النهاية، ولدى شقيقه يوسف مزمار مغلق النهاية، إذا كانت الآلتان متساويتين في الطول. فأيٌّ منهما يمكن استخدامها لعزف نغمة أكثر انخفاضًا بتوليدها موجات موقوفة ضمن التوافق الأول؟ أُوضّح إجابتي بالرسم.

6. **أستخدم الأرقام:** أجرت حنين تجربة لاستقصاء توافقات الموجات الموقوفة، فاستخدمت وترًا مشدودًا ومولّد اهتزازات. بدأت بزيادة التردّد ومراقبة الموجات الموقوفة في الحبل، ثم دوّنت بعض القياسات في الجدول الآتي:

التردّد (Hz)	100	200	300			
عدد البطون	1	2	3			
الطول الموجي (m)	1.00	0.50	0.33			

أُكمل الجدول، بتوقع الترددات وعدد البطون والأطوال الموجية للمراحل الثلاث الإضافية للتجربة.

7. **التفكير الناقد:** تحاول رؤى استقصاء تردّدات التوافقات المختلفة في الأعمدة الهوائية المغلقة النهاية، والشكل المجاور يُبيّن وضعها أنبوبًا مفتوح الطرفين داخل مخبار فيه ماء، واستخدامها شوكة رنّانة.



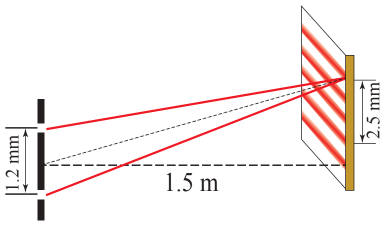
أ . كيف تتحكّم رؤى في طول عمود الهواء؟

ب. كيف تعلم بأنّ موجات موقوفة تولّدت في عمود الهواء؟

جـ. كيف يمكنها قياس الطول الموجي لموجات الصوت في الهواء في تجربتها هذه؟

8. **أستخدم الأرقام:** أُسقط ضوء أحادي اللون على محزوز حيود يحتوي على 500 خطّ في **1** ملمتر. فكانت زاوية الحيود للهدب المضيء الأول (15°). أحسبُ الطول الموجي للضوء الساقط.

9. أجرت مجموعة طالبات تجربة، فاستخدمن مصدرين ضوئيين متناغمين لتوليد نمط تداخل على حاجز، تفصل بين المصدرين مسافة (1.2 mm)، ويبعدان عن الحاجز مسافة (1.5 m)، لاحظت الطالبات تكوّن 4 أهداب مضيئة في مسافة (2.5 mm) على الحاجز، على نحو ما في الشكل المجاور.



أ . **أستخدم الأرقام:** أحسبُ الطول الموجي للضوء.

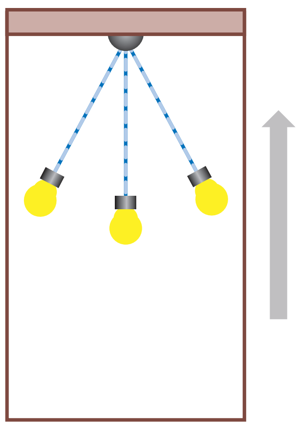
ب. **أستنتج:** ما القِيَم التي تتغيّر عند تقريب الحاجز من الشقّين؟ أبرر إجابتي.

10. **حل المشكلات:** تُستخدم الخلايا الشمسية لتوليد الكهرباء من أشعّة الشمس. ويتكوّن سطحها العلوي من السيليكون وهي مادة معامل انكسارها (3.5) وتعكس الضوء بنسبة (30%). أُقدّم رأيًا أُبيّن فيه كيف يمكن زيادة كفاءة هذه الخلايا بزيادة الضوء الذي ينفذ داخلها، وتقليل الضوء المنعكس عنها؟

11. **أستخدم الارقام:** محزوز حيود يحتوي على 600 خطّ في كلّ ملمتر، أُسقط عليه ضوء ليزر طوله الموجي (405 nm)، أحسبُ زاوية الحيود:

أ . للهدب المضيء الأوّل.

ب. للهدب المضيء الثاني.



12. **التفكير الناقد:** قيس الزمن الدوري لمصباح معلّق بسقف مصعد ساكن في أثناء تذبذبه في حركة توافقية بسيطة على نحو ما هو مبيَّن في الشكل المجاور. أصف التغيّر الذي يطرأ على الزمن الدوري لحركة المصباح عندما يتحرّك المصعد:

أ . بتسارع ثابت إلى أعلى.

ب. بسرعة ثابتة.

مسرد المصطلحات

- **بطون Antinodes:** مواقع ثابتة في الموجات الموقوفة تكون عندها إزاحة جسيمات الوسط قيمة عظمى.
- **تداخل بناء Constructive Interference:** نمط التداخل الناتج من إلتقاء موجتين تكون إزاحة جسيمات الوسط لهما بالاتجاه نفسه.
- **تداخل هدام Destructive Interference:** نمط التداخل الناتج من إلتقاء موجتين تكون إزاحة جسيمات الوسط لهما باتجاهين متعاكسين.
- **التردد الزاوي Angular Frequency:** عدد الدورات الكاملة للجسم في وحدة الزمن (الثانية) مضروبًا في 2π.
- **تكمية الشحنة Quantization of charge:** عند شحن الجسم فإنه يفقد أو يكتسب عددًا صحيحًا من الإلكترونات؛ فتكون شحنته من مضاعفات شحنة الإلكترون.
- **توافقات Harmonics:** أنماط للموجات الموقوفة تتكون عند ترددات محددة ، من مضاعفات التردد الأساسي (الأول).
- **ثابت الطور Phase Constant:** الزاوية التي تحدّد موقع الجسم عند لحظة بداية الحركة. وتسمى زاوية الطور الابتدائية.
- **الجهد الكهربائي لنقطة Electric Potential:** مقدار طاقة الوضع الكهربائية لوحدة الشحنات الموضوعة عند نقطة في مجال كهربائي.
- **حركة تذبذبية (اهتزازية) Oscillatory Motion:** حركة دورية تكرّر نفسها ذهابًا وإيابًا على المسار نفسه في فترات زمنية متساوية حول موقع الاتزان.
- **حركة توافقية بسيطة Simple Harmonic Motion:** حركة جسم بتسارع يتناسب مقداره طرديًا مع إزاحة الجسم عن موقع اتزانه، واتجاهه باتجاه موقع الاتزان ومعاكسًا لاتجاه الإزاحة.
- **خطوط المجال الكهربائي Electric Field Lines:** مسارات شحنة اختبار موجبة تتحرك تحت تأثير المجال الكهربائي فقط.

- **سماحية كهربائية Electric Permittivity:** خصيصة للمادة العازلة للكهرباء تعبّر عن قابلية ذراتها للاستقطاب عند تأثرها بقوى كهربائية من شحنات أخرى.

- **شحن بالتوصيل Charging by Conduction:** عملية ملامسة جسم مشحون جسمًا آخر متعادلًا؛ فيحدث انتقال للشحنات الكهربائية بين الجسمين، إذ تنتقل الإلكترونات من الجسم السالب إلى المتعادل، أو من الجسم المتعادل إلى الموجب.

- **شحن بالحث Charging by Induction:** عملية شحن جسم موصل متعادل؛ عن طريق تقريب جسم مشحون (موصل أو عازل) منه من دون ملامسته، فيعاد توزيع الشحنات على طرفي الجسم الموصل المتعادل، بحيث تنحاز الشحنات السالبة إلى طرف محدد يصبح سالبًا، تاركة الطرف الثاني موجب الشحنة، ويزول هذا الانحياز بزوال المؤثر.

- **شحن بالدلك Charging by Rubbing:** عملية دلك جسم بآخر، فينتج عنها انتقال الإلكترونات من سطح أحد الجسمين إلى سطح الجسم الآخر؛ فيصبح الجسم الفاقد للإلكترونات موجب الشحنة، ويصبح الجسم المكتسب للإلكترونات سالب الشحنة.

- **شحنة اختبار Test Charge:** شحنة كهربائية موجبة صغيرة المقدار مقارنة بالشحنة المولدة للمجال.

- **طاقة وضع كهربائية Electric Potential Energy:** الشغل الذي تبذله قوة خارجية لنقل شحنة اختبار موجبة بسرعة ثابتة من اللانهاية إلى نقطة في المجال الكهربائي.

- **عقد Nodes:** مواقع ثابتة في الموجات الموقوفة تنعدم عندها إزاحة جسيمات الوسط.

- **فرق الجهد الكهربائي Electric Potential Difference:** التغير في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة عند انتقالها من نقطة إلى أخرى مقسوما على الشحنة نفسها .

- **قانون كولوم Coulomb's Law:** يتناسب مقدار القوة الناشئة بين شحنتين نقطيتين طرديًا مع حاصل ضرب الشحنتين وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما.

- **كثافة خطوط المجال الكهربائي Density of Electric Field Lines:** عدد الخطوط التي تخترق وحدة المساحة من سطح محدد عموديًا عليه؛ وهي تدل على مقدار المجال.

- **مبدأ التراكب Superposition:** الإزاحة الكلية لجسيمات الوسط نتيجة التقاء موجتين (أو أكثر) عند نقطة واحدة تساوي ناتج جمع الإزاحتين الناتجين عن الموجتين.

- **مجال كهربائي Electric Field:** خصيصة للحيز المحيط بالجسم المشحون، تُظهر تأثير المجال على شكل قوى كهربائية تؤثر في الأجسام المشحونة الأخرى التي تقع ضمن هذا الحيز.

- **مجال كهربائي عند نقطة Electric Field at a Point:** القوة الكهربائية التي تؤثر في وحدة الشحنة الموجبة الموضوعة عند تلك النقطة.

- **محزوز حيود Diffraction Grating:** شريحة بلاستيكية أو زجاجية تحتوي سلسلة من الشقوق المتوازية يمرّ خلالها الضوء وتفصلها مسافات متساوية.

- **موجات موقوفة Standing Waves:** أنماط موجية ثابتة الأشكال تنتج من تراكب موجتين متساويتين في التردد والطول الموجي والسعة، تنتقلان في اتجاهين متعاكسين في الوسط نفسه.

تم بحمد الله تعالى

Collins