المركز الوطني لتطوير المناهج
National Center for Curriculum Development

المملكة الأردنية الهاشمية
وزارة التربية والتعليم

الفيزياء

الصف الثاني عشر - المسار الأكاديمي

الفصل الدراسي الثاني

كتاب الطالب

12

فريق التأليف

د. موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب
خلدون سليمان المصاروه

د. إبراهيم ناجي غبار
موسى محمود جرادات

قيد الإعداد والمراجعة

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

يسر 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

قـرَّرت وزارة التربيـة والتعليـم تدريـس هـذا الكتـاب في مـدارس المملكـة الأردنيـة الهاشـمية جميعهـا، بنـاءً عـلى قرار المجلـس الأعلى للمركـز الوطنـي لتطويـر المناهج في جلسـته رقم (2025/7)، تاريـخ 2025/9/15 م، وقرار مجلـس التربية والتعليم رقـم (2025/165)، تاريـخ 2025/10/15 م، بـدءًا مـن العام الـدراسي 2025 / 2026 م.

© HarperCollins Publishers Limited 2025.
- 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 - 801 - 7

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2025/1/385)

بيانات الفهرسة الأولية للكتاب:

عنوان الكتاب	الفيزياء، كتاب الطالب: الصف الثاني عشر، المسار الأكاديمي، الفصل الدراسي الثاني
إعداد / هيئة	الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج
بيانات النشر	عمان: المركز الوطني لتطوير المناهج، 2025
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
أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب
موسى محمود جرادات

المراجعة التربوية
أ.د. راجي عوض الصرايرة

التصميم والإخراج
نايف محمد أمين مراشدة

التحرير اللغوي
د.خليل ابراهيم القعيسي

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, sorted in retrieval system, or transmitted in any form by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise , without the prior written permission of the publisher or a license permitting restricted copying in the United Kingdom issued by the Copyright Licensing Agency Ltd, Barnard's Inn, 86 Fetter Lane, London, EC4A 1EN.
British Library Cataloguing -in- Publication Data
A catalogue record for this publication is available from the Library.

الطبعة الأولى (التجريبية) 1447 هـ / 2025 م

قيد الإعداد والمراجعة

قائمة المحتويات

الموضوع	الصفحة
المقدّمة	5
الوحدة الخامسة: المغناطيسية	**7**
تجربة استهلاليّة: استقصاء تأثير المجال المغناطيسيّ في شحنة كهربائيّة متحرّكة فيه	9
الدرس الأول: القوّة المغناطيسية	10
الدرس الثاني: المجال المغناطيسي الناشئ عن تيّار كهربائيّ	28
الدرس الثالث: الحث الكهرمغناطيسي	41
الوحدة السادسة: التيار المتردّد والدارات الإلكترونية	**63**
تجربة استهلاليّة: اختبار الثنائي البلوري وقياس مقاومته	65
الدرس الأول: دارات التيار الكهربائي المتردّد	66
الدرس الثاني: الدارات الإلكترونية	82
الوحدة السابعة: الفيزياء الحديثة	**99**
تجربة استهلاليّة: العلاقة بين درجة حرارة الجسم والإشعاع الصادر عنه	101
الدرس الأول: الطبيعة الجُسيميّة للضوء	102
الدرس الثاني: التركيب الذرّي	119

قيد الإعداد والمراجعة

الوحدة الثامنة: الفيزياء النوويّة 137

تجربة استهلاليّة: نمذجة التفاعل المتسلسل 139

الدرس الأول: تركيب النواة وخصائصها 140

الدرس الثاني: الإشعاع النوويّ 152

الدرس الثالث: التفاعلات النوويّة 167

مسرد المصطلحات 181

قيد الإعداد والمراجعة

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدّمة

الحمد لله ربّ العالمين، والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين. 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 حاجات أبنائنا الطلبة والمعلّمين.

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 حولنا؛ ما يُحفّز الطالب إلى 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 إثراءً يعتمد منحى STEAM في التعليم الذي يُستعمل لدمج العلوم والتكنولوجيا والهندسة والفن والعلوم الإنسانية والرياضيات.

ويتألّف الكتاب من أربع وحدات دراسية، هي: المغناطيسية، والتيار الكهربائي المتردّد والدارات الإلكترونية، والفيزياء الحديثة، والفيزياء النوويّة. وقد أُلحق به كتاب للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي التجارب والأنشطة جميعها الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تنفيذها بسهولة، بإشراف المعلّم، ومشاركة زملائه فيها، بما في ذلك رصد القراءات، وتحليلها، ثم مناقشتها، وصولًا إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سليمة. ويتضمّن أيضًا أسئلة تفكير؛ بهدف تعزيز فهم الطالب موضوعاتِ المادة، وتنمية التفكير الناقد لديه.

قيد الإعداد والمراجعة

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

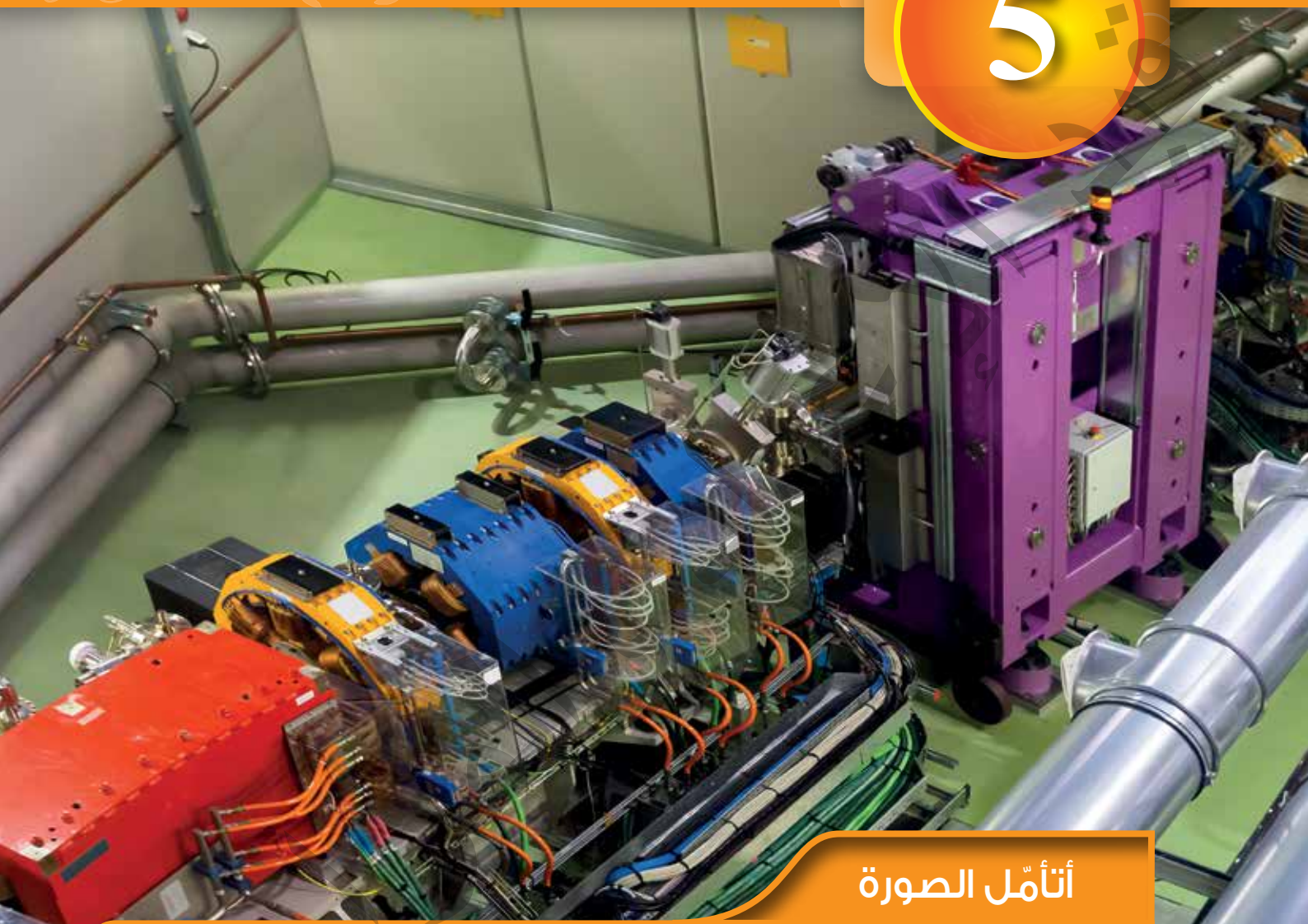
والله وليُّ التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

قيد الإعداد والمراجعة

الوَحْدة 5

المغناطيسية
Magnetism



أتأمّل الصورة

أُنشئ مركز السينكروترون (SESAME) في الأردن ليُستخدم في البحث العلميّ والتدريب، وبدأ تشغيلهُ سنة 2017م بطاقةٍ قُصوى تساوي 2.5 GeV. تُستخدَم المجالات الكهربائية والمغناطيسية في مسارع السينكروترون في تسريع الجسيمات المشحونة، مثل الإلكترونات والبروتونات، والتحكُّم في مسارها داخل مسار حَلْقي مغلق، فينتج من هذه الجسيمات المسرعة انبعاثُ ضوءٍ شديد السطوع وأشعّةٍ كهرمغناطيسيّة غير مرئيّة، هي؛ أشعّةٌ تحت حمراءَ وأشعّة فوق بنفسجيّةٍ وأشعّةٌ سينيّة؛ تُستخدَم جميعُها في دراسة التركيب الذرّيِّ للمادّة على مستوى قياسات (nm)، ما يفيدُ في تطبيقاتٍ واسعةٍ في مجالات الطبِّ والصناعة والزراعة والبيئة.

كيف يجري تسريع الجُسيمات المشحونة وإكسابُها طاقةً حركيّةً كبيرة؟ وكيف يجري التحكُّم في مسارها؟

الفكرة العامّة:

للمجال المغناطيسيّ تطبيقاتٌ حياتيّةٌ وعلميّةٌ مهمّة. ينشأ المجال المغناطيسيّ مهما كانت مصادره نتيجةً لحركة الشحنات الكهربائيّة؛ على شكل تيّار كهربائيّ أو حركة إلكترون حول النواة.

الدرس الأول: القوّة المغناطيسيّة
Magnetic Force

الفكرة الرئيسة: يولّد المغناطيسُ حوله مجالًا مغناطيسيًا يؤثّر بقوّةٍ في الموادّ المغناطيسيّة وفي الشحنات الكهربائيّة المتحرّكة فيه. للقوة المغناطيسية تطبيقات علمية وحياتية مختلفة، منها السينكروترون، ومطياف الكتلة، والمحرك الكهربائي.

الدرس الثاني: المجال المغناطيسيّ الناشئُ عن تيّارٍ كهربائيّ
Magnetic Field of an Electric Current

الفكرة الرئيسة: يمكن توليد مجال مغناطيسي بتمرير تيار كهربائي في موصل، ويُحسَب المجال المغناطيسي الذي يولِّده موصل يحمل تيارًا كهربائيًّا باستخدام علاقات رياضية تعتمد على عوامل، منها شكل الموصل الذي يحمل التيار.

الدرس الثالث: الحث الكهرمغناطيسي
Electromagnetic Induction

الفكرة الرئيسة: يرتبط تولّد قوّة دافعة كهربائيّة حثّيّة وتيار كهربائي حثّي في دارة مغلقة بتغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يخترقها، تُحسب القوة الدافعة الحثية بقانون فارادي، ويُحدّد اتجاه التيار الكهربائي بقانون لنز.

تجربة استهلاليّة

استقصاءُ تأثير المجال المغناطيسيِّ في شحنةٍ كهربائيّةٍ مُتحرّكةٍ فيه

الموادّ والأدوات: أنبوبُ أشعّة مهبطية، مصدرُ طاقةٍ عالي الجُهد (DC)، أسلاكُ توصيل، مغناطيسٌ قويّ، قاعدةٌ عازلة.

إرشادات السلامة: الحذرُ عند التعامل مع مصدر الطاقة عالي الجُهد.

خطواتُ العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفّذُ الخطوات الآتية:

1. أُثبّتُ أنبوبَ الأشعّة المهبطية على القاعدة العازلة وأصلُ قطبيه مع قطبي مصدر الطاقة.
2. **ألاحظُ:** أختارُ جُهد (500 V) تقريبًا، وأشغّلُ مصدر الطاقة، ثم أرفع الجُهد حتى يبدأ الوميضُ بالظهور في الأنبوب.
3. **ألاحظُ** شكلَ مسار الأشعّة المهبطيّة في الأنبوب وأدوّنُ ملاحظاتي.
4. **أجرّبُ:** أقرّبُ المغناطيس بالتدريج من مسار الأشعّة المهبطيّة في الأنبوب؛ مع الحذر من الاقتراب من قطبي الأنبوب، ثمّ ألاحظُ ما يحدثُ لمسار الأشعّة، وأدوّنُ ملاحظاتي.
5. أعكسُ قطبي المغناطيس وأُكرّر الخطوة (4)، وألاحظُ ما يحدث لمسار الأشعة، وأدوّنُ ملاحظاتي.

التحليلُ والاستنتاج:

1. **أصف** مسار الأشعة المهبطية في المرحلة الأولى من التجربة، وأوضح سبب ظهوره.
2. **أفسّرُ** أهمّية أن يكون ضغط الهواء منخفضًا داخل أنبوب الأشعة المهبطية.
3. **أستنتج:** أبين ما حدث لمسار الأشعة المهبطية عند تقريب المغناطيس منها، وأفسّرُ سببَ ذلك، ثمّ أقارنُ النتيجة بما يحدث عند تغيير قطب المغناطيس.

قيد الإعداد والمراجعة

القوّة المغناطيسية
Magnetic Force

الفكرة الرئيسة:
يولّد المغناطيسُ حوله مجالًا مغناطيسيًا يؤثّر بقوّةٍ في الموادّ المغناطيسيّة وفي الشحنات الكهربائيّة المتحرّكة فيه. للقوة المغناطيسية تطبيقات علمية وحياتية مختلفة، منها السينكروترون، ومطياف الكتلة، والمحرك الكهربائي.

نتاجات التعلّم:
- أستنتج من التجربة العملية أن المجال المغناطيسي يؤثر بقوة مغناطيسية في الشحنة المتحركة فيه.
- أحسب القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في الشحنة المتحركة فيه وأحدد اتجاهها.
- أشرح مبدأ عمل كل من مطياف الكتلة والسينكروترون.
- أستنتجُ من التجربة أنّ المجال المغناطيسي يؤثر بقوة مغناطيسية في موصل داخل المجال ويحمل تيارًا كهربائيًّا.
- أحسب القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في الموصل الذي يحمل تيارا كهربائيا، وأحدد اتجاهها.
- أصف العزم المؤثر في حلقة موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم وأحدد اتجاه الدوران.
- أصف مبدأ عمل المحرك الكهربائي.

المفاهيم والمصطلحات:

مجالٌ مغناطيسيّ	Magnetic Field
تسلا	tesla
مطياف الكتلة	Mass Spectrometer
سينكروترون	Synchrotron

المجال المغناطيسيّ Magnetic Field

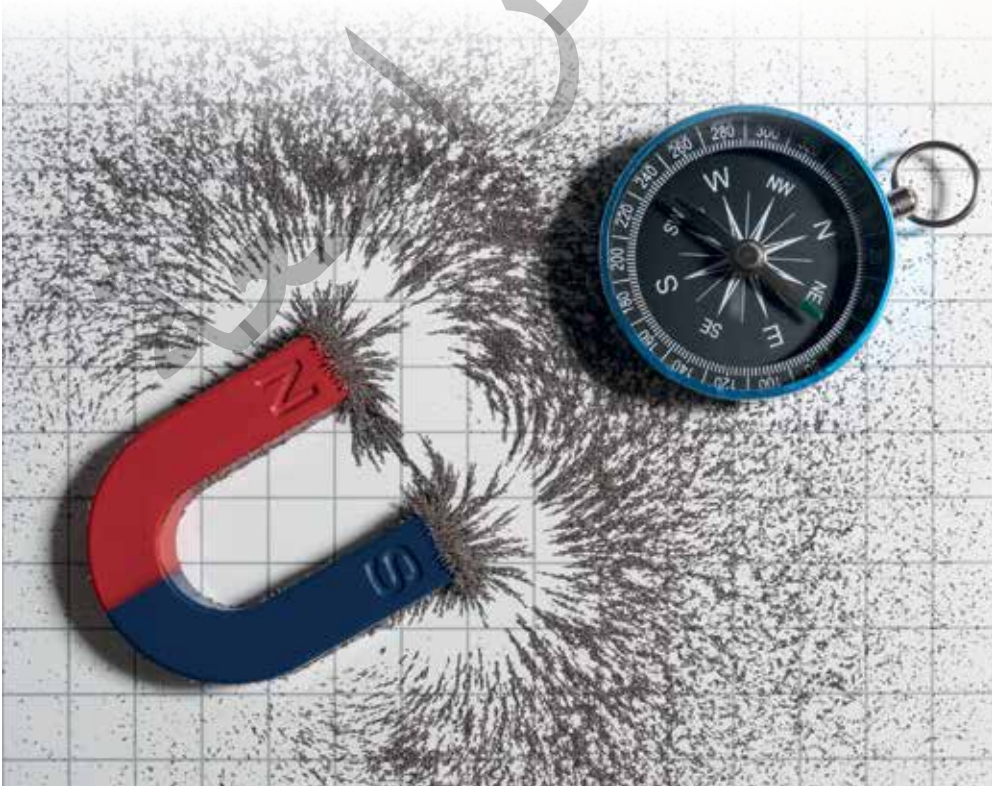
تعرَّفَ الإنسان المغناطيسية في الطبيعة، فمعدن المغنتيت مادة ممغنطة طبيعية، لديها القدرة على جَذْب قِطَع من موادّ قابلة للتمغنط مثل الحديد.

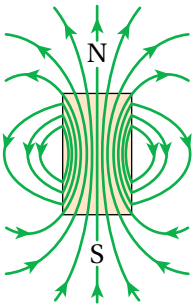
بالإضافة إلى جَذْبه الحديد، فإنَّ المغناطيس يجذب كذلك النيكل والكوبالت والنيوديميوم، وتسمّى الموادّ المغناطيسية، وهي موادّ قابلة للتمغنط وتُصنَع منها المغانط الدائمة بأشكال مختلفة.

لكلّ مغناطيس قطبان: قطب شمالي وقطب جنوبي، وتوجد أقطاب المغناطيس دائمًا على هيئة أزواج: شمالي وجنوبي، ولا يوجد قطب مغناطيسي مفرد، على خلاف الشحنات الكهربائية، حيث يمكن أنْ توجد شحنة مفردة موجبة أو سالبة.

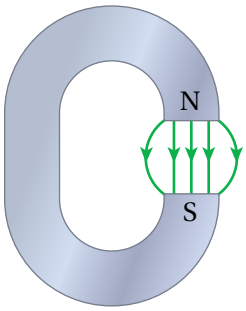
يولِّد المغناطيس مجالًا مغناطيسيًّا في الحيز المحيط به، ويمثَّل المجال المغناطيسي بخطوط وهمية تعبِّر عن مقداره واتجاهه كما سبق تمثيل المجال الكهربائي، وتُستخدَم بُرادة الحديد في رَسْم خطوط المجال المغناطيسي كما يبين الشكل (1)، ويمكن تحديد اتجاه المجال عند نقطة معينة بوضع بوصلة عند تلك النقطة، فتشير إبرتها إلى اتجاه المجال.

الشكل (1): تُستخدَم بُرادة الحديد في رَسْم خطوط المجال، ويُحدَّد اتجاه المجال عند نقطة باستخدام البوصلة.





(أ): خطوط المجال المغناطيسي لمغناطيس مستقيم.



(ب): خطوط المجال بين قطبَي مغناطيس على شكل حرف (C).

الشكل (2): خطوط المجال المغناطيسي.

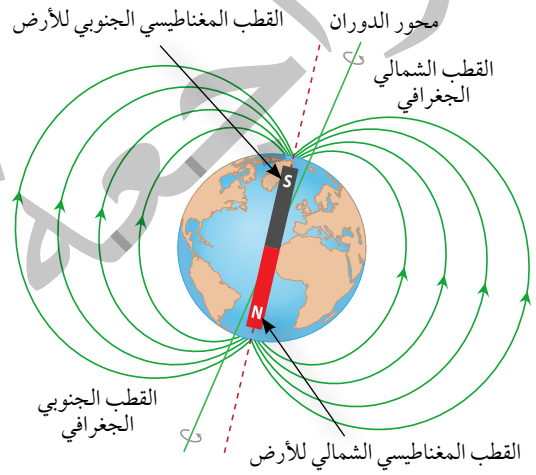
تتشابه خطوط المجال المغناطيسي في خصائصها مع خطوط المجال الكهربائي، حيث تدلّ كثافة الخطوط في منطقة ما على مقدار المجال، ويُحدَّد اتجاه المجال عند نقطة برسم مماس على خط المجال عند تلك النقطة. وتمتاز خطوط المجال المغناطيسي عن خطوط المجال الكهربائي بأنّها خطوط مقفلة تخرج من القطب الشمالي وتدخل القطب الجنوبي، وتُكمِل مسارها داخل المغناطيس من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي، ويبيِّن الشكل (2/ أ) خطوط المجال المغناطيسي لمغناطيس مستقيم، ويبيِّن الشكل (2/ ب) خطوط المجال المغناطيسي في الحيز بين قطبي مغناطيس على شكل حرف C.

أفكّر: مستعينًا بالشكل (2)، أقدِّم دليلًا على أنَّ المجال المغناطيسي للمغناطيس المستقيم هو مجال غير منتظم، في حين أنَّ المجال المغناطيسي لمغناطيس على شكل حرف (C) هو مجال منتظم في المنطقة البعيدة عن طرفيه.

✓ **أتحقّق:** أحدِّد أوجه التشابه والاختلاف بين خطوط المجال الكهربائي وخطوط المجال المغناطيسي.

الربط بعلوم الأرض

عند تعليق مغناطيس مستقيم من منتصفه، فإنَّه يدور بحيث يشير قطبه الشمالي إلى القطب الشمالي الجغرافي للأرض، ويشير قطبُه الجنوبي نحو الجنوب الجغرافي؛ وذلك بسبب تأثُّره بالمجال المغناطيسي للأرض، حيث يتموضع القطب المغناطيسي الجنوبي للأرض بالقرب من قطبها الشمالي الجغرافي، ويتموضع القطب المغناطيسي الشمالي للأرض بالقرب من قطبها الجنوبي الجغرافي.



قيد الإعداد والمراجعة

القوّة المؤثرة في شحنةٍ مُتحرّكةٍ في مجالٍ مغناطيسيّ
Force on Moving Charge in a Magnetic Field

لاحظْتُ في التجربة الاستهلالية كيف أدّى المجال المغناطيسي إلى انحناء الأشعة المهبطية (حزمة الإلكترونات) عن مسارها، وهذا يدلّ على أنَّ المجال قد أثر بقوة في هذه الشحنات المتحركة. وقد بيّنت التجاربُ العمليّة الخصائص الآتية للقوّة المغناطيسيّة التي تؤثّر في جُسيم مشحونٍ يتحرّكُ في مجالٍ مغناطيسيّ:

- لا يؤثر المجال المغناطيسي في الجسيم المشحون إذا كان ساكنًا أو متحركًا بسرعة موازية لاتجاه المجال المغناطيسي.
- يتناسبُ مقدار القوّة المغناطيسيّة طرديًّا مع كل من؛ شحنة الجُسيم (q)، ومقدار سرعته (v) ومقدار المجال المغناطيسيّ (B)، وجيب الزاوية بين متجهَي السرعة والمجال.
- يعتمد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة على اتّجاه سرعة الجُسيم واتّجاه المجال المغناطيسيّ، وعلى نوع شحنة الجُسيم. وتكون القوة المغناطيسية عمودية على اتجاه كل من المجال المغناطيسي والسرعة.

يمكن تمثيل النتائج التجريبيّة السابقة باستخدام الضرب المتجهي حسب العلاقة الرياضية الآتية:

$$\boldsymbol{F}_B = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

حيثُ يشير الرمز ($\boldsymbol{F}_B$) إلى مُتّجه القوّة المغناطيسيّة الذي يكون دائمًا عموديًا على كل من؛ متجه المجال المغناطيسي ($\boldsymbol{B}$) ومتجه السرعة ($\boldsymbol{v}$). ويُعطى مقدار القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الشحنة المتحرّكة بالعلاقة الآتية:

$$F_B = qvB \sin\theta$$

حيث θ الزاوية المحصورة بين متّجهَي السرعة والمجال المغناطيسي.

باستخدام العلاقة السابقة يمكن تعريفُ **المجال المغناطيسيّ Magnetic Field** عند نقطةٍ بأنّه: القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في وحدة الشحنات الموجبة، عندما تتحرّك الشحنة بسرعة (1 m/s) باتّجاهٍ عموديٍّ على اتّجاه المجال المغناطيسيّ لحظة مرورها في تلك النقطة. ويقاس المجال المغناطيسي بوَحْدة (N.s/C.m)، وَفْقًا للنظام الدولي للوَحْدات وتُعرَف بالتسلا، tesla ورمزها (T).

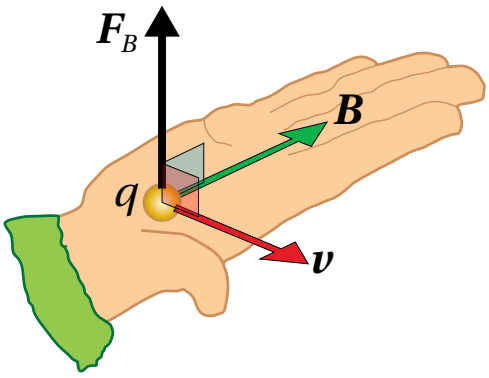
✓ أتحقّق:

أ . ما الزاويـة بين متجهي المجال والسرعة للحصول على قيمة عظمى للقوة المغناطيسية المؤثرة في جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي؟

ب. هـل يمكنُ لمجالٍ مغناطيسي أن يجعل إلكترونًا يبدأ حركته من السكون؟

جـ. هـل ينحـرف النيوتـرون عـن مساره عندما يتحرك داخل مجال مغناطيسي باتجاه عمودي عليه؟

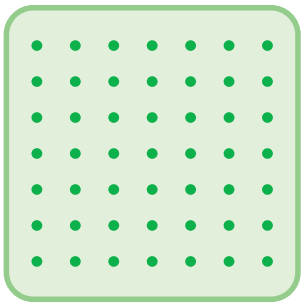
قيد الإعداد والمراجعة



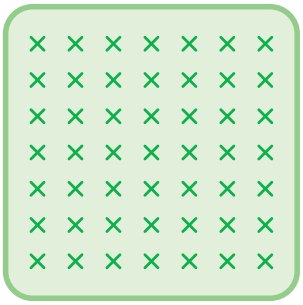
الشكل (3): تحديد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في شحنة، باستخدام قاعدة اليد اليمنى.

تُستخدم **قاعدة اليد اليمنى** لتحديد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في شحنةٍ موجبةٍ عندما تتحرّك داخل مجال مغناطيسيّ، حيث تُبسَط اليدُ اليُمنى؛ بحيث يشير الإبهام إلى اتّجاه السرعة كما في الشكل (3)، وتشير باقي الأصابع إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ، عندها يُحدّد اتّجاه القوّة بسهمٍ يخرُج من باطن الكفّ ويكون عموديًّا عليه. في حين ينعكس اتّجاه القوّة عندما تكون الشحنة سالبة.

سنستخدم محاور (x, y, z) في تحديد اتجاهات المجال والسرعة والقوة. قد نمثِّل المجال المغناطيسي المنتظم أحيانًا بمجموعة نقاط مرتبة بانتظام كما يبيِّن الشكل (4/ أ)؛ لتدلّ على مجال مغناطيسي منتظم عمودي على الصفحة نحو الخارج باتجاه محور $(+z)$. أما إذا كان المجال عموديًّا على الصفحة وكأنه داخل فيها باتجاه محور $(-z)$، فيمثَّل بمجموعة إشارات ضرب مرتبة بانتظام كما يبيِّن الشكل (4/ ب).



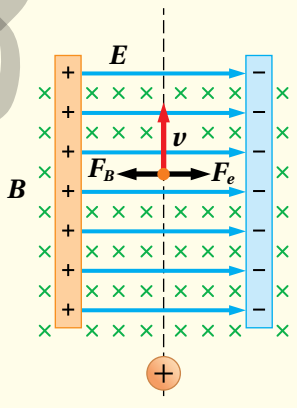
(أ)



(ب)

الشكل (4): تمثيل المجال المغناطيسيّ المنتظم.
(أ) عمودي على الصفحة نحو الخارج.
(ب) عمودي على الصفحة نحو الداخل.

أفكّر: أُدخِل جسيم شحنته $(+q)$ وسرعته (v) إلى منطقة مجالين متعامدين: مجال كهربائي (E) باتجاه $(+x)$، ومجال مغناطيسي (B) باتجاه $(-z)$. الجسيم أكمل حركته بالسرعة نفسها كما هو مُبيَّن في الشكل.



أ. يبيِّن الشكل اتجاه كل من القوتين الكهربائية والمغناطيسية المؤثرة في الجسيم. فكيف حُدِّد اتجاه كلّ قوة؟

ب. ماذا أستنتج عن العلاقة بين مقداريّ القوتين؟ أُبرِّر إجابتي.

جـ. لو أُدخِل جسيم شحنته $(-q)$ بالسرعة نفسها (v) إلى منطقة المجالين، فهل سيكمل حركته بالاتجاه نفسه؟ أُبرِّر إجابتي.

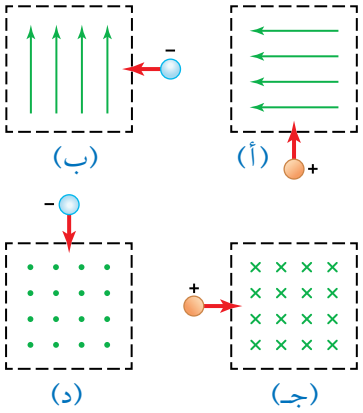
قيد الإعداد والمراجعة

المثال 1

أُدخِلت أربع شحنات إلى مجالات مغناطيسية منتظمة كما يبيِّن الشكل (5). أُحدِّد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في كلّ شحنة لحظةَ دخول كلّ منها منطقة المجال المغناطيسي.

المعطيات: اتجاه المجال، اتجاه السرعة، نوع الشحنة.

المطلوب: اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في كلّ شحنة.



الشكل (5): أربع شحنات لحظة دخولها إلى مجالات مغناطيسية منتظمة.

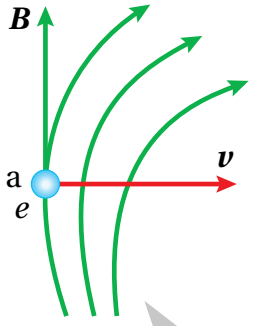
الحلّ:

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه السرعة، وتشير بقية الأصابع إلى اتجاه المجال، فإنَّ اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في كلّ شحنة:

الشكل (أ): القوة باتجاه $(+z)$، الشكل (ب): القوة باتجاه $(+z)$، الشكل (جـ): القوة باتجاه $(+y)$، الشكل (د): القوة باتجاه $(+x)$.

المثال 2

يتحرّك إلكترون بسرعة $(5.0 \times 10^6\ \text{m/s})$ باتّجاه محور $(+x)$؛ أحسب مقدار القوّة المغناطيسيّة التي تؤثّر فيه لحظة مروره بالنقطة (a) وأحدّد اتّجاهها، علمًا بأنّ المجال المغناطيسيّ عندها $(2.0 \times 10^{-4}\ \text{T})$ باتّجاه محور $(+y)$. كما في الشكل (6).



الشكل (6): إلكترون في مجالٍ مغناطيسيٍّ غير منتظم.

المعطيات:

الشكل، $v = 5.0 \times 10^6\ \text{m/s},\ B = 2.0 \times 10^{-4}\ \text{T},\ \theta = 90\ °, e = -1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$

المطلوب: $F_B = ?$

الحلّ:

يبين الشكل (6) أنّ خطوط المجال المغناطيسيّ ليست مستقيمة، فيكون اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة (a) على امتداد المماس المرسوم عند تلك النقطة؛ للأعلى وباتّجاه $(+y)$.

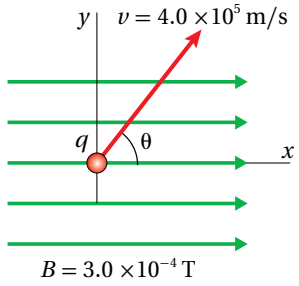
$$F_B = qvB \sin\theta$$
$$F_B = 1.6 \times 10^{-19} \times 5.0 \times 10^6 \times 2.0 \times 10^{-4} \times 1$$
$$F_B = 1.6 \times 10^{-16}\ \text{N}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى؛ فإنَّ اتّجاه القوّة التي تؤثّر في الإلكترون تكون داخلة في الصفحة، باتّجاه $(-z)$. تكون القوّة بهذا المقدار والاتّجاه عند النقطة (a) فقط؛ لأنّ المجال متغيّر في مقداره واتّجاهه عند النقاط الأخرى. ألاحظ أنّ إشارة الشحنة تستخدم لتحديد اتجاه القوة، وليس في حساب مقدار القوة.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 3

يتحرّك جُسيمٌ شحنته $(5.0 \times 10^{-6}\ \text{C})$ في المستوى (x,y) داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم، بسرعة (v) باتّجاهٍ يصنعُ زاوية $(\theta = 53°)$ مع محور $(+x)$، كما في الشكل (7). بالاعتماد على بيانات الشكل؛ أحسب مقدارَ القوّة المغناطيسيّة التي تؤثّر في الجُسيم، وأُحدّد اتجاهها في اللحظة المبينة في الشكل.



الشكل (7): حركةُ جُسيم مشحون في مجالٍ مغناطيسيّ منتظم.

المُعطيات:

$$v = 4.0 \times 10^5\ \text{m/s},\ B = 3.0 \times 10^{-4}\ \text{T},\ \theta = 53°,$$
$$q = 5.0 \times 10^{-6}\ \text{C}$$

المطلوب: $F_B = ?$

الحلّ:

$$F_B = qvB \sin\theta$$
$$F_B = 5.0 \times 10^{-6} \times 4.0 \times 10^5 \times 3.0 \times 10^{-4} \times \sin 53°$$
$$F_B = 4.8 \times 10^{-4}\ \text{N}$$

بتطبيق قاعدةِ اليد اليُمنى؛ بوضع الإبهام باتّجاه السرعة $(\boldsymbol{v})$، وباقي الأصابع باتّجاه المجال $(+x)$. فإنَّ اتّجاه القوة المغناطيسية يكون عموديًّا على الصفحة نحو الداخل، باتّجاه $(-z)$.

تمرين

أستنتج: يبيِّن الجدول الآتي معطيات عن شحنات كهربائية تأثّرت بقُوًى مغناطيسية لحظةَ دخولها مجالات مغناطيسية منتظمة. باستخدام قاعدة اليد اليمنى، أكمِل الفراغات في الجدول بما هو مناسب.

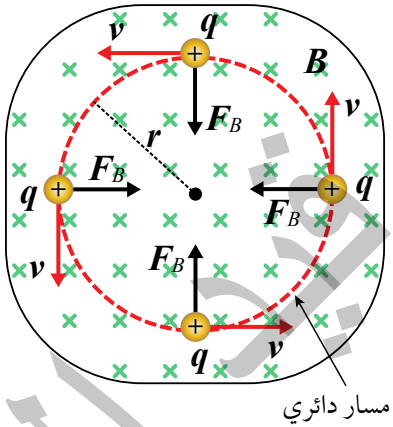
نوع الشحنة	اتجاه سرعة الشحنة	اتجاه المجال المغناطيسي	اتجاه القوة المغناطيسية
موجبة	$+z$	$-y$	.....
موجبة	.....	$-z$	$-x$
سالبة	$-x$	.....	$+y$
.....	$-y$	$+z$	$+x$

قيد الإعداد والمراجعة

حركةُ جُسيم مشحونٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم

Motion of a Charged Particle in a Uniform Magnetic Field

تنحرف الجسيمات المشحونة عن مسارها عند تأثُّرها بقُوًى مغناطيسية. ولوصف حركة جسيم مشحون داخل مجال مغناطيسي، سندرس الحالة التي يدخل فيها الجسيم بسرعة ابتدائية عمودية على مجال مغناطيسي منتظم. يبين الشكل (8) جسيم كتلته (m) وشحنته (q)، يتحرك بسرعة ابتدائية (v) باتجاه $(+x)$ لحظة دخوله مجالًا مغناطيسيًّا منتظمًا يتجه داخلًا في الصفحة $(-z)$. يتأثر الجسيم بقوة مغناطيسية باتجاه $(+y)$، فتعمل القوة على تغيير مسار الجسيم، فيتغير اتجاه سرعته، ويتغير تبعا لذلك اتجاه القوة المغناطيسية، بحيث تبقى القوة عمودية على اتجاهَي السرعة والمجال، ونتيجة لذلك، يتحرك الجسيم بسرعة ثابتة مقدارًا في مسار دائري يقع في مستوًى متعامد مع المجال المغناطيسي.



الشكل (8): حركة جسيم شحنته موجبة في مجال مغناطيسي منتظم.

يُعبَّر عن مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيم بالعلاقة الآتية:

$$F_B = qvB \sin\theta = qvB$$

يكون اتجاه القوة المغناطيسية نحو مركز المسار الدائري؛ لذا فإنَّ القوة المغناطيسية في هذه الحالة تُعَدّ قوة مركزية؛ تُكسب الجسيم تسارُعًا مركزيًّا مقداره $(a_c = \frac{v^2}{r})$. وباستخدام القانون الثاني لنيوتن، يمكن التوصُّل إلى علاقة لحساب نصف قُطْر المسار الدائري للجسيم باتباع الخطوات الآتية:

- باستخدام القانون الثاني لنيوتن $(F = ma)$، فإنَّ القوة المركزية المؤثرة في الجسيم يمكن التعبير عنها بالعلاقة الآتية:

$$F = m\frac{v^2}{r}$$

- بمساواة القوة المركزية بالقوة المغناطيسية:

$$qvB = m\frac{v^2}{r}$$

- باختصار (v) وإعادة ترتيب الرموز في العلاقة، نتوصّل إلى أنَّه يُعبَّر عن نصف قُطْر المسار الدائري للجسيم المشحون بالعلاقة الآتية:

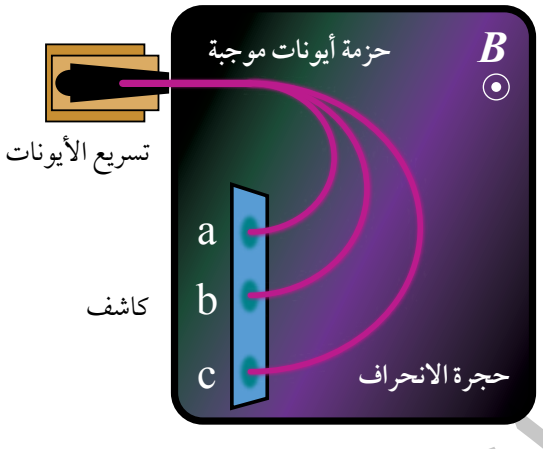
$$r = \frac{mv}{qB}$$

أُفكّر: لماذا لا تبذلُ القوّة المغناطيسيّة شغلًا على جُسيمٍ مشحونٍ يتحرك داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم؟

✓ **أتحقّق:** في الشكل (8)، أبين أثر كل مما يأتي في نصف قطر المسار الدائري للجسيم المشحون:

- نقصان سرعة الجسيم إلى النصف.
- مضاعفة المجال.
- مضاعفة كل من سرعة الجسيم والمجال.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (9): تحليل عيّنةٍ مجهولةٍ باستخدام جهاز مِطياف الكتلة.

كيف سيكون مسار أيونٍ سالبٍ عند دخوله هذا المجال بسرعةٍ باتّجاه اليمين؟

تطبيقات تكنولوجية:

تُستخدَم القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيمات المشحونة في تطبيقات عملية عدة، منها مطياف الكتلة ومسارع السينكروترون.

1 . مطيافُ الكتلة Mass Spectrometer: جهازٌ يستخدم لفصل الأيونات بحَسَب نسبة كتلة تلك الأيونات إلى شحنتها، حيث تُعَدّ النسبة ($\frac{m}{q}$) صفة فيزيائية للمادة، يستخدمها العلماء في التعرُّف على أنواع الجسيمات المُكوِّنة لعينة من مادة معينة.

تدخل الأيونات بالسرعة نفسها مجالًا مغناطيسيًّا منتظمًا عموديًّا على اتجاه السرعة، فيتحرك كل أيون في مسار دائري نتيجة للقوة المغناطيسية المؤثرة فيه، ويبيِّن الشكل (9) المسارات التي تسلكها أيونات موجبة عند دخولها مجالًا مغناطيسيًّا منتظمًا باتجاه ($+z$).

بمعرفة نصف قُطْر المسار الدائري (r) يجري حساب نسبة ($\frac{m}{q}$) لكل أيون باستخدام العلاقة الآتية:

$$\frac{m}{q} = \frac{Br}{v}$$

2 . مسارع السينكروترون Synchrotron: يُستخدم لإنتاج أشعّة (موجات) كهرومغناطيسية، وتعتمد فكرة عمله على أنّ الجسيمات المشحونة ذات السرعات العالية تبعث إشعاعات كهرومغناطيسية عندما تنحرف عن مسارها بتأثير مجال مغناطيسي. يُستخدم في السينكروترون مجال كهربائي لتسريع الجسيمات المشحونة مثل الإلكترونات والبروتونات، وإكسابها سرعات عالية جدًّا تقترب من سرعة الضوء، ثمّ تدخل الجسيمات المُسرّعة إلى مسار حلقي محاط بأقطاب مغناطيسية.

الأقطاب المغناطيسية تحرف الجسيمات المشحونة عن مسارها كما يُبيّن الشكل (10)؛ ما يؤدّي إلى انبعاث إشعاعات كهرومغناطيسية. وعن طريق التحكّم في المجالات

الشكل (10): انتاج أشعة كهرمغناطيسية في مسارع السينكروترون.

الشكل (11): صورة المبنى الخارجي للسينكروترون البرازيليّ سيريوس (Sirius)، الذي يعادل في مساحته ملعب كرة قدم.

الكهربائية والمغناطيسية المستخدمة في السينكروترون، يمكن إنتاج حزم من الأشعّة ذات أطوال موجية مختلفة تُستخدم في الأبحاث العلمية في مجالات مثل الفيزياء والكيمياء. ويبين الشكل (11) صورة لمبنى سينكروترون.

أتحقّق: ما استخدامات كُلٍّ من جهازي مِطياف الكتلة والسينكروترون؟ وما وظيفةُ المجال المغناطيسيّ في كلٍّ منهما؟

الربط مع التكنولوجيا

الموجاتُ الكهرمغناطيسيّة الصادرة عن السينكروترون، يمكن التحكُّم فيها لإعطاء حُزَمٍ تتراوح أطوالها المَوجيّة من تحت الحمراء إلى الأشعة السينيّة، وتكون ذات شدّة عالية جدًّا. ويستخدم الطول الموجي المناسب في الأبحاث العلمية في مجالات الفيزياء والكيمياء؛ مثل اكتشاف الخصائص الذريّة والجُزيئيّة وطول الروابط بين الذرات داخل الجزيء الواحد على مستوى (nm).

المثال 4

استُخدِمَ مطياف الكتلة لفصل ذرات نظيري اليورانيوم (235) واليورانيوم (238)؛ تمّ تأيينُ الذرّات فأصبحت شحنةُ كلِّ أيونٍ منها (1.602×10^{-19} C)، ثمّ قُذِفَت جميعُها داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم (1.200 T) بسرعة (400.0×10^{2} m/s)، عموديّةٍ عليه. إذا كان نصف قطر مسار أحدهما (8.177 cm)، ونصف قطر مسار الثاني (8.281 cm)، أحسب كتلة كل أيون.

المعطيات: $v = 400.0 \times 10^{2}\ \text{m/s}$, $B = 1.200\ \text{T}$, $\theta = 90°$, $r_1 = 8.177\ \text{cm}$, $r_2 = 8.281\ \text{cm}$, $q = 1.602 \times 10^{-19}\ \text{C}$

المطلوب: $m_1 = ?$, $m_2 = ?$

الحلّ:

تُحسَب كتلة كلّ أيون بالعلاقة الآتية:

$$r = \frac{mv}{qB} \rightarrow m = \frac{rqB}{v}$$

$$m_1 = \frac{8.177 \times 10^{-2} \times 1.602 \times 10^{-19} \times 1.200}{400.0 \times 10^{2}} = 3.929 \times 10^{-25}\ \text{kg}$$

$$m_2 = \frac{8.281 \times 10^{-2} \times 1.602 \times 10^{-19} \times 1.200}{400.0 \times 10^{2}} = 3.979 \times 10^{-25}\ \text{kg}$$

الأيون الذي يسلك مسارًا نصفُ قطره أكبر يمتلك الكتلة الأكبر، وهو أيون ذرة اليورانيوم (238)، في حين يسلك أيون ذرة اليورانيوم (235) المسار الآخر الذي نصف قطره أصغر.

قيد الإعداد والمراجعة

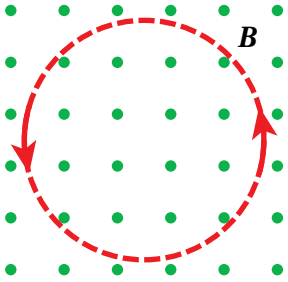
المثال 5

مجال مغناطيسي منتظم مقداره (4.00 mT) عمودي على الصفحة إلى الخارج. قُذِف جسيم مشحون داخل المجال عموديًّا عليه، فتأثر بقوة مغناطيسية مقدارها (3.20×10^{-15}N). فسلَكَ مسارًا دائريًّا كما يبيِّن الشكل (12/ أ). الجسيم إما أنه إلكترون أو بروتون، أجيب عمّا يأتي مستعينًا بالشكل:

أ . هل الجسيم إلكترون أم بروتون؟ أفسر إجابتي.

ب. أحسب سرعة الجسيم.

جـ. أحسب نصف قُطْر المسار الدائري.



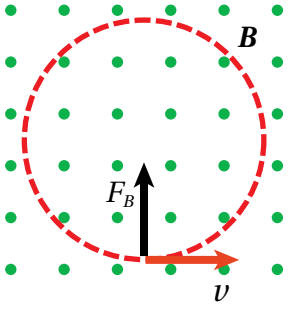
الشكل (12/ أ): حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم.

المعطيات: $\boldsymbol{B} = 4.00\ \text{mT}, +z, F_B = 3.20 \times 10^{-15}\ \text{N}, q = 1.602 \times 10^{-19}\text{C}$

المطلوب: نوع الشحنة، $v = ?,\ r = ?$

الحل:

أ . باستخدام اتجاه الدوران المُبيَّن في الشكل (12/ أ)، نختار أيّ نقطة على المسار الدائري، ونرسم مماسًا عند تلك النقطة يدلّ على اتجاه السرعة، ثم نرسم عند النقطة نفسها سهمًا يدلّ على اتجاه القوة المغناطيسية، بحيث يكون عموديًّا على اتجاه السرعة وباتجاه مركز الدائرة كما يبيِّن الشكل (12/ ب).



الشكل (12/ ب): تطبيق قاعدة اليد اليمنى لمعرفة نوع شحنة الجسيم.

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى السرعة، وتشير بقية الأصابع إلى اتجاه المجال، فإنَّ اتجاه القوة المغناطيسية يكون عموديًّا على ظاهر الكف وخارجا منه، وعليه، فإنَّ الجسيم شحنته سالبة (إلكترون).

ب. تُحسَب سرعة الجسيم بالعلاقة الآتية:

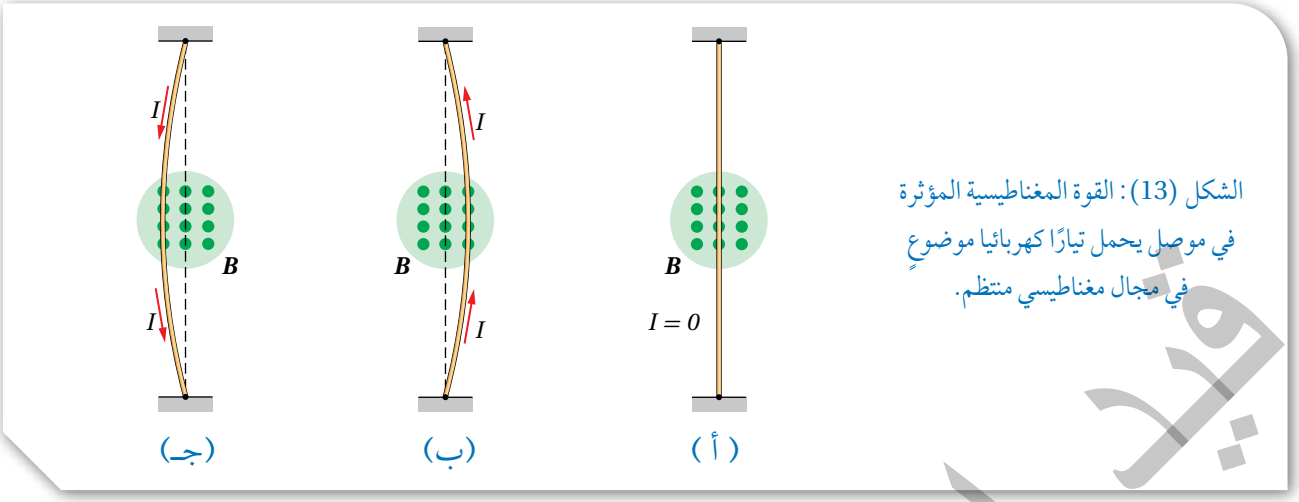
$$F_B = qvB \sin 90°$$

$$v = \frac{F_B}{qB} = \frac{3.20 \times 10^{-15}}{1.602 \times 10^{-19} \times 4.00 \times 10^{-3}} = 5.00 \times 10^{6}\ \text{m/s}$$

جـ. لأنَّ الجسيم إلكترون، فإنَّ كتلته ($m = 9.10 \times 10^{-31}$ kg)، ثم يُحسَب نصف القُطْر بالعلاقة الآتية:

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{9.10 \times 10^{-31} \times 5.00 \times 10^{6}}{1.602 \times 10^{-19} \times 4.00 \times 10^{-3}} = 7.10 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (13): القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا كهربائيا موضوعٍ في مجال مغناطيسي منتظم.

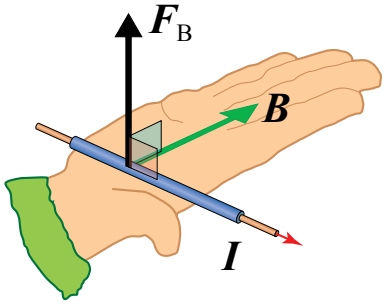
القوّة المؤثّرة في موصلٍ يحمل تيّارًا في مجالٍ مغناطيسيّ

Force on a Current–Carrying Conductor in a Magnetic Field

تعلّمْتُ أنَّ المجال المغناطيسي يؤثر في الشحنات المتحركة بقوة مغناطيسية، ويؤثر المجال المغناطيسي أيضًا في الموصل الفلزي الذي يسري فيه تيار عند وضعه داخل مجال مغناطيسي. فالتيّارُ الكهربائيّ يتكوّن من شحناتٍ مُتحرّكة، وكل شحنة ستتأثر بقوّةٍ مغناطيسيّة. والقوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الموصل تساوي مُحصّلة القوى المغناطيسيّة المؤثرة في الشحنات التي تنقل التيّار الكهربائيّ.

يمكن ملاحظة أثر القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل موضوع داخل مجال مغناطيسي منتظم كما يبيِّن الشكل (13). في الشكل (13/ أ)، لا يسري في الموصل تيار كهربائي، فيظل مستقيمًا بشكل رأسي، وعندما يسري فيه تيار كهربائي باتجاه $(+y)$، ينحرف الموصل بالاتجاه المُبيَّن في الشكل (13/ ب) بسبب تأثره بقوة مغناطيسية، وعند عَكْس اتجاه التيار، ينحرف بالاتجاه المعاكس كما في الشكل (13/ جـ)؛ ما يعني انعكاس اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة فيه.

لتحديد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في الموصل؛ تُستخدَم قاعدة اليد اليُمنى، حيث يشير الإبهام إلى اتّجاه سريان التيار الكهربائي في الموصل، وتشير أصابع اليد الأربعة إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ، عندها يُحدّد اتّجاه القوّة المؤثّرة في الموصل بسهمٍ يخرج من باطن الكف عموديًّا عليه، كما في الشكل (14). بتطبيق القاعدة على السلك المُبيَّن في الشكل (13/ ب)، فإنَّ القوة المغناطيسية تكون باتجاه $(+x)$، وينعكس اتجاه القوة ليصبح باتجاه $(-x)$ عند عَكْس اتجاه التيار كما يبيِّن الشكل (13/ جـ).



الشكل (14): تحديد اتّجاه القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة في موصل يسري فيه تيّار كهربائيّ باستخدام قاعدة اليد اليمنى.

✓ **أتحقّق:** عنـد وضع موصل يحمل تيّارًا كهربائيًا في مجـال مغناطيسي، يتأثر الموصل بقوة. فكيف أفسِّر ذلك؟

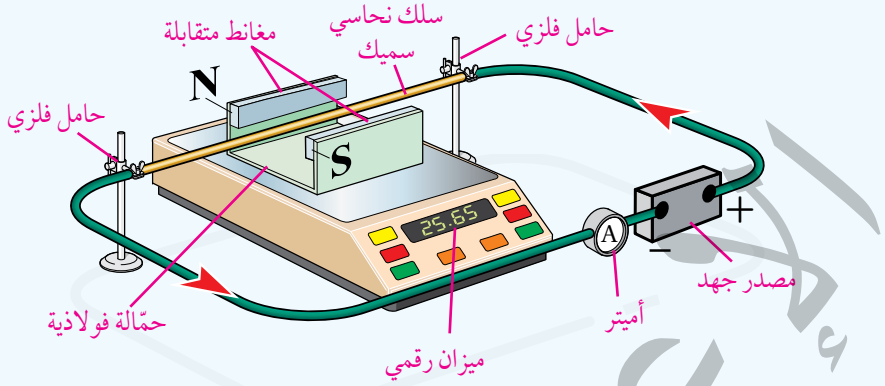
للتحقُّق عمليًّا من تأثير المجال المغناطيسيّ في موصل يسري فيه تيّار كهربائيّ وتحديد اتّجاه القوّة المغناطيسية عمليًا؛ أُنفِّذُ التجربة الآتية:

وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي

التجربة 1 استقصاء القوّة المغناطيسيّة المُؤثّرة في موصلٍ يحمل تيّارًا كهربائيًّا

الموادّ والأدوات: مغناطيسان، حمّالة فولاذية للمغانط، سلكٌ نحاسيٌّ سميكٌ قطرُه (3 mm) وطولُه (35 cm) تقريبًا، حاملان فلزيّان، أميتر، مصدر منخفض الجُهد، أسلاك توصيل، ميزان رقميّ.

إرشادات السلامة: الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائيّ.



خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذُ الخطوات الآتية:

1. أثبّت المغناطيسين على الحمّالة الفولاذية كما يبيّن الشكل.
2. أضبطُ الميزان الرقميّ بوضعٍ أفقيّ؛ ثمّ أضعُ الحمّالة الفولاذيّة فوقَه والمغانط، وأضبط قراءته على الصفر.
3. أثبّتُ السلكَ النحاسيَّ السميكَ على الحاملين الفلزّيين جيدًا؛ لمنع أيّ حركةٍ له، وأجعلهُ يمتدّ فوق الميزان داخل المجال المغناطيسيّ باتّجاهٍ عموديٍّ عليه دون أن يلامس الميزان.
4. **ألاحظُ:** أصلُ الدارة الكهربائيّة كما في الشكل؛ ثمّ أرفعُ جُهد المصدر وأراقبُ السلكَ النحاسيّ.
5. **أقيسُ** التيّار الكهربائيّ عند قيمةٍ مُحدّدة؛ عندما يظهر تغيُّرٌ على قراءة الميزان الرقميّ.
6. **ألاحظ:** أُكرّر الخطوة (5) برفع قيمة جهد المصدر ثلاث مرّاتٍ أُخرى، وألاحظُ قراءة الأميتر والميزان في كُلّ مرة. ثمّ أدوّنُ القراءات في جدولٍ مناسب.

التحليلُ والاستنتاج:

1. **أستنتجُ** اتّجاه القوّة المغناطيسيّة التي أثّر بها المجالُ في السلك النحاسيّ، واتّجاه قوّة ردّ الفعل التي أثّر بها السلك في المغانط والقاعدة الفولاذيّة، معتمدًا على التغيُّر في قراءة الميزان.
2. **أقارن** اتّجاه القوّة الذي استنتجتُه مع الاتّجاه الذي يمكن التوصُّل إليه بتطبيق قاعدة اليد اليُمنى.
3. **أمثّل البيانات** المدوّنة في الجدول؛ التيّار على المحور (x) والقوة المغناطيسية على المحور (y).
4. **أستنتجُ** العلاقةَ بين التيّار والقوّة، ثم أجدُ ميل المُنحنى، وأحدّد ما يمثّله الميل مستعينًا بالعلاقة الآتية:

$$F_B = IBL$$

قيد الإعداد والمراجعة

لاحظْتُ في التجربة أنَّ القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل تتناسب طرديًّا مع التيار المارّ فيه، وقد أثبتت التجارب العملية أنّ القوّة المغناطيسيّة تتناسب طرديًّا مع كُلٍّ من: مقدار المجال المغناطيسيّ، وطول الموصل الموضوع فيه، والتيار الكهربائيّ؛ إضافةً إلى جيب الزاوية بين مُتّجه طول الموصل والمجال المغناطيسيّ، (علمًا أنَّ متجه طول الموصل هو متجه مقداره يساوي طول الموصل واتجاهه باتجاه سريان التيار الكهربائي فيه). وتمثّلُ هذه العوامل في العلاقة الرياضية الآتية:

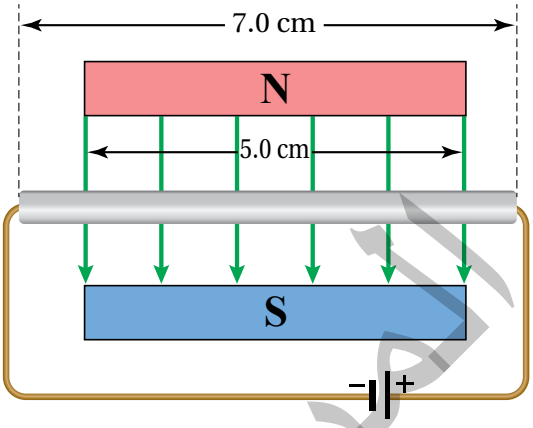
$$F_B = IBL \sin\theta$$

يكون للقوة المغناطيسية قيمة عظمى عندما تكون الزاوية بين متجهَي المجال والطول ($\theta = 90°$)، وإذا نقصَت الزاوية عن ($90°$) أو زادت عنها؛ فإنّ مقدارَ القوّة المغناطيسيّة يقلُّ حتى يصبح صفرًا عندما تصبح الزاوية (θ) صفرًا أو ($180°$).

✓ **أتحقّق:** متى يمكن لشريط من الألمنيوم أنْ يتأثر بقوة مغناطيسية عند وضعه في مجال مغناطيسي؟

المثال 6

يبيّنُ الشكلُ (15) سلك ألمنيوم يحمل تيّارًا (5.2 A)؛ جزءٌ منه داخل مجال مغناطيسيّ (250 mT) وعموديٌّ عليه. معتمدًا على بيانات الشكل؛ أجد القوة المغناطيسية المؤثرة في السلك.



الشكل (15): سلك ألمنيوم يسري فيه تيّار كهربائيّ موجود داخل مجال مغناطيسيّ منتظم.

المُعطيات: $L = 5.0 \times 10^{-2}\ \text{m},\ B = 0.25\ \text{T},\ I = 5.2\ \text{A},\ \theta = 90°$

المطلوب: $F_B = ?$

الحلّ:

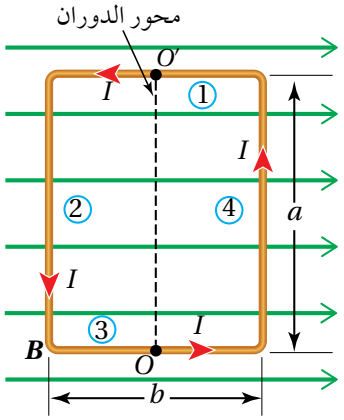
يُحسَب مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الجزء من السلك الموضوع داخل المجال المغناطيسي، باستخدام العلاقة الآتية:

$$F_B = IBL \sin\theta$$

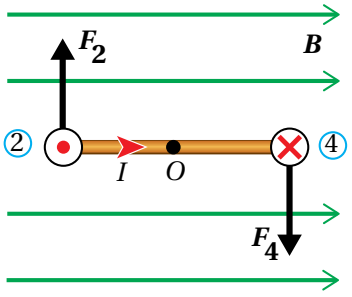
$$F_B = 5.2 \times 0.25 \times 5.0 \times 10^{-2} \times 1 = 6.5 \times 10^{-2}\ \text{N}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى، يكون اتجاه القوة المغناطيسية عموديًّا على الصفحة نحو الخارج ($+z$).

قيد الإعداد والمراجعة



(أ): منظر علويٌّ للحلقة، يُبيّن أضلاعها الأربعة وخطوط المجال.



(ب): منظر جانبي للحلقة يُبيّن القوى المغناطيسية المؤثرة في الضلعين (2,4).

الشكل (16): حلقةٌ مستطيلةٌ تحمل تيّارًا كهربائيًّا؛ قابلةٌ للدوران في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم.

العزم المؤثّر في حلقةٍ تحملُ تيّارًا في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم

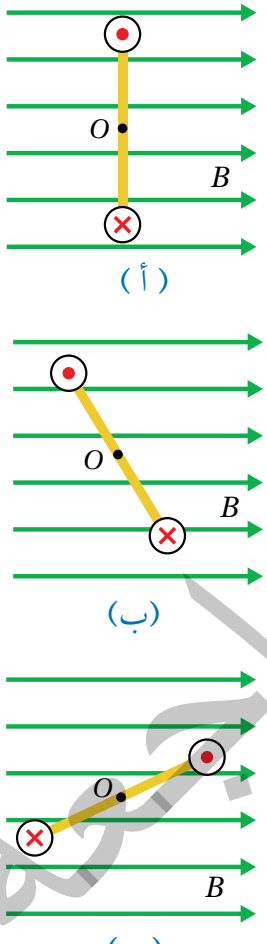
Torque on a Current Loop in a Uniform Magnetic Field

يوضّح الشكل (16/ أ) منظرًا علويًّا لحلقةٍ مُوصلةٍ مستطيلةٍ طولُها a وعرضُها b؛ تحمل تيارًا كهربائيًّا (I)، موضوعةٌ أفقيًّا في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم، خطوطهُ توازي مستوى الحلقة. باستخدام العلاقة $(F_B = IBL \sin\theta)$ يمكن التوصُّل إلى ما يأتي:

- لا يتأثر الضلعان (1, 3) بقُوًى مغناطيسية؛ لأنَّ متجه طول الموصل يوازي خطوط المجال.
- يتأثر الضلعان (2, 4) بقوتين مغناطيسيتين (F_2, F_4) مقدار كل منهما $(F = IaB)$؛ لأنَّ متجه طول الموصل يتعامد مع خطوط المجال $(\theta = 90^o)$. والشكل (16/ ب) يبيِّن منظرًا جانبيًّا للحَلْقة يظهر فيه اتجاها هاتين القوتين.
- القوّتان (F_2, F_4) تؤثران باتجاهين متعاكسين، وخطّا عملهما غير منطبقين، فتشكلان ازدواجًا يدوِّر الحَلْقة مع اتجاه دوران عقارب الساعة حَوْل محور ثابت يقع في مستوى الحَلْقة.

يُستخدَم العزم المؤثر في حَلْقة في تطبيقات عدة، من أهمها المحرك الكهربائي.

✓ **أتحقّق:** يبيّن الشكلُ (17) مشاهد لمقطعٍ جانبيٍّ تظهرُ فيه الحافّة القريبةُ من الناظر لحلقةٍ تحملُ تيّارًا كهربائيًّا، موضوعةٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ أفقيّ. أُحدّدُ اتّجاه الدوران حول محور عمودي على مستوى الصفحة يمر بالنقطة (O) في كلّ حالة (إن وجد).

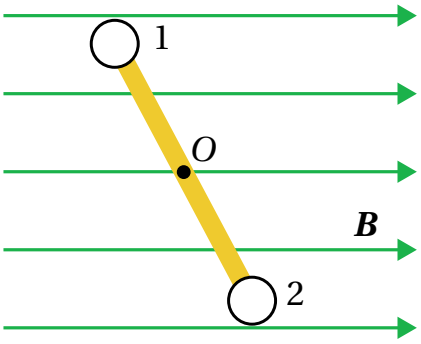


الشكل (17): ثلاثة مشاهد جانبيّةٍ لحلقةٍ يسري فيها تيّار كهربائيّ، داخل مجال مغناطيسيٍّ مُنتظم.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 7

حلقةٌ مستطيلةُ الشكل يسري فيها تيّار كهربائي موضوعة داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم، يبيّن الشكل (18) مقطعا جانبيا للحلقة يظهر فيه ضلعين من أضلاعها؛ (1) و (2). إذا علمتُ أنّ الحلقة تدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة حول محور عمودي على مستوى الصفحة ويمر بالنقطة (O)، فأُحدّدُ اتّجاه التيّار في كلّ من الضلعين 1 و 2 .



الشكل (18): منظر جانبي لحلقة تحمل تيارًا كهربائيًّا في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظم.

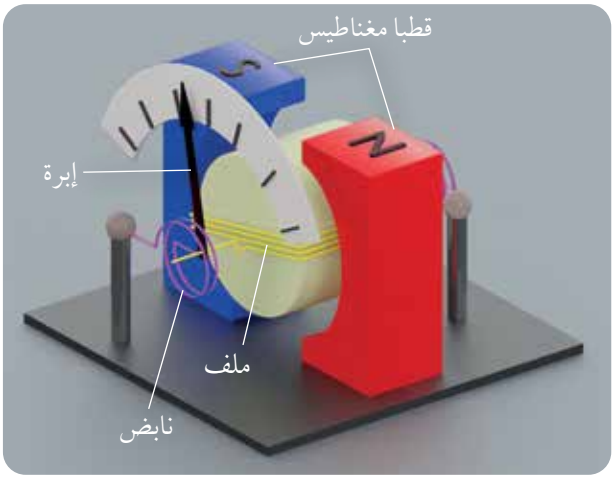
المُعطيات: الشكل واتّجاه دوران الحلقة.

المطلوب: اتّجاه التيّار في كلّ من الضلعين 1 و2.

الحلّ:

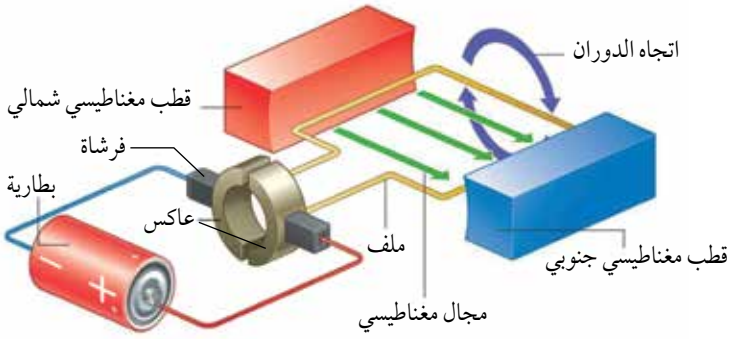
بما أنّ الحلقة تدور بعكس اتّجاه حركة عقارب الساعة؛ فإنّ الضلع (1) في الحلقة يتأثّر بقوة مغناطيسية باتّجاه ($-y$) بينما القوّة المغناطيسية المؤثّرة في الضلع (2) تكون باتّجاه ($+y$). وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى يكون التيّار في الضلع (1) باتّجاه ($-z$) وفي الضلع (2) باتّجاه ($+z$).

الرّبط بالتكنولوجيا



الغلفانوميتر أداة تستخدم للكشف عن التيار الكهربائي وقياسه، صنع قبل 200 سنة تقريبا، ثم تطورت صناعته. يبين الشكل، أحد أنواعه الذي يمكنه قياس تيارات صغيرة جدًا، ويسمى الغلفانوميتر ذو الملف المتحرك. عند مرور تيار كهربائي في الملف يتأثر بعزم ازدواج، فيدور الملف وتدور معه إبرة تشير إلى تدريج معين يتناسب مع قيمة التيار، ويتصل الملف بنابض يعمل على إرجاعه إلى وضع الصفر بعد توقف مرور التيار الكهربائي في الملف.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (19): الأجزاء الرئيسة للمحرك الكهربائي.

المحرّك الكهربائيّ Electric Motor

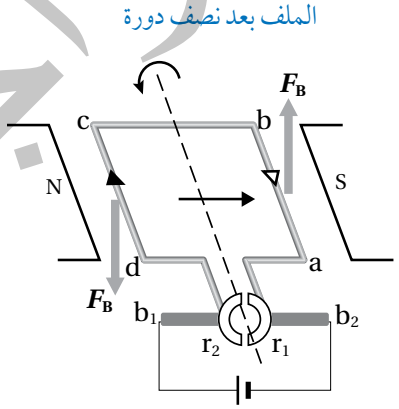
جهازٌ يحوّل الطاقة الكهربائيّة إلى طاقةٍ حركيّة، يُستخدَم في كثيرٍ من الأجهزة المنزلية مثل المروحة والغسّالة، ويُستخدَم في السيارات. يبيِّن الشكل (19) نموذجًا لمحرك كهربائي، تظهر فيه الأجزاء الرئيسة الآتية:

1. قطبا مغناطيس متقابلان يولّدان مجالًا مغناطيسيًّا.
2. ملفٌّ من سلكٍ نُحاسيٍّ معزولٍ يوضع بين قطبَي المغناطيس، وقابل للدوران حَوْل محور ثابت يقع في مستوى المِلفّ.
3. العاكس؛ وهو نصفا أسطوانةٍ موصلة، يتّصل كُلٌّ نصفٍ بأحد طرفي الملفّ.
4. فرشاتان من الكربون تُلامسان العاكس وتتّصلان بمصدر التيّار.

تنقل الفرشاتان (b_1, b_2) التيار الكهربائي من مصدر التيار (البطارية) إلى العاكس الذي يوصّل التيار الكهربائي إلى المِلفّ، فيتأثر المِلفّ بعزم ازدواج يدوِّره حَوْل محور دوران ثابت يقع في مستوى الملف. عند دوران المِلفّ، يحدث تبديل في تلامس إحدى الفرشاتين مع أحد نصفَي العاكس (r_1, r_2) كلَّ نصف دَوْرة كما يبيِّن الشكل (20). فينعكس اتجاه التيار الكهربائي في أضلاع المِلفّ وتنعكس القوى المغناطيسية المؤثرة في كل ضلع، ويبقى العزم المؤثر فيه بالاتجاه نفسه فيواصل دورانه باتجاه واحد.

الربط مع الفضاء

تحتاج الأقمار الصناعية لضبط توجيهها من حين إلى آخر؛ لذا تُزوَّد بملفاتٍ يجري إيصالها بالتيار الكهربائي عند الحاجة؛ فيؤثّر المجال المغناطيسيّ الأرضيّ فيها بعزمٍ يعمل على تدوير القمر الصناعي لضبط اتّجاهه. علمًا بأنّ مصدر التيار الكهربائي هو الخلايا الشمسية المثبتة على القمر الصناعي.



الشكل (20): وظيفة العاكس.

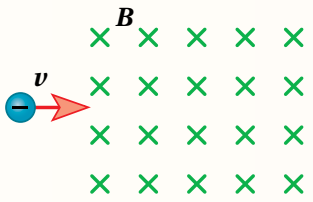
اتجاه التيار في المِلفّ (a→b→c→d): يتأثر الضلع (ab) بقوة للأسفل والضلع (dc) بقوة للأعلى، فيدور المِلفّ بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

اتجاه التيار في المِلفّ (d→c→b→a): يتأثر الضلع (dc) بقوة للأسفل والضلع (ab) بقوة للأعلى، فيواصل الملف دورانه بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

مراجعة الدرس

1. **الفكرةُ الرئيسة:** أعرّفُ المجالَ المغناطيسيّ عند نقطة، وأذكر وحدة قياسه في النظام الدوليِّ للوحدات.

2. **أستنتجُ:** يتحرّك إلكترونٌ باتّجاه محور $(+x)$، فيدخل مجالًا مغناطيسيًّا مُنتظمًا اتّجاهه مع محور $(-z)$؛ كما في الشكل. أجيب عن السؤالين الآتيين:



أ. ما اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون لحظة دخوله منطقة المجال؟

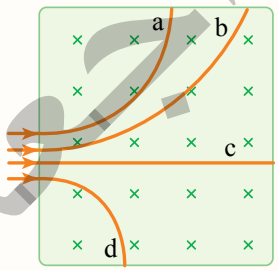
ب. هل تحافظ القوة المغناطيسية على اتجاهها بعد أن يغير الإلكترون موقعه؟ أفسر إجابتي.

3. **أقارن:** تؤثر المجالات الكهربائية والمغناطيسية في الجسيمات المشحونة بقُوًى. أقارن بين القوتين الكهربائية والمغناطيسية المؤثرتين في الجسيمات المشحونة كما هو مُبيَّن في الجدول الآتي:

وَجْه المقارنة	القوة الكهربائية	القوة المغناطيسية
هل تتأثر الشحنة الساكنة بالقوة؟		
كيف يحدد اتجاه القوة؟		
هل تبذل القوة شغلًا على الشحنة؟		

4. **أتوقّعُ:** ثلاث جُسيمات مشحونة: إلكترون، وبروتون، وأيون صوديوم (Na^+)؛ دخلت منطقةَ مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظمٍ في جهاز مطياف الكتلة بالسرعة نفسها. كيف أُميّز كل جُسيم منها عن طريق اتّجاه الانحراف ونصف قُطر المسار؟ أوضّحُ إجابتي بالرسم.

5. **أستنتج:** دخلت أربعة جُسيماتٍ (a,b,c,d) منطقة مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتَظمٍ بسرعاتٍ متساويةٍ وباتّجاهٍ عموديٍّ على خطوطه كما في الشكل. أُحدّد أيًّا من هذه الجُسيمات يحملُ شحنةً موجبةً وأيُّها يحمل شحنةً سالبة وأيّها لا يحمل شحنة، ثم أرتّب الجُسيمات a, b, d تصاعُديًّا حسب كتلتها. علمًا بأنّها متساوية في مقدار الشحنة.

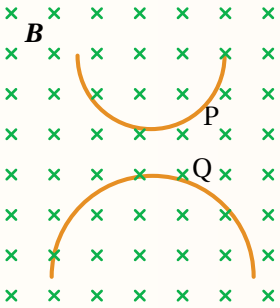


6. **أستخدم الأرقام:** يتحرّك بروتونٌ بسرعة $(4.0 \times 10^6\ m/s)$ في مجالٍ مغناطيسيٍّ مُنتظمٍ مقدارهُ $(1.7\ T)$؛ فيتأثّرُ بقوّةٍ مغناطيسيّةٍ $(8.2 \times 10^{-13}\ N)$. أجدُ قياس الزاوية بين مُتّجهي سرعة البروتون وخطوط المجال المغناطيسيّ.

قيد الإعداد والمراجعة

7. **أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة ممّا يأتي:**

1. يبيِّن الشكل مسارَي حركة جسيمين (P, Q): أحدهما لإلكترون والآخر لبروتون، أُدخِلا مجالًا مغناطيسيًّا منتظمًا بالسرعة نفسها. يتحرك الإلكترون عَبْر المسار الذي رمزه:



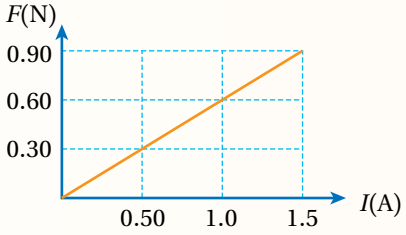
أ . (P) باتجاه حركة عقارب الساعة.

ب. (P) عَكْس حركة عقارب الساعة.

جـ. (Q) باتجاه حركة عقارب الساعة.

د . (Q) عَكْس حركة عقارب الساعة.

2. يبيِّن الشكل تمثيلًا للعلاقة بين القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل مستقيم داخل مجال مغناطيسي منتظم والتيار المارّ فيه. إذا كان طول الموصل (40 cm) ويتعامد طوله مع المجال، فإنَّ مقدار المجال المغناطيسي المؤثر في الموصل بوَحْدة (T) يساوي:



أ . 1.5 ب. 0.67

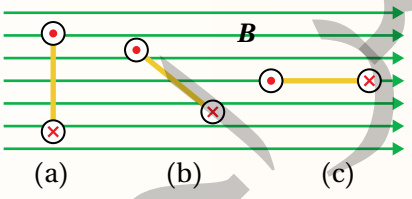
جـ. 2.4 د . 1.3

3. عندما يتحرك جسيم مشحون داخل مجال مغناطيس في مسار دائري فإن، المجال المغناطيسي يُكسب الجسيم تسارُعًا مركزيًّا يعمل على:

أ . تغيير مقدار السرعة دون تغيير اتجاهها. ب. تغيير اتجاه السرعة مع بقاء مقدارها ثابتًا.

جـ. تغيير السرعة مقدارًا واتجاهًا. د . المحافظة على السرعة ثابتة مقدارًا واتجاهًا.

* يبيِّن الشكل منظرًا جانبيًّا لثلاثة مِلفّات متماثلة في الشكل والمساحة، ويمرّ فيها تيارات متساوية تقع في مجال مغناطيسي منتظم. أجيب عن الفقرتين الآتيتين مُعتمِدًا على الشكل:



4. الترتيب التنازلي لعزم الازدواج المؤثر في المِلفّات الثلاثة عند اللحظة المُبيَّنة في الشكل:

أ . $\tau_c = \tau_b > \tau_a$ ب. $\tau_a > \tau_b > \tau_c$

جـ. $\tau_c > \tau_b > \tau_a$ د . $\tau_b > \tau_a > \tau_c$

5. المِلفّ (أو المِلفّات) الذي تكون القوة المُحصّلة المؤثرة فيه تساوي صفرًا:

أ . المِلفّ (a) فقط. ب. المِلفّان (a) و (c) فقط.

جـ. المِلفّ (c) فقط. د . المِلفّات الثلاثة (a) و (b) و (c).

قيد الإعداد والمراجعة

الفكرة الرئيسة:

يمكن توليد مجال مغناطيسي بتمرير تيار كهربائي في موصل، ويُحسَب المجال المغناطيسي الذي يولِّده موصل يحمِل تيارًا كهربائيًّا باستخدام علاقات رياضية تعتمد على عوامل، منها شكل الموصل الذي يحمِل التيار.

نتاجات التعلّم:

- أستنتج معتمدا على قانون بيوسافار العوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار يمر في موصل.
- أحسب المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي مستمر في موصل مستقيم وطويل، وملف دائري، وملف لولبي.
- أصف خطوط المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في موصل مستقيم وطويل، وملف دائري، وملف لولبي.

المفاهيم والمصطلحات:

النفاذية المغناطيسية Magnetic Permeability

ملفٌّ لولبيّ Solenoid

مناطقُ مغناطيسيّة Magnetic Domains

قانون بيو - سافار The Biot–Savart Law

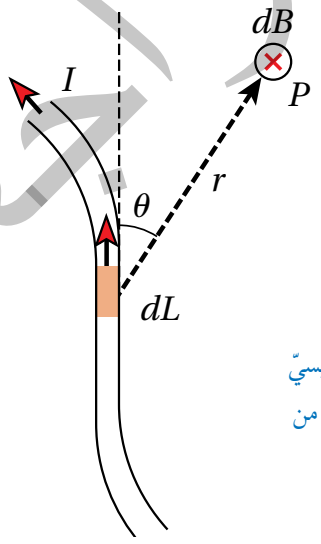
تعلّمْتُ أنَّ المغناطيس يولِّد حَوْلَه مجالًا مغناطيسيًّا، لكنّ الاستخدام العمليّ والتطبيقات التكنولوجيّة في الغالب تعتمد على المغناطيس الكهربائيّ؛ إذ يمكنُ توليد مجالٍ مغناطيسيٍّ بتمرير تيّار كهربائيٍّ في مُوصل. هذا ما توصل إليه العالم الدنماركي أورستد، عندما لاحظ انحراف إبرة بوصلة وضعت أسفل سلك يمر فيه تيار كهربائي، وفسر ذلك بتولّد مجال مغناطيسي حول السلك أدى إلى انحراف إبرة البوصلة.

تجربة أورستد كانت البداية لاكتشاف العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسية، فالشحنة الكهربائية المتحركة تولد حولها مجالًا مغناطيسيًا، والتيار الكهربائي الذي يمثل شحنات متحركة، يولد حوله مجالًا مغناطيسيًا.

جان بيو J.Biot وفيليكس سافار F.Savart؛ عالمان فرنسيّان تابعا أبحاثهما في الموضوع نفسه، إلى أن توصّلا تجريبيًّا إلى علاقةٍ رياضيةٍ لحساب المجال المغناطيسيّ الناتج عن قطعة من موصل يحمل تيارًا كهربائيًا، كما في الشكل (21)، عُرفت العلاقة بقانون بيو–سافار، وهو:

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{IdL \sin\theta}{r^2}$$

حيث (dB) مقدار المجال المغناطيسيّ عند النقطة (P) الناشئ عن قطعة صغيرة (dL) من موصلٍ يسري فيه تيّار كهربائيّ (I). والمسافة؛ (r) هي مقدار المُتّجه الذي يمتدُّ من (dL) إلى النقطة (P) ويصنع زاوية (θ) مع مُتّجه الطول للقطعة (dL).



الشكل (21): المجال المغناطيسيّ الجزئيّ الناتج عن قطعةٍ صغيرةٍ من موصلٍ يحمل تيّارًا كهربائيًّا.

قيد الإعداد والمراجعة

يرمز (μ_o) إلى ثابت النفاذية المغناطيسيّة للفراغ (أو الهواء)، وقيمته ($4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A)، ويعبّر مقدار **النفاذيّة المغناطيسيّة Magnetic permeability** عن قابلية الوسط لتدفُّق خطوط المجال المغناطيسيّ خلاله. حيث تكونُ أقلّ نفاذيّةً للفراغ وأكبرُها للحديد والموادّ المغناطيسيّة الأُخرى.

المجال المغناطيسيّ الناشئ عن موصلٍ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا

Magnetic Field of a Current Carrying Conductor

يمثِّل المقدار (dB) في قانون بيو–سافار المجال الجزئي الناتج من قطعة صغيرة من موصل يحمِل تيارًا كهربائيًّا، ولحساب المجال المغناطيسي بالقرب من موصلٍ مُستقيمٍ لا نهائيِّ الطول يسري فيه تيّار كهربائيّ (I)، عند نقطة على مسافة عموديّة (r) منه؛ نستخدم حساب التكامُل في الرياضيّات، فنجمع المجالات المغناطيسيّة الجزئيّة (dB) الناتجة عن جميع مقاطع الموصل، ونحصل على العلاقة الرياضية الآتية:

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi r}$$

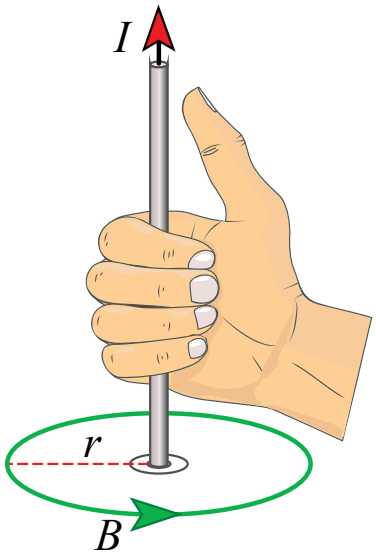
تُعطي هذه العلاقة مقدار المجال المغناطيسيّ عند النقاط جميعها الواقعة على محيط دائرةٍ نصفُ قطرِها (r)، ويمرُّ الموصل في مركزها ويكون عموديًّا على مستواها، كما في الشكل (22/ أ). ويكون مقدار المجال المغناطيسيّ ثابتٌ عند كلّ نقطةٍ على محيط الدائرة. وتُبيّن العلاقة السابقة أنّ مقدار المجال المغناطيسيّ عند نقطة مُعيّنة يتناسب طرديًّا مع التيار المارّ في الموصل وعكسيًّا مع بعد النقطة عن الموصل.

لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي حَوْل موصل مستقيم، تُستخدَم قاعدة اليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التيار، وتُلَفّ الأصابع حَوْل الموصل، فيشير اتجاه دورانها إلى اتجاه المجال المغناطيسي حَوْل الموصل كما يبيِّن الشكل 22/ أ).

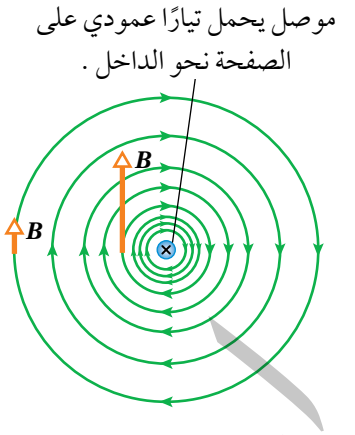
الشكل (22/ ب) يبيِّن خطوط المجال المغناطيسي حَوْل موصل مستقيم لا نهائي الطول يحمِل تيارًا باتجاه محور (z–)، حيث تشكِّل الخطوط دوائر مُتّحِدة المركز مع الموصل، ويمثِّل التباعد بين الخطوط العلاقة العكسية بين مقدار المجال (B) والبُعْد عن الموصل (r). ولتحديد اتجاه المجال عند أيّ نقطة بالقرب من الموصل، يُرسَم مماس على خط المجال عند تلك النقطة كما هو مُبيَّن في الشكل.

تجدرُ الإشارة إلى أنّ المجال المغناطيسيّ يساوي صفرًا عند أيّ نقطةٍ تقعُ على امتداد موصلٍ مُستقيمٍ ورفيعٍ يحمل تيّارًا كهربائيًّا؛ حيث تكون الزاوية (θ) بين مُتّجه موقع النقطة ومُتّجه طول الموصل (الواردة في قانون بيو– سافار)، تساوي صفرًا أو (180°)، ويكون ($\sin\theta = 0$).

✓ **أتحقّق:** أصفُ شكلَ خطوط المجال المغناطيسيّ حول موصلٍ مستقيمٍ لا نهائيّ الطول يحمل تيّارًا كهربائيًّا، وأبيّن كيف أُحدّد اتّجاهه عند نقطة.



(أ) : تحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ حول موصلٍ مستقيمٍ لا نهائيّ الطول باستخدام قاعدة اليد اليُمنى.



(ب): تحديد اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة.

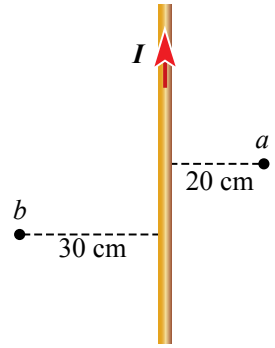
الشكل (22): المجالُ المغناطيسيّ حول موصلٍ مستقيمٍ لا نهائيّ الطول يحمل تيّارًا كهربائيًّا.

المثال 8

سلكٌ مستقيمٌ لا نهائيُّ الطول يحمل تيّارًا كهربائيًّا مقدارهُ (3 A)، بالاعتماد على الشكل (23/ أ)؛ أجدُ:

أ . المجال المغناطيسيّ عند النقطة (a).

ب. المجال المغناطيسيّ عند النقطة (b).



الشكل (23/ أ): جزء من سلك مستقيم لا نهائي الطول يحمل تيارًا كهربائيًّا.

المعطيات: $I = 3\ \text{A},\ r_a = 0.2\ \text{m},\ r_b = 0.3\ \text{m}$

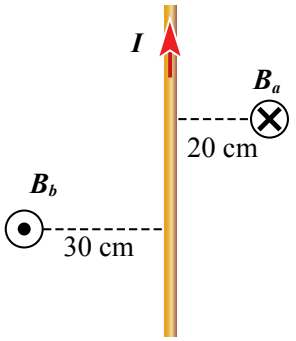
المطلوب: $B_a = ?,\ B_b = ?$

الحلّ:

أ . مقدار المجال عند النقطة (a):

$$B_a = \frac{\mu_o I}{2\pi r_a} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3}{2\pi \times 0.2} = 3 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليُمنى؛ بِرسم مماس على خط المجال عند النقطة، فإنَّ اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند النقطة (a) يكون داخلاً في الصفحة وعموديًّا عليها. كما في الشكل (23/ ب).



الشكل (23/ ب): اتّجاه المجال المغناطيسيّ على جانبي سلك مستقيم لا نهائي الطول يحمل تيارًا كهربائيًّا.

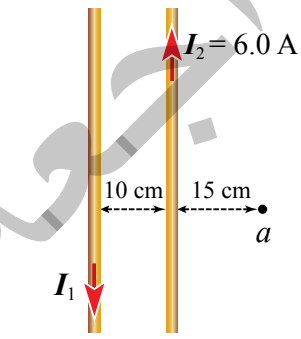
ب. مقدار المجال عند النقطة (b):

$$B_b = \frac{\mu_o I}{2\pi r_b} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3}{2\pi \times 0.3} = 2 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى فإنَّ اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند النقطة (b) يكون خارجًا من الصفحة وعموديا عليها، كما يبيّن الشكلُ (23/ ب).

المثال 9

سلكان مستقيمان لا نهائيًّا الطولِ ومتوازيان، يحملان تيّارين كهربائيّين متعاكسين كما في الشكل (24). أجدُ مقدار التيّار (I_1) الذي يجعل المجال المغناطيسيّ المُحصّل عند النقطة (a) يساوي صفرًا.



الشكل (24): نقطةٌ في مجال سلكين متوازيين لا نهائيَّيْ الطولِ يحملان تيّارين كهربائيّين متعاكسين.

المعطيات: $B = 0,\ I_2 = 6.0\ \text{A},\ r_2 = 0.15\ \text{m},\ r_1 = 0.25\ \text{m}$

المطلوب: $I_1 = ?$

وفد الإعداد والمراجعة

الحلّ:

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى، فإنَّ المجالين $(\boldsymbol{B}_1)$ و $(\boldsymbol{B}_2)$ عند النقطة (a) متعاكسان في الاتجاه، وتكون محصلتهما صفرًا، عندما يتساويا في المقدار:

$$B_1 = B_2$$

$$\frac{I_1}{r_1} = \frac{I_2}{r_2} \Rightarrow I_1 = \frac{r_1 I_2}{r_2}$$

$$I_1 = \frac{0.25 \times 6}{0.15} = 10\ \text{A}$$

تمرين

أستخدم الأرقام: موصلان مستقيمان متوازيان لانهائيّا الطول؛ المسافة بينهما (30 cm)، يحمل أحدهما تيّارًا كهربائيًّا يساوي ثلاثة أمثال التيّار الذي يحمله الموصل الثاني. أُحدّد نقطةً على الخطّ العموديّ الواصل بينهما؛ ينعدم عندها المجال المغناطيسيّ عندما يكون التياران بالاتّجاه نفسه.

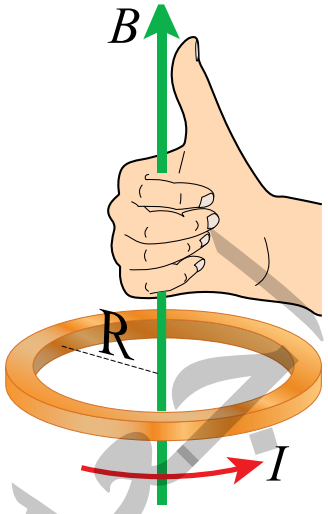
المجال المغناطيسيّ الناشئ عن ملف دائري

Magnetic Field of a Circular Coil

عند تشكيل سلك على صورة ملفٍّ دائريٍّ نصفُ قطره (R) يتكوّن من عددٍ (N) لفّة؛ وسريان تيار كهربائي (I) فيه، يتولّد داخل المِلفّ مجال مغناطيسي، وباستخدام حساب التكامل على قانون بيو–سافار، يمكن التوصُّل إلى أنَّ المجال المغناطيسي في مركز المِلفّ يُعبَّر عنه بالعلاقة الآتية:

$$B = \frac{\mu_o I N}{2R}$$

لتحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ في مركز ملفٍّ دائريٍّ؛ تُستخدَم قاعدة اليد اليُمنى، فعندما تشيرُ أصابع اليد الأربعة إلى اتّجاه التيّار في الملفّ، كما في الشكل (25)؛ فإنّ الإبهام يشير إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ عند مركز الملفّ.



الشكل (25): استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ في مركز ملفٍّ دائريّ.

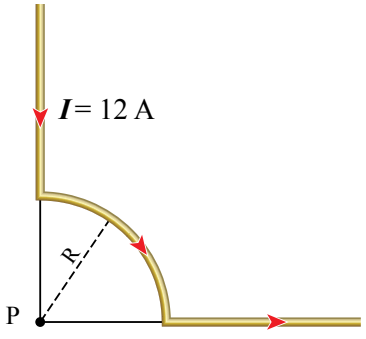
الربطُ بالحياةِ

تستخدم الملفات في صناعة المغانط الكهربائية، وفي العديد من الأجهزة مثل المحرك الكهربائي، والمحول الكهربائي، وفي الدارات الإلكترونية. حيث تحتوي هذه الأجهزة على ملفات تتكون من عدد كبير من اللفات المتراصة، بحيث يمكن اعتبار كل لفة وكأنها ملف دائري.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 10

يتكوّن سلكٌ من جزءٍ يشكّل ربع دائرةٍ نصفُ قطرها $R = 0.50\ \text{m}$، وجزأين مستقيمين لا نهائيّيْ الطول، كما في الشكل (26). أحسبُ مقدار المجال المغناطيسيّ عند النقطة (P) وأحدّدُ اتّجاهه.



الشكل (26): سلك يتكوّن من ثلاثة أجزاءٍ يشكّل أحدُها ربع حلقةٍ دائريّةٍ تقعُ النقطة P في مركزها.

المُعطيات: $I = 12\ \text{A},\ R = 0.50\ \text{m},\ N = 0.25$

المطلوب: $B = ?$

الحلّ:

بالنسبة للجزء الذي يشكل ربع دائرة؛ يمكن تطبيق العلاقة المستخدمة في حساب المجال المغناطيسي الناشئ عن مِلفّ دائري على أنَّ عدد اللفات: $N = \frac{1}{4}$.

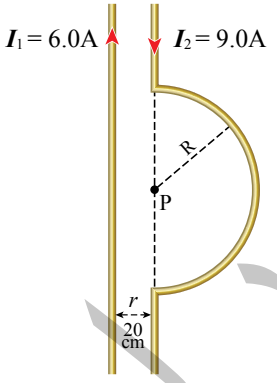
$$B = \frac{\mu_o IN}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 12 \times 0.25}{2 \times 0.50} = 3.8 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى، فإن اتجاه المجال عند النقطة (P) عموديٌّ على الصفحة نحو الداخل.

بالنسبة للجزأين المستقيمين؛ فإنّ النقطة (P) تقع على امتدادهما، لذلك يكون المجال المغناطيسيّ الناتج عنهما عند النقطة (P) يساوي صفرًا.

المثال 11

سلكان مستقيمان لا نهائيا الطول؛ يحتوي أحدهما على نصف حلقةٍ مركزُها (P)، ونصف قطرها $(0.2\ \pi\ \text{m})$، كما في الشكل (27). أحسب مقدار المجال المغناطيسيّ المُحصّل عند النقطة (P) وأحدّدُ اتّجاهه.



الشكل (27): المجال المغناطيسيّ المحصل لسلكين متجاورين.

المُعطيات: $N = 0.5, r = 0.20\ \text{m}, I_1 = 6\ \text{A}, I_2 = 9\ \text{A}, R = 0.2\pi\ \text{m}$

المطلوب: $B = ?$

الحلّ:

المجال الناتج عن السلك المستقيم لا نهائيّ الطول:

$$B_1 = \frac{\mu_o I_1}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 6.0}{2\pi \times 0.20} = 6.0 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

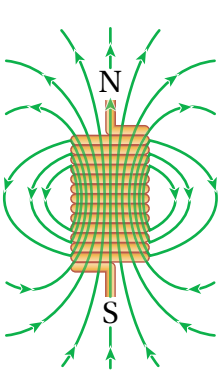
المجال الناتج عن الملفّ الدائريّ:

$$B_2 = \frac{\mu_o I_2 N}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 9.0 \times 0.50}{2 \times 0.2\pi} = 4.5 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

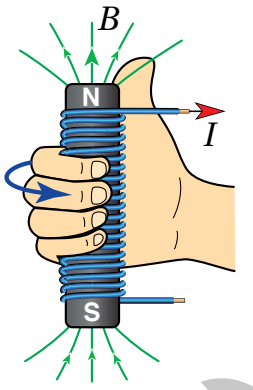
بتطبيق قاعدة اليد اليمنى، فإن اتجاهي المجالين عند النقطة (P) نحو داخل الصفحة وعموديٌّ عليها، فيكون المجال المُحصَّل:

$$B = B_1 + B_2 = 10.5 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

فريد الإعداد والمراجعة



(ب)



(أ)

الشكل (28):
(أ): استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ داخل ملفٍّ لولبيّ على امتداد محوره.
(ب): المجال المغناطيسي لملف لولبي حلقاته متراصة.

المجالُ الناشئُ عن ملفٍّ لولبيّ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا

Magnetic Field of a Solenoid Carrying a Current

الملفُّ اللولبيّ Solenoid سلكٌ موصلٌ ملفوفٌ في حلقاتٍ دائريّةٍ مُتراصّةٍ معزولةٍ عن بعضها بعضًا، ويأخذُ الملفُّ شكلاً أسطوانيًّا، كما في الشكل (28/ أ). عندما يسري في المِلفّ تيّار كهربائيٌّ فإنّه يولّد مجالًا مغناطيسيًّا يمكن حسابُ مقدارهِ على امتداد المحور داخل الملفّ وبعيدًا عن طرفيه باستخدام العلاقة الآتية:

$$B = \frac{\mu_o IN}{l}$$

وبقسمة عدد اللّفات الكُليّ (N) على طول الملف (l) نحصل على عدد اللّفات في وحدة الطول (n):

$$\frac{N}{l} = n$$

وعندها يمكن كتابة العلاقة السابقة على الصورة الآتية:

$$B = \mu_o In$$

باستخدام قاعدة اليد اليمنى؛ يمكن تحديد اتّجاه المجال المغناطيسيّ داخل الملفّ اللولبيّ؛ فعندما تُشير الأصابع الأربعة إلى اتّجاه التيّار في حَلَقات الملفّ، يشير الإبهام إلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ داخله، كما في الشكل (28/ أ). ويحدد اتّجاه خطوط المجال المغناطيسيّ القطبُ الشماليّ للملفّ؛ فيكون شماليًّا في جهة خروج خطوط المجال وجنوبيًّا في جهة دخولها. ويبين الشكل (28/ ب) خطوط المجال المغناطيسي الناشئ عن ملف حلقاته متراصة، وعندما تكون حَلَقات الملفّ اللولبيّ مُتراصّةً وطولُه أكبر بكثيرٍ من قطره؛ فإنّ المجال المغناطيسيّ داخله وبعيدًا عن طرفيه يكون منتظمًا.

أتحقّق: ما صفات الملفّ اللولبيّ التي تجعلُ المجال المغناطيسيّ داخله مُنتظمًا؟

أفكّر: بالاعتماد على العلاقة الرياضية الخاصة بالمجال المغناطيسيّ داخل ملف لولبي يسري فيه تيّار كهربائيّ؛ أبيّنُ أثر كُلٍّ ممّا يأتي في مقدار المجال المغناطيسيّ داخله:
- مضاعفة عدد اللّفات فقط.
- مضاعفة طول الملفّ فقط.
- مضاعفة عدد اللّفات وطول الملفّ معًا.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 12

ملفٌّ لولبيٌّ يتكوّن من عدد لفّاتٍ بمعدّل (1400) في كُلّ مترٍ من طوله. إذا نشأ داخلهُ مجالٌ مغناطيسيٌّ مقدارهُ (1.3×10^{-2} T)؛ فما مقدار التيّار الكهربائيّ المارّ فيه؟

المُعطيات: $B = 1.3 \times 10^{-2}\,\text{T},\ n = 1400\,\text{m}^{-1}$

المطلوب: $I = ?$

الحلّ:

$$B = \mu_o I n$$

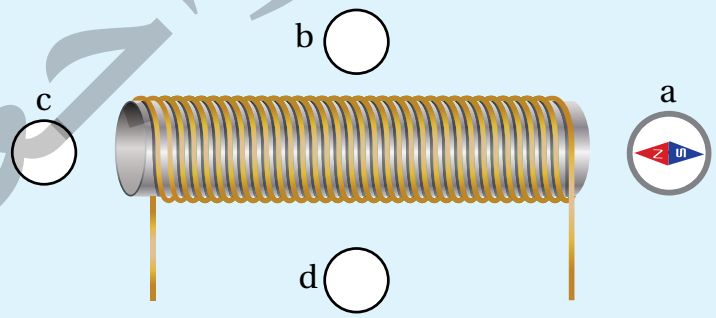
$$I = \frac{B}{\mu_o n} = \frac{1.3 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1400} = 7.4\,\text{A}$$

تمرين

أستنتج: أربع بوصلات وضعت بالقرب من ملف لولبي يحمل تيارًا عند النقاط (a, b, c ,d) المبينة في الشكل (29)، فانحرفت إبرة البوصلة الموضوعة عند النقطة (a) بالاتجاه المبين على الشكل.

أ . أحدد اتجاه التيار المار في الملف، موضحًا كيف توصلت إلى الإجابة.

ب. أرسم أسهمًا تحدد اتجاه انحراف إبرة البوصلة عند النقاط (b, c, d).



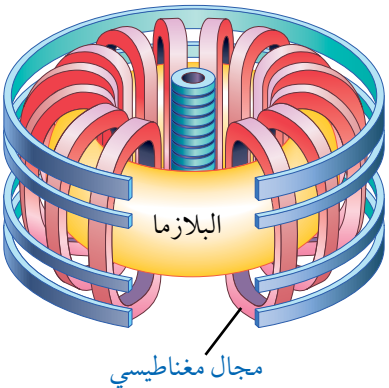
الشكل (29): المجال المغناطيسي حول ملف لولبي يحمل تيارًا.

الربط مع التكنولوجيا

حدوث تفاعل الاندماج النووي يتطلب تحويل الوقود النووي إلى مادة متأينة تسمى البلازما؛ تتكون من الكترونات سالبة الشحنة وأيونات موجبة ذات درجة حرارة مرتفعة جدًا تتجاوز قيمتها عدة ملايين درجة سلسيوس.

لا يمكن احتواء البلازما داخل أي جسم مادي لأن درجة حرارتها المرتفعة جدًا ستؤدي إلى انصهار الجسم.

لأن البلازما تتكون من جسيمات مشحونة متحركة؛ فإنه يمكن التأثير فيها بقوة مغناطيسية باستخدام مجال مغناطيسي يعمل على احتوائها في حيز مُحدّد داخل مفاعل الاندماج النووي كما في الشكل.



قيد الإعداد والمراجعة

التجربة 2

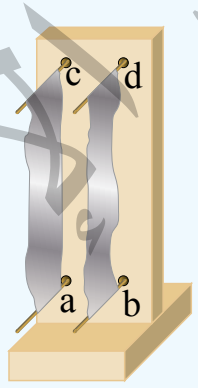
القوّة المغناطيسيّة بين موصلين متوازيين

الموادّ والأدوات: مصدرُ طاقةٍ كهربائيّةٍ (DC) منخفض القدرة، أسلاكُ توصيل، مقاومةٌ متغيّرة، ورقُ ألمنيوم، أسلاك نحاسية سميكة، قطعة خشب، جهازُ أميتر، مثقب.

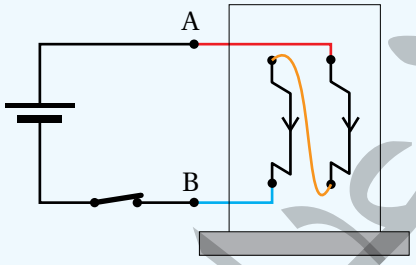
إرشادات السلامة: الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائيّة والتوصيلات، وعند استخدام المثقب.

خطوات العمل:

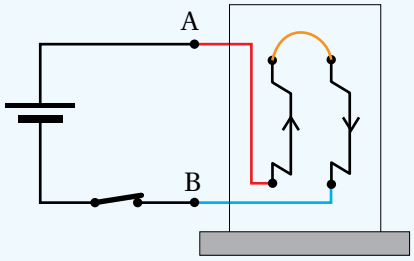
بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفّذ الخطوات الآتية:



الشكل (1)



الشكل (2)



الشكل (3)

1. أثقب قطعة الخشب أربعة ثقوب رفيعة، وأثبت في الثقوب أربعة أسلاك نحاسية سميكة، ثم أقص شريطين من ورق الألمنيوم بطول (18 cm) وعرض (4 cm)، وأثبت طرفيهما على الأسلاك النحاسية، كما في الشكل (1).
2. أركب الدارة الكهربائية مستعينا بالشكل (2)، في هذه الحالة فإن الموصلين (شريطي الألمنيوم) المتوازيين يحملان تيارين بالاتجاه نفسه.
3. **ألاحظ:** أشغّلُ مصدر الطاقة على تيّار منخفضٍ مدّةً زمنيةً قصيرة، وأراقبُ ما يحدث لشريطي الألمنيوم.
4. **أجرّب:** أعيد توصيل الدارة كما في الشكل (3)، في هذه الحالة فإن الموصلين المتوازيين يحملان تيارين باتجاهين متعاكسين، ثم أكرر الخطوة السابقة.

التحليلُ والاستنتاج:

1. أحدّدُ اتّجاهَ التيّار في كُلّ شريط ألمنيوم بناءً على طريقة التوصيل.
2. **أستنتجُ** اتّجاه القوّة المغناطيسيّة التي أثّر بها كلٌّ من الشريطين في الشريط الآخر.
3. **أُقارنُ** اتّجاه القوّة الذي استنتجْته من التجربة مع الاتّجاه الذي أتوصّلُ إليه بتطبيق قاعدة اليد اليمنى.
4. **أستنتجُ** علاقةً بين اتّجاه التيّار في كل من الشريطين ونوع القوّة المتبادلة بينهما؛ تجاذبٌ أم تنافر.

وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي

القوّةُ المغناطيسيّةُ بين موصلين متوازيين

Magnetic Force Between Two Parallel Conductors

درسْتُ سابقًا أنَّ الموصل الذي يحمِل تيارًا يتأثر بقوة مغناطيسية عند وضعه في مجال مغناطيسي خارجي، ودرسْتُ أيضًا أنَّ الموصل الذي يحمِل تيارًا يولِّد حَوْله مجالًا مغناطيسيًّا، فإذا وَضَعْنا موصلين متوازيين لا نهائيّي الطول يحملان تيارين (I_1) و (I_2) على بُعْد (r) من بعضهما، فإنَّ كلّ موصل سيتأثر بقوة مغناطيسية نتيجة وجوده في المجال المغناطيسي الذي يولِّده الموصل الآخر.

يبيِّن الشكل (30/ أ) موصلين متوازيين يحمِلان تيارين بالاتجاه نفسه، يولّد الموصل الأول مجالًا (B_1) يُعبَّر عن مقداره بالعلاقة الآتية:

$$B_1 = \frac{\mu_o I_1}{2\pi r}$$

وحيث إنّ الموصل الثاني يقع في هذا المجال ويتعامد معه، ويمرُّ فيه تيّار كهربائيّ (I_2)؛ فإنّ جزءًا منه طوله (L) يتأثّر بقوّةٍ مغناطيسيّةٍ مقدارُها:

$$F_{12} = B_1 I_2 L$$

بتعويض قيمة (B_1)؛ أحصل على القوّة:

$$F_{12} = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi r}$$

بالمثل، يمكن التوصُّل إلى أنَّ المجال (B_2) الذي يولّده الموصل الثاني، يؤثر في الموصل الأول بقوة (F_{21}) كما يبين الشكل (30/ ب) مساوية للقوة (F_{12}):

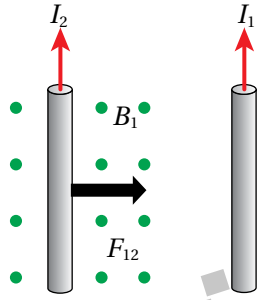
$$F_{21} = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi r}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى على كلّ موصل، نحدّد اتجاه (F_{12}) و (F_{21}) كما يبيِّن الشكل (31/ أ)، الذي يمثِّل مقطعًا عرضيًّا للسلكين، أما إذا انعكس اتجاه التيار في أحد الموصلين، فسينعكس اتجاه القوتين ليصبح كما في الشكل (31/ ب)، وبحَسَب القانون الثالث لنيوتن، فإنَّ القوتين (F_{12}) و (F_{21}) تشكِّلان زوجَي فِعْل ورَدّ فِعْل.

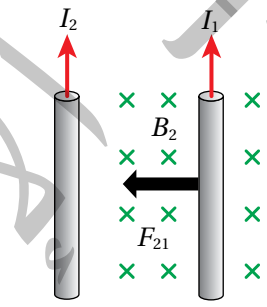
يتبيّن ممّا سبق أنَّ قوة مغناطيسية (F_B) متبادلة تنشأ بين موصلين متوازيين لا نهائيّي الطول يحمِلان تيارين كهربائيين، ويُحسَب مقدار هذه القوة المتبادلة بين وَحْدة الأطوال من الموصلين بالعلاقة الآتية:

$$\frac{F_B}{L} = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi r}$$

تكون القوة المتبادلة بين الموصلين قوة تجاذب عندما يكون التياران بالاتجاه نفسه، وتكون القوة المتبادلة بينهما قوة تنافر عندما يكون التياران باتجاهين متعاكسين.

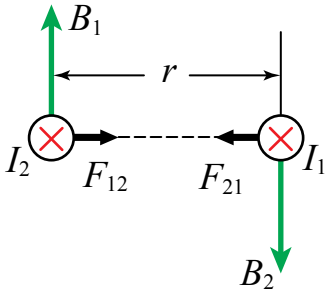


(أ): يتأثر الموصل الثاني بقوة مغناطيسية (F_{12}) نتيجة وجوده في المجال المغناطيسي (B_1) الناشئ من الموصل الأول.

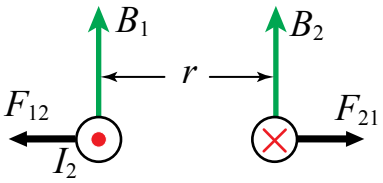


(ب): يتأثر الموصل الأول بقوة مغناطيسية (F_{21}) نتيجة وجوده في المجال المغناطيسي (B_2) الناشئ من الموصل الثاني.

الشكل (30): موصلان متوازيان يحملان تيارين بالاتجاه نفسه.



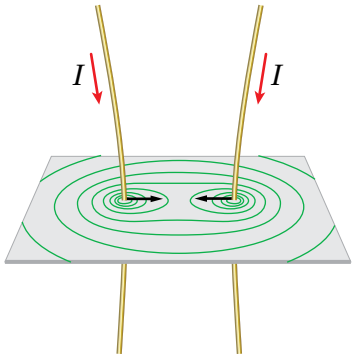
(أ): مقطعٌ عرضيٌّ في السلكين يبيّن قوّة التجاذُب المغناطيسيّة بينهما.



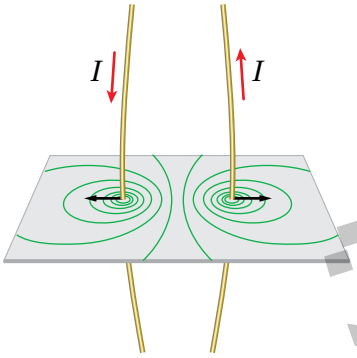
(ب): مقطع عرضي في السلكين يبيِّن قوة التنافر بينهما.

الشكل (31): القوة المتبادلة بين موصلين متوازيين.

قيد الإعداد والمراجعة



(ب): قوة التجاذب بين موصلين يحملان تيارين بالاتجاه نفسه.



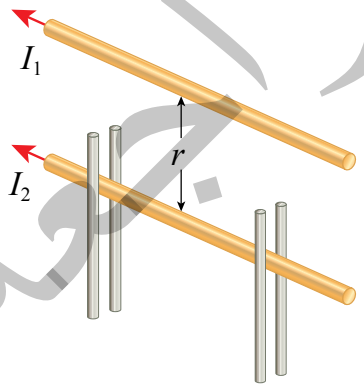
(أ): قوة التنافر بين موصلين يحملان تيارين باتجاهين متعاكسين .

الشكل (32): خطوط المجال المغناطيسي المحصّل لموصلين متوازيين يحملان تيارين متساويين.

يمكن التحقُّق من القوة المتبادلة بين الموصلين برسم خطوط المجال المغناطيسي المُحصَّل الناشئ عن الموصلين كما في الشكل (32). فعندما يكون التياران المارّان في الموصلين باتجاهين متعاكسين كما في الشكل (32/ أ)، تكون خطوط المجال في المنطقة بين الموصلين متقاربة، في حين تكون متباعدة في المنطقة الخارجية، فيتأثر كلّ موصل بقوة تنْقله من منطقة المجال المغناطيسي القويّ إلى منطقة المجال المغناطيسي الضعيف؛ لذا يتباعد الموصلان عن بعضهما (قوة تنافر)، أما الشكل (32/ ب)، فيبيِّن خطوط المجال المغناطيسي المُحصَّل عندما يكون التياران بالاتجاه نفسه، وبملاحظة مناطق المجالين القويّ والضعيف، أستنتج أنَّ القوة المغناطيسية في هذه الحالة تجعل الموصلين يقتربان من بعضهما (قوة تجاذُب).

المثال 13

موصِلان متوازيان لا نهائيا الطول يحمل كُلٌّ منهما تيّارًا كهربائيًّا (200 A)؛ الموصل العُلويُّ مُثبّت، والسُّفليّ قابلٌ للحركة رأسيًّا، كما في الشكل (33). إذا علمتُ أنّ وزن وحدة الأطوال من الموصل السفلي (0.2 N/m)؛ أجد المسافة (r) التي تجعله مُتّزنًا.



الشكل (33): موصلان مستقيمان لا نهائيا الطول ومتوازيان.

المُعطيات: $I_1 = 200\ \text{A}, I_2 = 200\ \text{A}, \dfrac{F_g}{L} = 0.2\ \text{N/m}$

المطلوب: $r = ?$

وزارة التربية والتعليم العالي والبحث العلمي

الحلّ:

عندما يتّزن الموصل السفليُّ، فإنّ وزن وحدة الأطوال منه يساوي القوّة المغناطيسيّة المؤثّرة لكُلّ وحدة طول.

$$\frac{F_g}{L} = \frac{F_B}{L}$$

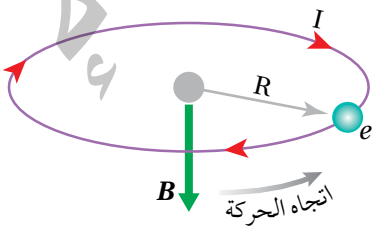
$$0.2 = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi r}$$

$$r = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 200 \times 200}{2\pi \times 0.2} = 4 \times 10^{-2}\ \text{m}$$

المغناطيسية الطبيعية Natural magnetism

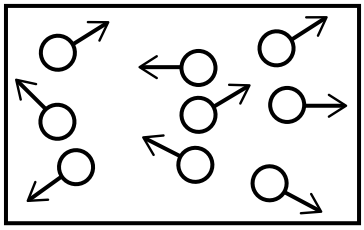
لاحظتُ فيما سبق أن سريان تيار كهربائي في موصل يولّد مجالا مغناطيسيا. فكيف لمغناطيس دائم لا يسري فيه تيار كهربائي أن يولد مجالا مغناطيسيا؟

تتكون المادة من ذرات تتحرك فيها الإلكترونات حول النواة في مسارات مغلقة كما يبين الشكل (34)، على شكل حلقات صغيرة جدًا؛ تشكل كل حلقة منها تيارًا كهربائيًا يؤدي إلى نشوء مجال مغناطيسي له قطبان شمالي وجنوبي، بحيث يمكن اعتبار المادة وكأنها تتكون من عدد كبير من المغانط الذرية الصغيرة.



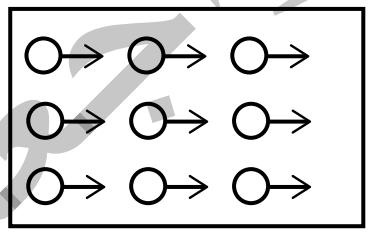
الشكل (34): حركة الإلكترون حول النواة في مسار مغلق، تؤدي إلى نشوء مجال مغناطيسي.

يستخدم مفهوم العزم الثناقطبي المغناطيسي لوصف مقدار واتجاه المجال المغناطيسي الناشئ عن المغانط الذرية، أتأمل الشكل (35)، فعندما تتوزع العزوم المغناطيسية في الاتجاهات كافة بشكل عشوائي فإن المجالات المغناطيسية الذرية تلغي بعضها (محصلتها تساوي صفر). أما عندما تترتب العزوم المغناطيسية في الاتجاه نفسه، كما في المغناطيس الدائم، فإن محصلة المجالات المغناطيسية تؤدي إلى نشوء مجال مغناطيسي في الحيز المحيط بالمغناطيس.



(أ)

أ . عندما تتوزع العزوم المغناطيسية في الاتجاهات كافة بشكل عشوائي فإن المجالات المغناطيسية الذرية تلغي بعضها.



(ب)

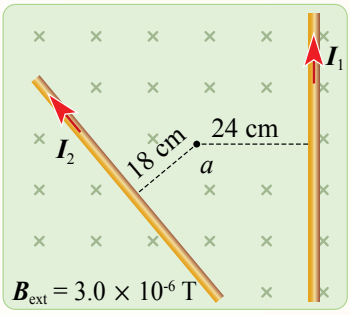
ب. عندما تترتب العزوم المغناطيسية في الاتجاه نفسه، فإن محصلة المجالات المغناطيسية الذرية تؤدي إلى نشوء مجال مغناطيسي.

الشكل (35): يمكن اعتبار المادة وكأنها تتكون من عدد كبير من المغانط الذرية الصغيرة.

مراجعة الدرس

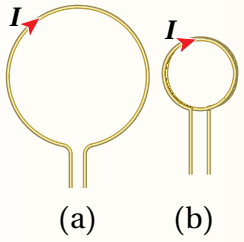
1. **الفكرةُ الرئيسة:** أذكرُ العوامل التي يعتمد عليها مقدار المجال المغناطيسيّ الناتج عن مقطعٍ صغيرٍ من موصلٍ يحملُ تيّارًا كهربائيًّا، عند نقطةٍ بالقرب من هذا الموصل.

2. **أستنتجُ:** يتحرّك إلكترونٌ في الفراغ في خطٍّ مستقيم؛ ما المجالات الناشئةُ عنهُ؟

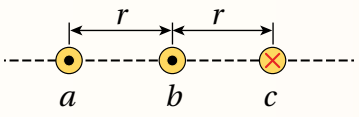


3. **أستخدم الأرقام:** بالاعتماد على الشكل، إذا كان ($I_1 = I_2 = 6.0$ A)؛ أجد مقدار المجال المغناطيسيّ المُحصّل عند النقطة (a)، وأحدّدُ اتّجاهه.

4. **أستنتج:** يبين الشكل سلكًا يحمل تيارًا (I). في الشكل (a) لُف السلك على شكل ملف دائري يتكون من لفة واحدة. وفي الشكل (b) أعيد تشكيل السلك على شكل ملف يتكون من لفتين، قطر كل منها ($\frac{1}{2}$) قطر اللفة في الشكل (a). أجد النسبة($\frac{B_b}{B_a}$)؛ حيث (B_a) و (B_b) المجالين المغناطيسيين في مركزي الملفين.



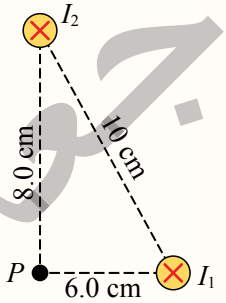
5. **أستنتج:** ثلاثة أسلاك مستقيمة لا نهائية الطول، يسري فيها تيارات كهربائية متساوية بالاتجاهات المبينة في الشكل، والبعد بين الأسلاك متساوي. أرتب الأسلاك تنازليا حسب مقدار القوة المغناطيسية المحصلة لكل وحدة طول المؤثرة في كل سلك.



6. **أستخدم الأرقام:** موصلان مستقيمان متوازيان لا نهائيا الطول؛ يحملُ كلٌّ منهما تيّارًا كهربائيًّا باتّجاهٍ داخلَ الصفحة، كما في الشكل. إذا كان تيّار الأول (12 A)، وتيار الثاني (40 A). أحسبُ كُلًّا من:

أ. القوّةَ التي يؤثّر بها الموصل الثاني في وحدة الأطوال من الموصل الأول مقدارًا واتّجاهًا.

ب. المجالَ المغناطيسيَّ المُحصّل عند النقطة (P) مقدارًا واتّجاهًا.



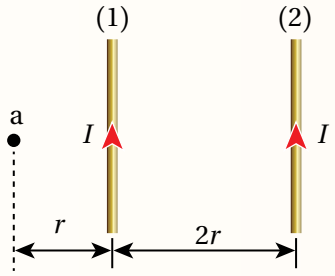
قيد إعداد المراجعة

7. **أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة ممّا يأتي:**

1. موصلان مستقيمان لا نهائيا الطول متوازيان والبعد بينهما (4.0 cm)، يمر فيهما تياران كهربائيان متعاكسان مقداريهما ($I_1 = 6.4$ A, $I_2 = 3.2$ A). مقدار المجال المغناطيسي المحصل عند نقطة في منتصف المسافة بينهما بوحدة (T) يساوي:

أ . 9.6×10^{-5} ب. 2.0×10^{-5} جـ. 9.6×10^{-7} د. 3.2×10^{-7}

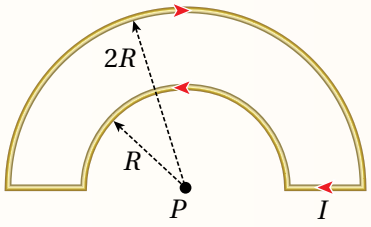
2. يبين الشكل موصلان متوازيان لا نهائيا الطول يمر فيهما تياران متساويان، إذا كان (B) يُمثل مقدار المجال المغناطيسي الناشئ عن الموصل(1) عند النقطة (a) فإن المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة نفسها بدلالة (B) يساوي:



أ . $\frac{2}{3}B$ ب. $\frac{3}{2}B$

جـ. $\frac{4}{3}B$ د . $2B$

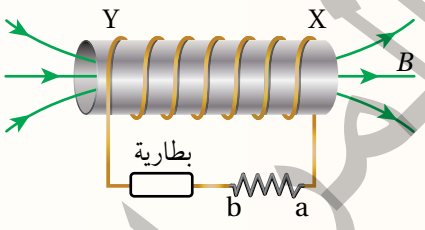
3. يبين الشكل سلكًا يسري فيه تيار كهربائي (I). معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل فإن المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (P) مقدارًا واتجاهًا:



أ . $\frac{1}{8}\frac{\mu_o I}{R}$، باتجاه $(+Z)$. ب. $\frac{1}{8}\frac{\mu_o I}{R}$، باتجاه $(-Z)$.

جـ. $\frac{3}{8}\frac{\mu_o I}{R}$، باتجاه $(+Z)$. د. $\frac{3}{8}\frac{\mu_o I}{R}$، باتجاه $(-Z)$.

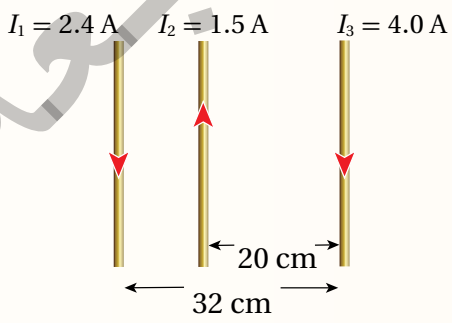
4. دارة تتكون من مِلفّ لولبي وبطارية ومقاومة. في أثناء مرور التيار الكهربائي في الدارة يتولّد داخل المِلفّ مجال مغناطيسي (B)، فإنَّ طرف المِلفّ الذي يصبح قطبًا مغناطيسيًّا شماليًّا، واتجاه التيار الكهربائي المار في المقاومة على الترتيب:



أ . (X)، من (b) إلى (a). ب. (Y)، من (b) إلى (a).

جـ. (X)، من (a) إلى (b). د . (Y)، من (a) إلى (b).

5. يبين الشكل ثلاثة أسلاك متوازية لا نهائية الطول، معتمدًا على البيانات المثبتة على الشكل فإن القوة المحصلة المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل الذي يسري فيه التيار (I_1) بوحدة (N):



أ . 12×10^{-6} ، باتجاه محور $(+x)$.

ب. 6×10^{-6}، باتجاه محور $(+x)$.

جـ. 6×10^{-6}، باتجاه محور $(-x)$.

د . 0

وزارة التربية والتعليم العالي والمراجعة

الفكرةُ الرئيسةُ:

يرتبط تولّد قوّة دافعة كهربائيّة حثّيّة وتيار كهربائي حثّي في دارة مغلقة بتغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يخترقها، تُحسب القوة الدافعة الكهربائية بقانون فارادي، ويُحدّد اتجاه التيار الكهربائي بقانون لنز.

نتاجاتُ التعلّمِ:

- أستكشف طرائق توليد قوة دافعة كهربائية حثية في دارة كهربائية باستخدام مجال مغناطيسي.
- أُوظّف قانون فارادي في حساب مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثّية في دارة كهربائية.
- أحسب القوة الدافعة الحثية المتولّدة في موصل مستقيم متحرك في مجال مغناطيسي عموديّ عليه.
- أستخدم قانون لنز في الحثّ، مُحدِّدًا اتجاه التيار الحثّي في دارة كهربائية.
- أتوصل إلى علاقة رياضية تحدد العوامل التي يعتمد عليها معامل الحثّ الذاتي لِملفّ لولبي.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة
Induced Electromotive Force

قانون فارادي في الحثّ
Faraday's Law of Induction

قانون لنز Lenz's Law

الحثّ الذاتيّ Self Induction

معامل الحثّ الذاتيّ
Coefficient of Self Induction

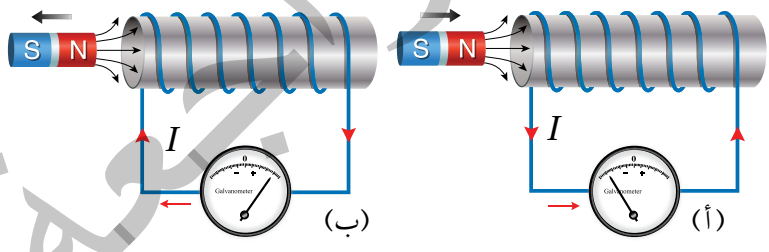
التيار الكهربائي الحثّي Induced Current

تعلمْتُ في الدرس السابق أنَّ التيار الكهربائي يولِّد مجالًا مغناطيسيًّا. سنتعرَّف في هذا الدرس الأثر العكسي؛ أي توليد تيار كهربائي باستخدام مجال مغناطيسي.

يوضّح الشكل (36) مغناطيسًا مستقيمًا، ومِلفًّا موصولًا بغلفانوميتر. عند تحريك المغناطيس نحو المِلفّ، ينحرف مؤشّر الغلفانوميتر في اتّجاه معيّن، دالًّا على سريان تيار كهربائي في المِلفّ كما يبيِّن الشكل (36/ أ). وعند إبعاد المغناطيس عن المِلفّ، ينحرف مؤشر الغلفانوميتر في اتجاه معاكس، دالًّا على سريان تيار كهربائي في المِلفّ باتجاه معاكس للحالة السابقة كما يبيّن الشكل (36/ ب)، ويمكن الحصول على النتائج نفسها عند تثبيت المغناطيس وتحريك المِلفّ.

هذه التجربة واحدة من تجارِب عدة أجراها العالمان جوزيف هنري ومايكل فارادي عام (1831م) بشكل مستقل، توصَّلا عَبْرها أنَّه يمكن توليد قوة دافعة كهربائية وتيار كهربائي في دارة باستخدام المجال المغناطيسي.

تسمّى هذه العملية الحثّ الكهرمغناطيسي، وتسمّى القوة الدافعة المتولِّدة في المِلفّ القوة الدافعة الكهربائية الحثّية، ويسمّى التيار الكهربائيّ المتولِّد في هذه الحالة **التيار الكهربائيّ الحثّي Induced current**. ولتعرُّف طرائق توليد تيار كهربائي حثّي، أنفِّذ التجربة الآتية:



(أ): يتولد تيار كهربائي حثّي في المِلفّ في أثناء حركة المغناطيس مُقترِبًا من المِلفّ.
(ب): يتولد تيار كهربائي حثّي في المِلفّ في أثناء حركة المغناطيس مُبتعِدًا عن المِلفّ، ويكون اتجاه التيار مُعاكِسًا للحالة (أ).

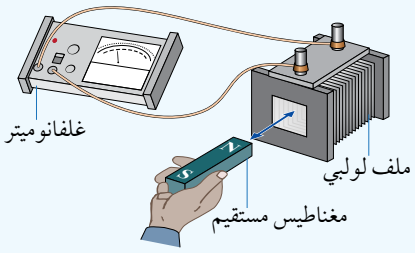
الشكل (36): توليد تيار كهربائي حثّي في مِلفّ.

التجربة 3

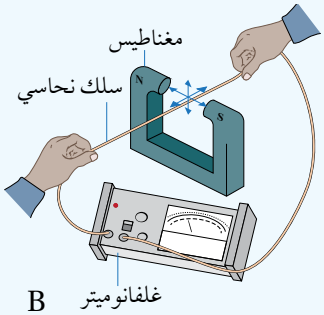
طرائق توليد تيّار كهربائيّ حثّيّ

الموادّ والأدوات: سلك نحاسي طوله (30 cm)، مغناطيس على شكل حرف C، غلفانوميتر، ملفّ لولبيّ، مغناطيس مستقيم، أسلاك توصيل.

إرشادات السلامة: الحذرُ من طرفي السلك الحادّين، ومن سقوط الأدوات على أرضيّة المختبر.



A



B

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أُنفِّذ الخطوات الآتية:

1. أصل طرفي الملف بالغلفانوميتر، كما في الشكل (A).
2. **ألاحظ:** أُحرّك القطب الشمالي للمغناطيس نحو طرف الملفّ، وأضعه داخل الملف، ثمّ أُحرّكه مبتعدًا عن الملفّ، وأُلاحظ قراءة الغلفانوميتر وجهةَ انحراف مؤشّره في كل حالة، وأُدوّن ملاحظاتي.
3. أُكرّر الخطوة السابقة، بتحريك القطب الجنوبي للمغناطيس بدلًا من القطب الشمالي، وأُدوّن ملاحظاتي.
4. أصِل طرفي السلك بطرفي الغلفانوميتر، وأمسك بجزءٍ من السلك مشدودًا بين قُطبي المغناطيس دون تحريكه، كما في الشكل (B).
5. **ألاحظ:** أُحرّك السلك المشدود بين قُطبي المغناطيس في كلّ اتجاه من الاتجاهات الستة الموضَّحة في الشكل، وأُلاحظ قراءة الغلفانوميتر وجهةَ انحراف مؤشّره في كل حالة، وأُدوّن ملاحظاتي.

التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتج:** استنادًا إلى ملاحظاتي في الخطوتين 2 ، 3، متى يتولّد تيار كهربائيّ في الملف؟ وهل يعتمد اتجاهه على اتجاه حركة المغناطيس؟ أُفسّر إجابتي.
2. **أستنتج:** في أيّ الحالات تولّد تيار كهربائيّ في السلك عند تحريكه بين قطبي المغناطيس؟ وفي أيّها لم يتولّد تيار كهربائيّ؟ ماذا أستنتج؟
3. **أتوقّع:** هل يتولّد تيار كهربائيّ إذا ثبّتُّ السلك أو الملفّ، وحرّكتُ المغناطيس؟

قيد الإعداد والمراجعة

القوة الدافعة الكهربائية الحثية Induced Electromotive Force

أستنتج من الجزء الأول من التجربة أنه يمكن توليد قوة دافعة كهربائية حثية في دارة عند تقريب مغناطيس من ملف أو إبعاده.

عند اقتراب المغناطيس من المِلفّ، يزداد عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق المِلفّ، وفي أثناء ابتعاده، يقلّ عدد الخطوط التي تخترق المِلفّ. ولمّا كان التدفق عبر المِلف يتناسب طرديًا مع عدد الخطوط التي تخترق مساحة المِلف، فهذا يعني أن تولُّد القوة الدافعة الحثّية والتيار الحثّي مرتبط بالتغيُّر في التدفُّق المغناطيسي الذي يخترق الملف.

يُعرَّف التدفُّق المغناطيسي بطريقة مماثلة لتلك المُستخدَمة في تعريف التدفُّق الكهربائي، حيث يمكن التعبير عن التدفُّق المغناطيسي (Φ_B) رياضيًّا بأنَّه ناتج الضرب القياسي لمتَّجه المجال المغناطيسي ($\boldsymbol{B}$) ومتَّجه المساحة ($\boldsymbol{A}$)، ويُعبَّر عن مقداره بالعلاقة الآتية:

$$\Phi_B = BA\cos\theta$$

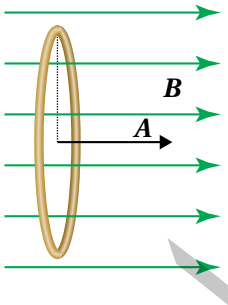
حيث (θ) الزاوية بين متجهي المجال والمساحة، ألاحظ الشكل (37). ويقاس التدفُّق المغناطيسي بوَحْدة ($T.m^2$) وتسمّى الويبر (Wb) بحَسَب النظام الدولي للوَحْدات.

كذلك يمكن توليد قوة دافعة حثية في سلك موصل عند تحريكه إلى الأعلى وإلى الأسفل داخل مجال مغناطيسي، كما في الجزء الثاني من التجربة. إن حركة السلك بهذه الطريقة تؤدي إلى تغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق الدارة التي يُعدّ السلك جزءًا منها.

أستنتج أن القوة الدافعة الحثية تتولد عند تغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق الدارة؛ وهذا التغير يمكن أن ينتج عن التغيُّر في مقدار المجال المغناطيسيّ، أو المِساحة التي يخترقها المجال المغناطيسيّ، أو الزاوية المحصورة بين اتّجاهَي المجال المغناطيسيّ والمِساحة.

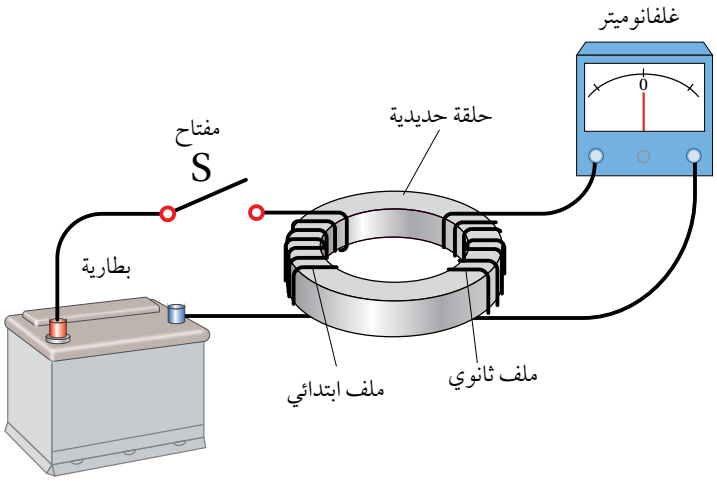
✓ **أتحقّق:** ما طرائق توليد قوّة دافعة كهربائيّة حثّيّة في ملفٍّ من سلك موصِل؟

أفكّر: عند تحريك مغناطيس وملف بالاتجاه نفسه وبمقدار السرعة نفسه، هل يتولد في الملف تيار كهربائي حثي؟ أفسر إجابتي.



الشكل (37): مجال مغناطيسي يخترق عموديًا المساحة (A) المحصورة بالملف.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (38): يتولّد تيار كهربائي حثّي في الملفّ الثانويّ عند تغيّر مقدار تيار الملفّ الابتدائيّ.

أفكّر: في الشكل (38)، أفسر ما يأتي:

أ . ينحرف مؤشر الغلفانوميتر لحظة فتح المفتاح، لكن انحراف المؤشر يكون باتجاه معاكس لانحرافه عند إغلاق المفتاح.

ب. لا ينحرف مؤشر الغلفانوميتر عند ثبات التيار المار في الملف الابتدائي.

يمكن أيضا توليد قوة دافعة حثية وتيار حثي بتنفيذ تجربة مماثلة لتجربة العالم فارادي الموضحة في الشكل (38). في هذه التجربة اسْتُخدم ملفان ملفوفان حول حلقة حديدية، الملف الابتدائي يتصل ببطارية ومفتاح، والملف الثانوي يتصل بغلفانوميتر. لحظة إغلاق المفتاح ينحرف مؤشر الغلفانوميتر باتجاه معين، ثم يعود إلى الصفر.

يمكن تفسير ذلك، أنه عند إغلاق المفتاح ينمو تيار كهربائي في الملف الابتدائي مولدًا مجالًا مغناطيسيًا، هذا المجال ينتقل إلى الملف الثانوي، فيزداد التدفق المغناطيسي الذي يخترقه، فيتولد فيه قوة دافعة حثية وتيارٌ حثّيٌ.

المثال 14

يوضّح الشكل (39/ أ) ملفًا دائريًّا موضوع في مجال مغناطيسيّ منتظم عموديّ على سطح الملف. هل يتولّد تيار كهربائيّ حثّي:

أ . عند تحريك الملف نحو اليسار أو نحو اليمين مع بقائه داخل منطقة المجال كما في الشكل (39/ أ)؟

ب. في أثناء تغيير شكل الملف بحيث تقل مساحته كما في الشكل (39/ ب)؟

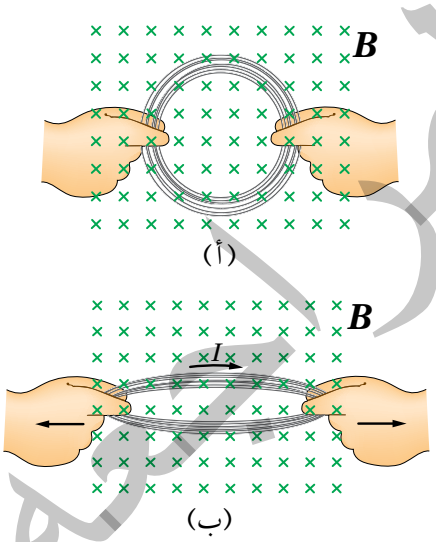
المُعطيات: الشكل (39).

المطلوب: تفسير تولّد تيار كهربائيّ حثّي.

الحلّ:

أ . لا يتولّد تيار كهربائيّ حثّي عند تحريك الملف داخل المجال نحو اليسار أو اليمين بسبب ثبات التدفق المغناطيسي.

ب. عند شدّ الملف يتغير شكله بحيث تقل مساحة سطحة، فيقلّ التدفّق المغناطيسي الذي يخترقه، ما يؤدي إلى تولّد قوة دافعة كهربائية حثّية، وتيار كهربائي حثّي.



الشكل (39):
(أ) تحريك الملف مع بقائه داخل منطقة المجال.
(ب) إنقاص مساحة الملف.

قانون فارادي في الحث Faraday's Law of Induction

توصل العالم فارادي اعتمادًا على الاستقصاءات السابقة إلى قانون سُمّي قانون فارادي في الحثّ الذي ينصّ على أنَّ:

«القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتولّدة في دارة كهربائيّة تتناسب طرديًّا مع المعدل الزمنيّ لتغيُّر التدفُّق المغناطيسيّ الذي يخترقها». ويُعبَّر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\varepsilon` = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA\cos\theta)$$

وعندما يحدث تغير في التدفق ($\Delta\Phi$) الذي يخترق دارة مكونة من (N) لفة في مدة زمنية (Δt)، فإنّه يُمكن كتابة قانون فارادي في الحثّ على النحو الآتي لحساب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتوسطة:

$$\bar{\varepsilon}` = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

ويُحسب التيار الحثي المار في الدارة باستخدام قانون أوم على النحو الآتي:

$$I = \frac{|\varepsilon`|}{R}$$

المثال 15

ملفّ دائريّ عدد لفّاته (100) لفة، ومِساحة مقطعه العرضي ($1.2 \times 10^{-4}\ m^2$)، موضوع في مجال مغناطيسيّ منتظم مقداره (1.0 T). بداية، مستوى الملف موازٍ لخطوط المجال المغناطيسي، ثمّ دار الملف بزاوية مقدارها (90°) حول محور يمر بمركزه بحيث أصبح مستواه عموديًّا على اتّجاه المجال المغناطيسيّ خلال (0.50 s). أحسب ما يأتي:

أ . التغيّر في التدفّق المغناطيسيّ عبر مقطع الملف.

ب. القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتوسطة المتولدة في الملف.

جـ. التيّار الكهربائيّ الحثّي المتوسط المارّ في الملف، إذا علمت أنّ المقاومة الكهربائيّة للملف (4.0 Ω).

المُعطيات: $N = 100\ \text{turns}, A = 1.2 \times 10^{-4}\ m^2, B = 1.0\ T, \theta_i = 90°, \theta_f = 0°, \Delta t = 0.50\ s, R = 4.0\ \Omega.$

المطلوب: $\Delta\Phi_B = ?, \bar{\varepsilon} = ?, I = ?.$

قيد الإعداد والمراجعة

الحلّ:

أ . يُحسب التغيّر في التدفّق المغناطيسيّ عبر مقطع الملف على النحو الآتي:

$$\Delta\Phi_B = \Phi_{B,f} - \Phi_{B,i}$$

$$= BA\cos\theta_f - BA\cos\theta_i = 1.0 \times 1.2 \times 10^{-4} \times (\cos 0^\circ - \cos 90^\circ)$$

$$= 1.2 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$$

ب. تُحسب القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتوسطة المتولّدة في المِلفّ على النحو الآتي:

$$\bar{\varepsilon} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -100 \times \frac{1.2 \times 10^{-4}}{0.50}$$

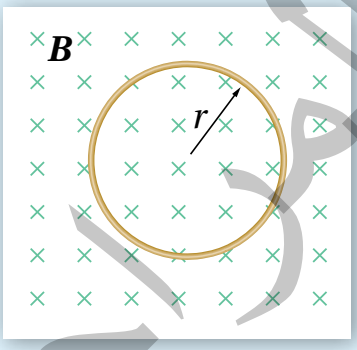
$$= -2.4 \times 10^{-2}\ \text{V}$$

جـ. يُحسب التيار الكهربائيّ الحثّي المتوسط المارّ في الملف على النحو الآتي:

$$\bar{I} = \left|\frac{\bar{\varepsilon}}{R}\right| = \left|\frac{-2.4 \times 10^{-2}}{4.0}\right| = 6.0 \times 10^{-3}\ \text{A} = 6\ \text{mA}$$

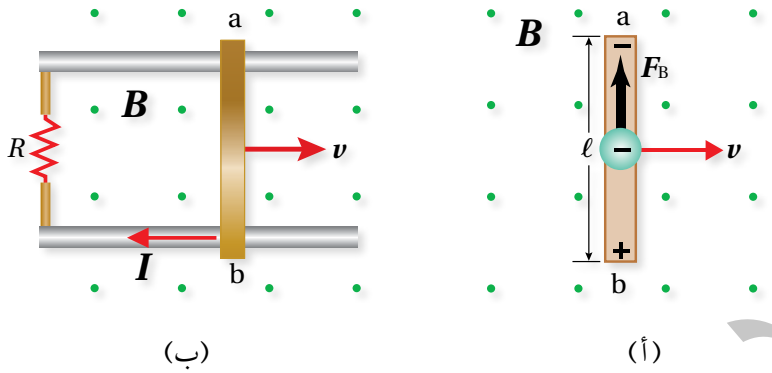
تمرين

أستخدم الأرقام: ملفّ دائري عدد لفّاته (20) لفة، ومتوسط نصف قُطر اللفّة الواحدة (1.0 cm) موضوع في مجال مغناطيسيّ منتظم مقداره (120 mT)، كما في الشكل (40). سُحِب الملفُّ خارج المجال المغناطيسيّ خلال زمن (0.20 s)، أحسبُ القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثيّة المتوسطة المتولّدة في الملفّ.



الشكل (40): ملفّ دائريّ موضوع في مجال مغناطيسيّ منتظم.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (41):
(أ) في أثناء قطع موصِل خطوط مجال مغناطيسي يتولّد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حثّية.
(ب) ويسري فيه تيار كهربائي حثّي عندما يصبح جزءًا من دارة كهربائية مغلقة.

القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّية في موصِل متحرّك Motional EMF

يوضّح الشكل (41/ أ) موصلًا يتحرك باتجاه محور $(+x)$ بسرعة ثابتة عموديًّا على طوله، وعلى اتّجاه مجال مغناطيسيّ منتظم (باتجاه محور $+z$). تتحرك الإلكترونات الحرّة في الموصل معه باتجاه محور $(+x)$ قاطعة خطوط المجال المغناطيسي باتجاه عموديٍّ عليه. فتتأثّر الإلكترونات بقوة مغناطيسيّة باتجاه محور $(+y)$ بحسب قاعدة اليد اليمنى. ونتيجة لذلك تتجمّع شحنات سالبة عند طرف السلك (a)، تاركةً خلفها شحنات موجبة عند الطرف (b)، فيصبح جهد الطرف (b) أكبر من جهد الطرف (a)، أيْ يتولّد فرق في الجهد الكهربائي بين طرفيه، يُسمّى القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة Induced electromotive force $(\mathscr{E})$. ويُعبَّر عن مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتولّدة في هذا الموصل بالعلاقة الآتية:

$$\mathscr{E} = B\ell v$$

حيث (B) مقدار المجال المغناطيسيّ، (ℓ) طول الموصل المتحرك ضمن المجال المغناطيسيّ، و (v) مقدار سرعة الموصل.

وعندما يكون الموصل جزءًا من دارة كهربائيّة مغلقة، كما في الشكل (41/ ب)، فإنه يسري فيها تيّار كهربائيّ حثّيّ، إذ يعمل الموصل عمل بطارية قطبها الموجب عند الطرف (b). ويستمر سريان التيار الكهربائيّ في الدارة الكهربائيّة ما دام الموصل متحركًا.

✓ **أتحقّق:** علام يعتمد مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثّيّة المتولّدة بين طرفي موصل يتحرك عموديًّا على طوله وعلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ؟

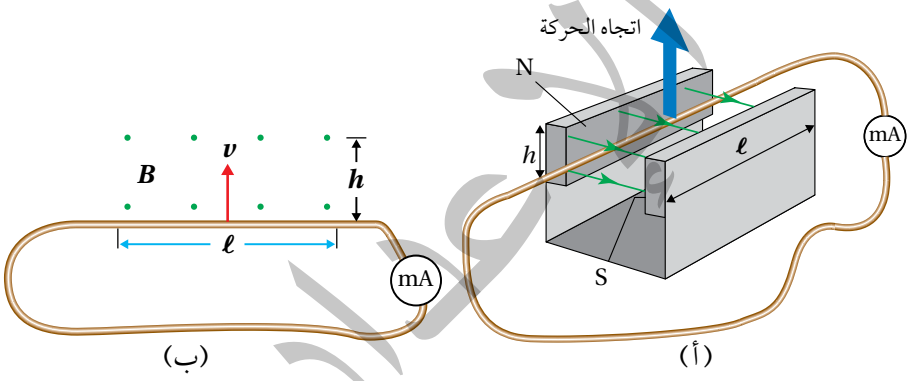
قيد الإعداد والمراجعة

المثال 17

يتقابل القطبان الشماليّ N والجنوبيّ S لمغناطيسين، طول كلٍّ منهما ($\ell = 20.0\ \text{cm}$)، وارتفاع كلٍّ منهما ($h = 6.00\ \text{cm}$)، بينهما مجال مغناطيسي منتظم مقداره (54.0 mT). أتأمّل الشكل (42/ أ). حُرِّك سلكٌ مشدودٌ موصولٌ بملي أميتر من الطرف السفلي للمغناطيسين إلى الطرف العلويّ عموديًّا على اتّجاه خطوط المجال المغناطيسيّ بسرعة ثابتة خلال مدّة زمنيّة مقدارها (0.200 s)، كما في الشكل (42/ ب). أحسب ما يأتي:

أ. القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتولّدة في السلك.

ب. التّيار الكهربائيّ الحثّي المارّ في الملي أميتر إذا علمت أنّ المقاومة الكهربائيّة للدارة (2.0 Ω).



الشكل (42):
(أ) تحريك سلك عموديًّا على اتجاه خطوط مجالٍ مغناطيسيّ منتظم.
(ب) منظر أمامي لحركة السلك داخل المجال المغناطيسي.

المُعطيات: $\ell = 20.0\ \text{cm}, h = 6.00\ \text{cm}, B = 54.0 \times 10^{-3}\ \text{T}, \Delta t = 0.200\ \text{s}, R = 2.0\ \Omega.$

المطلوب: $\mathscr{E} = ?,\ I = ?$

الحلّ:

أ . طول السلك داخل المجال المغناطيسيّ يساوي طول أيٍّ من قطبي المغناطيس. تُحسب القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتولّدة فيه على النحو الآتي ، علمًا بأنّ $\left(v = \frac{\Delta y}{\Delta t}\right)$، و $\Delta y = h$.

$$\mathscr{E} = B\ell v$$

$$= 54.0 \times 10^{-3} \times 20.0 \times 10^{-2} \times \frac{h}{\Delta t}$$

$$= 108 \times 10^{-4} \times \frac{6.00 \times 10^{-2}}{0.200}$$

$$= 3.24 \times 10^{-3}\ \text{V}$$

ب. يُحسب التيار الكهربائيّ الحثّي المارّ في الدارة على النحو الآتي:

$$I = \left|\frac{\mathscr{E}}{R}\right| = \left|\frac{3.24 \times 10^{-3}}{2.0}\right|$$

$$= 1.62 \times 10^{-3}\ \text{A} = 1.6\ \text{mA}$$

قيد الإعداد والمراجعة

قانون لنز Lenz's Law

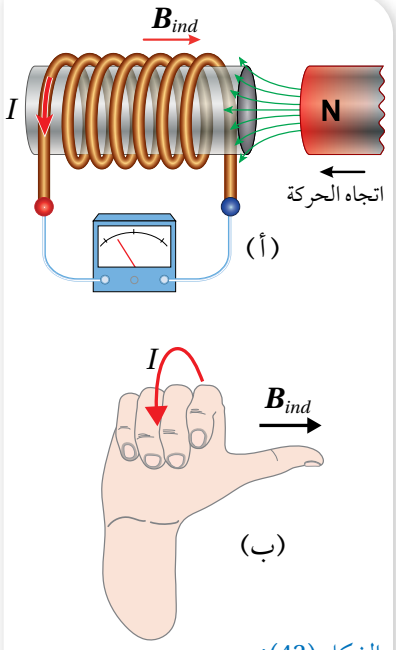
لاحظت في طرائق توليد القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيـة والتيـار الكهربائي الحثّي أنّ مؤشّر الغلفانوميتر أو الأميتر ينحرف باتّجاه معيّن عنـد تقريـب أحـد قطبي مغناطيس من ملف، وأن اتّجاه الانحـراف ينعكس عند إبعـاد القطب نفسه عن الملف. فما دلالة هذه المشاهدات؟ وكيف أُحدّد اتجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد؟

فسّر العالم الروسي لنز هذه المشاهدات من قانون أصبح يُعرف باسم **قانون لنز Lenz's law** الذي ينصّ على: "يكون اتجـاه التيـار الحثي المتولد في دارة مغلقـة بحيث يولد مجالًا مغناطيسيًا يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له".

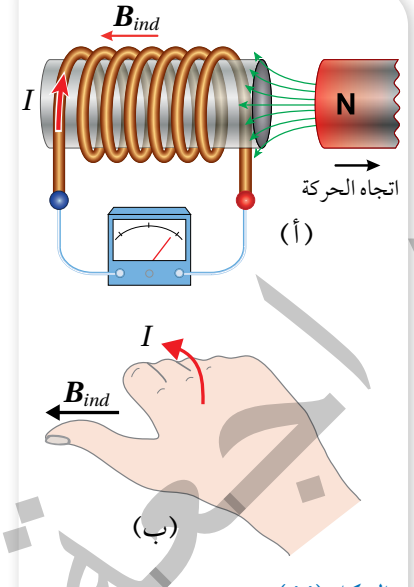
لتحديد اتجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد، أتأمّل الشكل (43/ أ) الذي يوضّح تقريب القطب الشمالي لمغناطيس من أحد طرفي ملف. ونتيجة لذلك يزداد التدفّق المغناطيسي الذي يخترق الملف، فتتولّد قوة دافعة كهربائيّة حثّية بين طرفيه، تؤدّي إلى مرور تيار كهربائيّ حثّي في الاتجاه الذي يولّد مجالًا مغناطيسيًّا يقاوم الزيادة في التدفّق المغناطيسي. وهذا يعني أنّ طرف الملفّ القريب من المغناطيس يصبح قُطبًا مغناطيسيًّا شماليًّا، فيتنافر مع القطب الشمالي للمغناطيس. ولتحديد اتجاه التيار، تستخدم قاعدة اليد اليمنى، كما في الشكل (43/ ب) حيث يُشير الإبهام إلى اتّجاه المجال المغناطيسي الناتج من الملف (B_{ind})، في حين يُشير اتجاه انحناء بقيّة الأصابع إلى اتّجاه التيار الكهربائيّ الحثّي في لفّات الملف.

أمّا عند إبعاد القطب الشمالي للمغناطيس عن طرف الملف الموضّح في الشكل (44/ أ) يقلّ التدفّق المغناطيسي الذي يخترقه، فتتولّد قوة دافعة كهربائية حثّية بين طرفيه تؤدّي إلى مرور تيار كهربائي حثّي في الاتجاه الذي يولّد مجالًا مغناطيسيًّا يقاوم النقصان في التدفق المغناطيسي، فيصبح طرف الملف القريب من المغناطيس قطبًا جنوبيًا، فتنشأ قوة تجاذب بين القطبين تُقاوم ابتعاد القطب الشمالي عن الملف. ويُحدد اتجاه التيار الكهربائيّ الحثّي المتولّد باستخدام قاعدة اليد اليمنى كما في الشكل (44/ ب).

✓ **أتحقّق:** كيف أحدد اتجاه التيار الحثي المتولد في الملف المبين في الشكل (43)، عند تقريب القطب الجنوبي لمغناطيس بدلًا من القطب الشمالي؟



الشكل (43):
(أ) تقريب القطب الشمالي لمغناطيس من أحد طرفي ملف.
(ب) استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه التيار الكهربائي الحثّي في الملف.



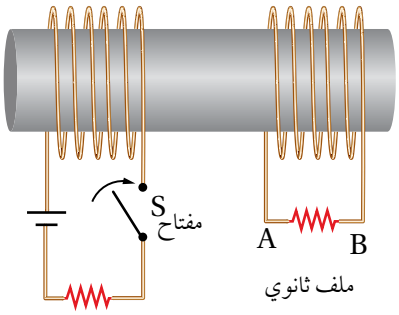
الشكل (44):
(أ) إبعاد القطب الشمالي لمغناطيس عن أحد طرفي ملف.
(ب) استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه التيار الكهربائي الحثّي في الملف.

المثال 18

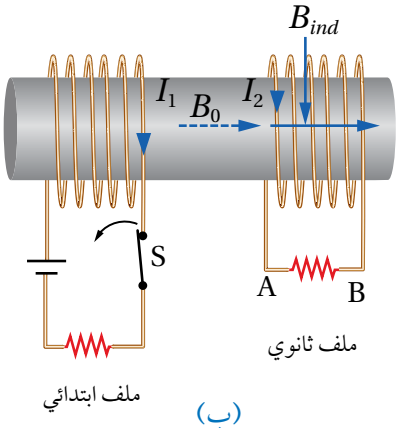
لُفّ ملفّان عدد لفات كلٍّ منهما (100) لفة، ومساحة المقطع العرضي لكلّ منهما ($3.0 \times 10^{-4}\ m^2$)، على قلب حديدي كما في الشكل (45/ أ). عند إغلاق مفتاح دارة الملف الابتدائيّ يتولّد مجال مغناطيسي داخله مقدارُه ($B_0 = 180\ mT$) ينتقل عبر القلب الحديدي، كما في الشكل (45/ ب)، وعند فتح الدارة الكهربائيّة يتلاشى هذا المجال المغناطيسيّ خلال (0.10 s). أُجيب عمّا يأتي:

أ . أحسب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتوسطة المتولّدة في الملف الثانويّ لحظة فتح المفتاح S.

ب. أُحدّد اتجاه سريان التيار الكهربائيّ الحثّي في المقاومة الكهربائيّة في الملف الثانويّ لحظة فتح المفتاح S.



(أ)



(ب)

الشكل (45):
(أ) ملفان ملفوفان حول القلب الحديدي نفسه.
(ب) اتجاه المجال المغناطيسي الناتج من الملف الابتدائي يكون باتجاه اليمين.

المُعطيات:

$N = 100\ turns,\ A = 3.0 \times 10^{-4}\ m^2,$
$B_0 = 180 \times 10^{-3}\ T,\ \Delta t = 0.10\ s.$

المطلوب: $\bar{\varepsilon} = ?$

الحلّ:

أ . التغيّر في التدفّق المغناطيسي ناتج من تغيّر مقدار المجال المغناطيسي الذي يخترق حلقات الملف الثانوي، وتحسب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتولّدة في الملف على النحو الآتي:

$$\bar{\varepsilon} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -N\left(\frac{\Phi_{B,f} - \Phi_{B,i}}{\Delta t}\right)$$

$$= -N\left(\frac{B_f A\cos 0.0^\circ - B_i A\cos 0.0^\circ}{\Delta t}\right) = -NA\left(\frac{B_f - B_i}{\Delta t}\right)$$

$$= -100 \times 3.0 \times 10^{-4} \times \left(\frac{0 - 180 \times 10^{-3}}{0.10}\right) = 5.4 \times 10^{-2}\ V$$

ب. المجال المغناطيسي الناتج عن الملف الابتدائي يكون نحو اليمين وينتقل عبر القلب الحديدي، وعند فتح دارة الملف الابتدائي، يقلّ التدفّق المغناطيسي الذي يخترق الملفّ الثانوي، فتتولّد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حثّية تؤدّي إلى مرور تيار كهربائي حثّي في الملف في الاتجاه الذي تجعله يُقاوم النقص في التدفّق المغناطيسي؛ أيْ يكون المجال المغناطيسيّ الحثّي باتجاه المجال المغناطيسيّ نفسه. وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى نجد أن اتّجاه التيار الكهربائيّ الحثّي المارّ في المقاومة يكون من B إلى A عبر المقاومة.

قيد الإعداد والمراجعة

الحثّ الذاتيّ Self Induction

يوضح الشكل (46) دارة كهربائيـة تحوي بطاريـة ومقاومـة (مصباح مثلًا) وملفًّا لولبيًّا وغلفانوميتر ومفتاح (S). عند إغلاق المفتاح (S) بوصلِه بالنقطة (*a*) تزداد شدّة إضاءة المصباح تدريجيًّا حتى تثبت، ما يعني أنّ التيار لا يصل إلى قيمتـه العظمى لحظيًّا، بـل ينمو تدريجيًّا من الصفر إلى قيمتـه العظمى، كما في الشكل (47/ أ).

أُفسّر ما سبق بأنّ وجود الملفّ اللولبيّ قد أعاق نموّ التيار الكهربائيّ الناتج من البطارية. فعند إغلاق المفتاح (S) يسري التيار الكهربائيّ في الدارة الكهربائيّة، فيتولّـد مجـال مغناطيسيّ في الملف اللولبيّ، ويـزداد التدفّـق المغنـاطيسـيّ الـذي يخترقـه. وبحسب قانـون لنز، ينشأ فيـه قوة دافعة كهربائيّة حثّية ذاتيّة Self–induced electromotive force (ε) تعاكس القوة الدافعـة الكهربائيّة للبطارية، ما يؤدّي إلى نموّ التيار الكهربائي إلى قيمته العظمى تدريجيًّا وليس لحظيًّا.

يُسمّى الملف اللولبي **محثًّا Inductor**، أمّا هذا التأثير، فيُسمّى **الحثَّ الذاتيّ Self induction**، ويُعرف بأنّه تولّد قوة دافعة كهربائيّة حثّية ذاتيّة في دارة كهربائيّة مغلقة نتيجة تغيّر التدفّق المغناطيسيّ بسبب تغيّر مقدار تيار الدارة نفسها.

ويوضّح الشكل (47/ ب) أنّ التيّار الكهربائيّ يتلاشى تدريجيًّا لحظة توصيل المفتاح (S) بالنقطة (*b*) في الدارة الكهربائيّة الموضّحة في الشكل (46)، حيث لا يصل مقداره إلى الصفر مباشرة. وأُلاحظ أنّ البطارية في هذه الحالة لم تعد جزءًا من الدارة الكهربائيّة.

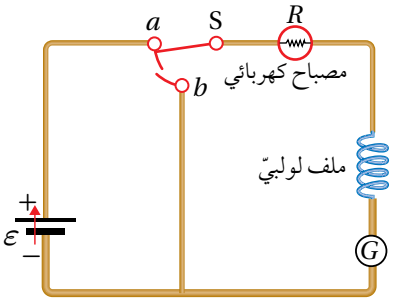
تُحسب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية الذاتيّة المتولّدة في المحثّ باستخدام قانون فارادي على النحو الآتي:

$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$

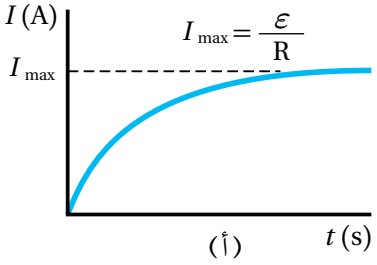
ونظرًا إلى أن التغير في التدفق المغناطيسي الناشئ في المحث يتناسب طرديًا مع التغير في التيار الكهربائي المسبب له، فإن القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتوسطة تتناسب طرديًا مع المعدل الزمني للتغير في التيار ويمكن التعبير عنها بالعلاقة الآتية:

$$\mathcal{E}_L = -L\frac{dI}{dt}$$

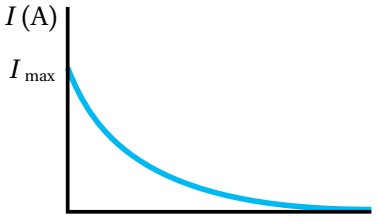
حيث (L) ثابت التناسب، ويُسمّى **معامل الحثّ الذاتيّ Coefficient of self induction** للمحثّ أو محاثّة Inductane المحثّ اختصارًا، ويُعرف بأنّه نسبة القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية الذاتيّة المتولّدة بين طرفي محثّ إلى المعدل الزمني للتغيّر في



الشكل (46): تزداد إضاءة المصباح تدريجيًّا عند وصل المفتاح S بالنقطة (*a*)، وتتلاشى إضاءة المصباح تدريجيًّا عند وصل المفتاح S بالنقطة (*b*).



(أ)



(ب)

الشكل (47):
(أ) نموّ التيار الكهربائي في دارة تحوي محثًّا ومصباحًا لحظة توصيل المفتاح S بالنقطة (*a*).
(ب) تلاشي التيار الكهربائي لحظة توصيل المفتاح S بالنقطة (*b*) في الدارة نفسها.

أُفكّر: في الشكل (47/ ب)، لماذا يتلاشى التيار الكهربائي تدريجيًّا ولا يصل مقداره إلى الصفر مباشرة؟

قيد الاعداد والمراجعة

مقدار التيار الكهربائيّ المارّ فيه، وهو مقياس لممانعة المحثّ للتغيّر في مقدار التيار الكهربائيّ المارّ فيه، ووحدة قياسه هي (V.s/A)، وتُسمّى هنري (H) بحسب النظام الدوليّ للوحدات، وذلك تكريمًا لجهود العالم جوزيف هنري في مجال الحثّ الكهرمغناطيسي. وأُعرّف وحدة الهنري henry (H) بأنّها محاثّة محثّ تتولّد بين طرفيه قوة دافعة كهربائيّة حثّية ذاتيّة مقدارها (1 V)، عندما يكون المعدّل الزمني للتغيّر في مقدار التيار الكهربائيّ المارّ فيه (1 A/s). ويوضّح الشكل (48) رمز المحثّ في الدارات الكهربائيّة.

الشكل (48): رمز المحثّ في الدارات الكهربائيّة.

محاثّة ملفّ لولبيّ Inductance of a Solenoid

يبين الشكل (49) محثًّا طوله (ℓ)، ومساحة مقطعه العرضي (A)، وعدد لفّاته (N) في دارة كهربائيّة. لحظة غلق المفتاح يتزايد مقدار التيار الكهربائيّ المارّ في الدارة تدريجيًّا من الصفر إلى (I) خلال مدة زمنيّة (Δt)، ويتزايد مقدار التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترق المحثّ من الصفر إلى (Φ_B) خلال المدّة الزمنيّة (Δt) نفسها. فيتولّد بين طرفي المحثّ قوة دافعة كهربائيّة حثّية ذاتيّة، يُعبَّر عن مقدارها المتوسط بالعلاقة الآتية:

$$\bar{\varepsilon}_L = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

ويُعبَّر أيضًا عن مقدارها المتوسط بالعلاقة الآتية:

$$\bar{\varepsilon}_L = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

وبمساواة العلاقتين السابقتين، وتعويض ($\Phi_{B,i} = 0$) عندما ($I_i = 0$)، أحصل على ما يأتي:

$$LI = N\Phi_B$$

ولمّا كانت خطوط المجال المغناطيسي داخل المحثّ عمودية على مساحة مقطعه العرضيّ، فإنّ التدفّق المغناطيسي الذي يخترقه يساوي ($\Phi_B = BA$). وبالتعويض عن مقدار المجال المغناطيسي داخل المحثّ بالعلاقة $\left(B = \frac{\mu I N}{\ell}\right)$، يُمكن كتابة العلاقة السابقة على النحو الآتي:

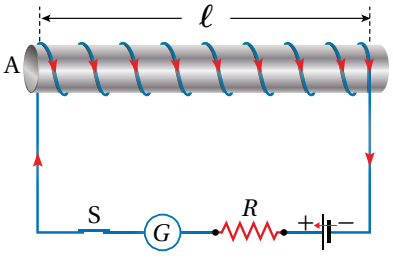
$$LI = NBA = NA \times \frac{\mu I N}{\ell}$$

بإعادة ترتيب العلاقة، فإن محاثة المحث يُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{\ell}$$

توضح هذه العلاقة أنّ معامل الحثّ الذاتيّ ثابت للمحثّ نفسه، وهو يعتمد على أبعاد المحث الهندسية المتمثلة في طول المحثّ (ℓ)، ومساحة مقطعه العرضي (A)، وعدد لفاته (N)، والنفاذيّة المغناطيسيّة لمادّة قلب المحثّ (μ). وإذا كان قلب المحثّ هواءً تُعوض النفاذيّة المغناطيسيّة للهواء (μ_o).

✓ **أتحقّق:** ما المقصود بمعامل الحثّ الذاتيّ لمحثّ؟ وما وحدة قياسه؟



الشكل (49): محثّ في دارة كهربائيّة.

✓ **أتحقّق:** ما العوامل التي يعتمد عليها معامل الحثّ الذاتيّ لمحثّ لولبي؟

وزارة الأوقاف والشؤون الدينية

المثال 20

إذا علمت أنّ طول المحثّ الموضّح في الشكل (49) يساوي (20 cm)، ومساحة مقطعه العرضي ($2.5 \times 10^{-5}\ m^2$)، وعدد لفّاته (200) لفة، والمحثّ ملفوف حول أنبوب كرتونيّ يملؤه الهواءُ، ويسري فيه تيارٌ كهربائيّ (5.0 A)، أحسب ما يأتي:

أ. معامل الحثّ الذاتيّ للمحثّ.

ب. التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترق المحثّ.

جـ. القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية الذاتيّة المتوسطة المتولّدة في المحثّ إذا عكست اتجاه التيار الكهربائي المارّ فيه خلال (0.10 s).

المُعطيات: $N = 200\ \text{turns}, \ell = 20 \times 10^{-2}\ m, A = 2.5 \times 10^{-5}\ m^2, I = 5.0\ A, \Delta t = 0.10\ s, \mu_o = 4\pi \times 10^{-7}\ T.m/A.$

المطلوب: $L = ?, \Phi_B = ?, \overline{\varepsilon}_L = ?$

الحلّ:

أ . يحسب معامل الحث من العلاقة الآتية:

$$L = \frac{\mu_o N^2 A}{\ell} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times (200)^2 \times 2.5 \times 10^{-5}}{20 \times 10^{-2}}$$

$$= 6.3 \times 10^{-6}\ H$$

ب. يحسب التدفق المغناطيسي باستخدام العلاقة الآتية:

$$L I = N \Phi_B$$

أُعيد ترتيبها بجعل (Φ_B) موضوع القانون على النحو الآتي:

$$\Phi_B = \frac{L I}{N}$$

$$= \frac{6.3 \times 10^{-6} \times 5.0}{200} = 1.6 \times 10^{-7}\ Wb$$

جـ. تحسب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية الذاتيّة المتوسطة المتولّدة في المحثّ.

$$\overline{\varepsilon}_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -6.3 \times 10^{-6} \times \frac{(-5.0 - 5.0)}{0.10}$$

$$= 6.3 \times 10^{-4}\ V$$

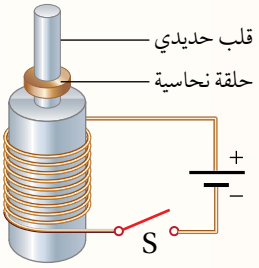
قيد الإعداد والمراجعة

مراجعة الدرس

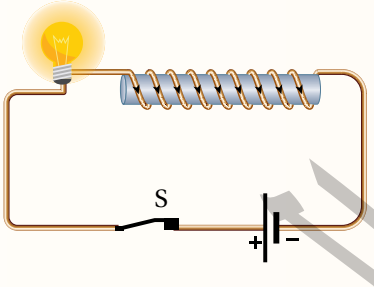
1. **الفكرة الرئيسة:** كيف أحسب القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في ملف؟ وكيف أحدد اتجاه التيار الكهربائي الحثي المار فيه؟

2. **أستنتج:** قطعتا نيوديميوم متماثلتان، إحداهما ممغنطة والأخرى غير ممغنطة. عند سقوط القطعة الممغنطة من السكون داخل أنبوب نحاسي طوله (ℓ) مثبت في وضع رأسي، فإنّها تستغرق زمنًا (t) لتخرج من فوّهته المقابلة. إذا أُسقطت قطعة النيوديميوم غير الممغنطة داخل الأنبوب نفسه من الارتفاع نفسه، فهل تستغرق زمنًا أكبر من الزمن (t) أم أقلّ منه لتخرج من فوّهته المقابلة؟ أُفسّر إجابتي.

3. **أستنتج:** ملفّ لولبيّ ملفوف على قلب حديديّ، وفوقه حلقة نحاسية حرّة الحركة، كما في الشكل المجاور. عند إغلاق المفتاح (S) تقفز الحلقة الفلزيّة إلى أعلى. أُفسّر هذا السلوك للحلقة.



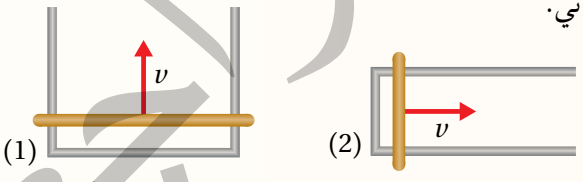
4. **أتوقّع:** يوضّح الشكل المجاور دارة كهربائيّة مغلقة. أتوقّع ما يحدث لإضاءة المصباح في أثناء:



أ. تقريب القطب الشمالي للمغناطيس من المحثّ.

ب. تقريب القطب الجنوبي للمغناطيس من المحثّ.

5. **أستنتج:** يبيّن الشكل المجاور دارتين موضوعتين في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (B)، الموصل المستقيم في الدارة (1) طوله ($2l$) وفي الدارة (2) طوله (l). الموصلان المستقيمان تحرّكا بمقدار السرعة نفسه (v)، فتولّد في الدارة (1) تيار كهربائي حثّي باتجاه حركة عقارب الساعة. أُجيب عمّا يأتي:



أ . ما اتجاه المجال المغناطيسي ($\boldsymbol{B}$)؟

ب. ما اتجاه التيار الكهربائي الحثّي في الدارة (2)؟

جـ. هل يكون مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثّيّة المتولِّدة في الدارة (1)، أكبر أم أقل أم مساوٍ لمقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثّيّة المتولِّدة في الدارة (2)؟ أفسر إجابتي.

6. **أستخدم الأرقام:** محثّ معامل حثّه الذاتيّ ($4.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{H}$)، موصول بدارة كهربائيّة. إذا تغيّر مقدار التيار الكهربائيّ المارّ فيها من ($0\ \mathrm{A}$) إلى ($8.0\ \mathrm{A}$) خلال ($0.10\ \mathrm{s}$)، أحسب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة الذاتيّة المتوسطة المتولّدة في المحثّ.

إعداد المراجعة

7. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

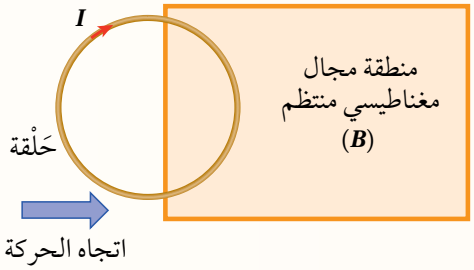
1. وَحْدة قياس معامل الحثّ الذاتيّ لمحثّ بحسب النظام الدوليّ للوَحْدات، هي:

أ. V.A/s ب. A.s/V جـ. V.A.s د. V.s/A

2. مِلفّ مستطيل الشكل يتكوّن من لفة واحدة ومساحة سطحه (A)، مغمور في مجال مغناطيسي ($\boldsymbol{B}$)، بحيث تكون الزاوية بين مستوى المِلفّ وخطوط المجال ($30°$). إذا تضاعف مقدار المجال المغناطيسي خلال مدّة زمنية مقدارها (Δt)، فإن التغير في التدفق المغناطيسي الذي يخترق المِلفّ خلال تلك المدّة يساوي:

أ. $BA\cos 30°$ ب. $2BA\cos 30°$ جـ. $BA\cos 60°$ د. $2BA\cos 60°$

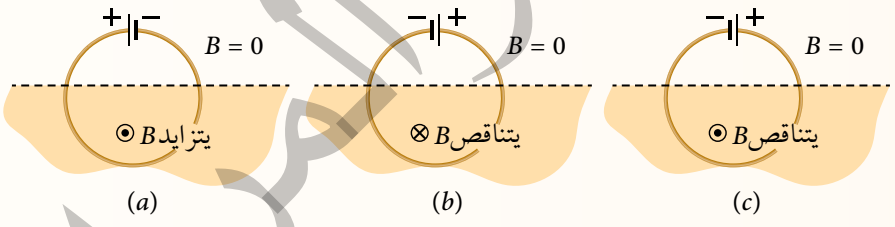
3. في أثناء دخول الحلقة المبينة في الشكل إلى منطقة مجال مغناطيسي منتظم ($\boldsymbol{B}$) يتولد في الحلقة تيار كهربائي حثّي بالاتجاه المبين في الشكل، فيكون المجال المغناطيسي ($\boldsymbol{B}$) باتجاه محور:



أ. $+z$ ب. $-z$

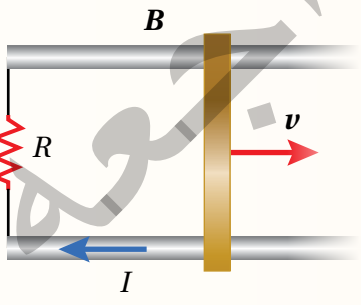
جـ. $+x$ د. $-x$

4. يبيّن الشكل المجاور حلقة تتصل ببطاريّة، ونصفها السفلي موضوع في مجال مغناطيسي منتظم، اتجاهه عمودي على مستوى الصفحة قد يكون للداخل أو للخارج، ومقداره قد يتزايد أو يتناقص. في أي الحالات الثلاث يكون اتجاه القوة الدافعة الكهربائية الحثّيّة المتولِّدة في الحَلْقة باتجاه القوة الدافعة الكهربائية للبطارية؟



أ. (b) فقط ب. (c) فقط جـ. (b) و (a) د. (b) و (c)

5. موصل مستقيم طوله (ℓ) مغمور داخل مجال مغناطيسي منتظم. عند سحب الموصل بسرعة ثابتة مقدارها (v) على مجرًى فلزّيّ باتجاه محور ($+x$)، يمرّ في المقاومة (R) تيار كهربائي حثّيّ (I) بالاتجاه المبين في الشكل. إنّ مقدار المجال المغناطيسي واتجاهه:



أ. $\frac{\ell v}{IR}$، باتجاه $(+z)$ ب. $\frac{IR}{\ell v}$ باتجاه $(+z)$

جـ. $\frac{\ell v}{IR}$، باتجاه $(-z)$ د. $\frac{IR}{\ell v}$ باتجاه $(-z)$

قيد الإعداد والمراجعة

التصويرُ باستخدام تقنية الرنين المغناطيسيّ (MRI)

تسعى المستشفيات في الأردنّ دائمًا إلى الحصول على أحدث التكنولوجيا الطبيّة، ومنها أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسيّ.

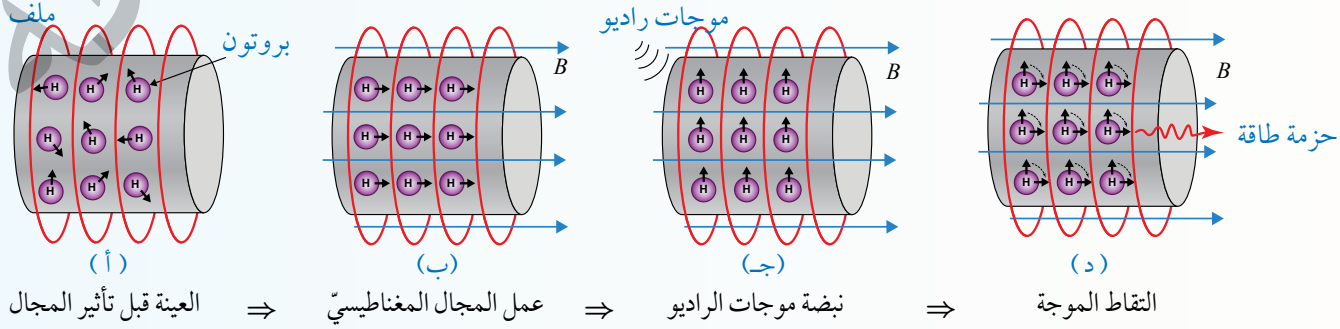
التصوير بالرنين المغناطيسيّ Magnetic resonance imaging (MRI) تقنيةٌ غير جراحيّةٍ تنتجُ صورًا تشريحيّةً واضحةً ثلاثيّةَ الأبعاد لجسم الإنسان، تساعدُ في الكشف عن الأمراض وتشخيصها. يتكوّن جهاز الرنين المغناطيسيّ من ثلاثة أجزاءٍ رئيسةٍ هي؛ ملفّاتٌ مغناطيسيّة، ومصدر موجات راديو، وجهاز حاسوب.

تحتوي خلايا جسم الإنسان على نسبةٍ كبيرةٍ من الماء الذي يتكوّن من الأكسجين والهيدروجين، في ذرة الهيدروجين، يدور الإلكترون حول النواة بشكل يشبه دائرة صغيرة جداً. حركة الإلكترون هذه تشبه مرور تيار كهربائي في سلك دائري، ما يؤدي إلى توليد مجال مغناطيسي صغير داخل الذرة. هذا المجال المغناطيسي يُستخدم في التعبير عن مقداره واتجاهه مفهوم العزم الثناقطبي المغناطيسي الممثل بالمتجاهات المبينة في الأشكال (أ) إلى (د).

خطواتُ عمل الجهاز:

- تكون اتجاهات العزوم المغناطيسية لذرات الهيدروجين موزعة في الاتجاهات كافة كما في الشكل (أ)، وعند تعريض الجسم لمجال مغناطيسي خارجي، تصطف العزوم المغناطيسيّة لذرّات الهيدروجين في اتّجاهِ المجال المغناطيسيّ نفسه، وتصبح في وضع اتّزان، الشكل (ب).
- يُطلق مصدرُ موجات الراديو نبضةً من الموجات تخترق الجسم؛ فتؤدّي إلى انحراف العزوم المغناطيسيّة لذرات الهيدروجين بزاوية (90°) عن اتّجاه المجال المغناطيسيّ الخارجي، الشكل (جـ).
- عند توقُّف نبضة موجات الراديو تبدأ العزوم بالعودة للاصطفاف باتّجاه المجال المغناطيسيّ الخارجيّ، وينتُج عن ذلك انبعاثُ حزمةٍ من الموجات الكهرمغناطيسيّة تلتقطها مستشعرات التصوير وتحوّلها عن طريق برمجيّاتٍ محوسبةٍ إلى صورٍ تشريحيّة، الشكل (د).

تختلف العزوم المغناطيسيّة في زمن عودتها إلى حالة الاتزان (الاصطفاف باتّجاه المجال المغناطيسيّ الخارجي)، وفي مقدار طاقة الموجات الكهرمغناطيسيّة التي تبعثها؛ وذلك حسب تركيب النسيج والطبيعة الكيميائية للجزيئات فيه، وبذلك يتمكن الأطباء من التفريق بين الأنسجة المختلفة (السليمة والمصابة بمرض مُعيّن مثلا) بناءً على هذه الخصائص المغناطيسيّة.



1. أضعُ دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. أي من الآتية ليست من خصائص القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة متحركة في مسار دائري داخل مجال مغناطيسي منتظم:

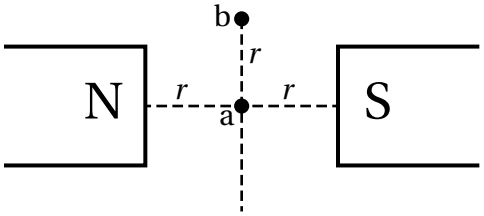
أ . يتغير اتجاهها بحيث تبقى عمودية على متجهي المجال والسرعة.

ب. تعمل على تغيير اتجاه السرعة مع بقاء مقدار السرعة ثابت.

جـ. تكسب الشحنة تسارعا اتجاهه نحو مركز المسار الدائري.

د . تبذل شغلا على الشحنة يعمل على زيادة طاقتها الحركية.

2. في الشكل المجاور قطبان مغناطيسيان مختلفان متجاوران، والنقطتان (a,b) تقعان في المجال المغناطيسي للقطبين، إذا أدخل إلكترون إلى منطقة المجال، فإنه يتأثر بأكبر قوة مغناطيسية عندما يتحرك بسرعة (v) لحظة مروره من النقطة:



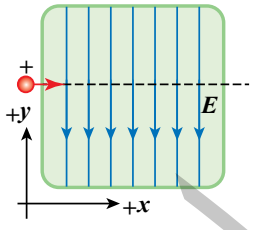
أ . a، باتجاه $(+x)$.

ب. b، باتجاه $(+x)$.

جـ. a، باتجاه $(+y)$.

د . b، باتجاه $(+y)$.

3. يتحرّك أيونٌ موجبٌ باتّجاه محور $(+x)$، داخل غرفة مُفرغة فيها مجالٌ كهربائيٌّ باتّجاه $(-y)$،كما في الشكل. في أيّ اتّجاه يجب توليد مجالٍ مغناطيسيٍّ بحيث يمكن أن يؤثّر في الجُسيم بقوّةٍ تجعلهُ لا ينحرف عن مساره؟



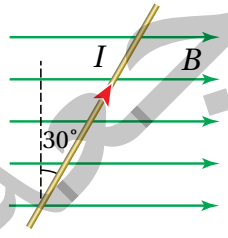
أ . باتّجاه محور $(+y)$، للأعلى.

ب. باتّجاه محور $(-y)$، للأسفل.

جـ. باتّجاه محور $(+z)$، نحو الناظر.

د . باتّجاه محور $(-z)$، بعيدًا عن الناظر.

4. موصل مستقيم يحمل تيارًا $(I = 8.0\ \text{A})$، وموضوع في مجال مغناطيسي $(B = 0.20\ \text{T})$، كما في الشكل. القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل مقدارًا واتجاهًا:



أ . $0.80\ \text{N/m}, +z$

ب. $0.80\ \text{N/m}, -z$

جـ. $1.39\ \text{N/m}, +z$

د . $1.39\ \text{N/m}, -z$

5. عندما يتحرّك جُسيمٌ مشحونٌ حركةً دائريّةً في مجال مغناطيسيّ منتظم؛ فإن نصف قطر المسار الدائري للجسيم يزداد:

أ . بزيادة المجال وزيادة الشحنة.

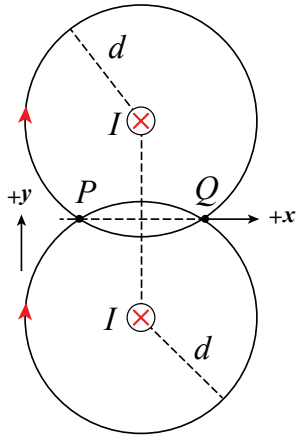
ب. بزيادة الكتلة ونقص المجال.

جـ. بنقص الكتلة ونقص السرعة.

د . بنقص الكتلة وزيادة المجال.

قيد الإعداد والمراجعة

6. سلكان مستقيمان متوازيان لانهائيّا الطول؛ يحملان تيّارين متساويين وباتّجاه $(-z)$ داخل الصفحة؛ النقطتان (P,Q) تبعدان عن السلكَين مسافاتٍ متساوية، كما في الشكل. كيف يكون اتّجاه المجال المغناطيسيّ المُحصّل عند النقطتين (P,Q)؟



أ . عند (P) باتّجاه $(+x)$، وعند (Q) باتّجاه $(+y)$.

ب. عند (P) باتّجاه $(-x)$، وعند (Q) باتّجاه $(-y)$.

جـ. عند (P) باتّجاه $(+x)$، وعند (Q) باتّجاه $(-x)$.

د . عند (P) باتّجاه $(+y)$، وعند (Q) باتّجاه $(-y)$.

7. يعمل العاكس في المحرك الكهربائي على عكس اتجاه التيار المار في الملف كل نصف دورة، وهذا يؤدي إلى أن:

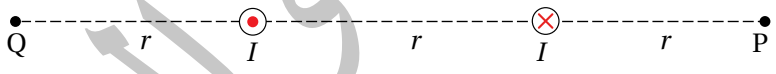
أ . تبقى القوى المغناطيسة المؤثرة في أضلاع الملف بالاتجاه نفسه، فيواصل دورانه باتجاه واحد .

ب. تبقى القوى المغناطيسة المؤثرة في أضلاع الملف بالاتجاه نفسه، فينعكس اتجاه دورانه.

جـ. تنعكس القوى المغناطيسية المؤثرة في أضلاع الملف، فيواصل دورانه باتجاه واحد.

د. تنعكس القوى المغناطيسية المؤثرة في أضلاع الملف، فينعكس اتجاه دورانه.

8. موصلان متوازيان يمر فيهما تياران متساويان وبالاتجاهات المبينة في الشكل، عند مقارنة المجال المغناطيسي المحصل عند النقطتين (P) و (Q) من حيث المقدار والاتجاه نجد أن:



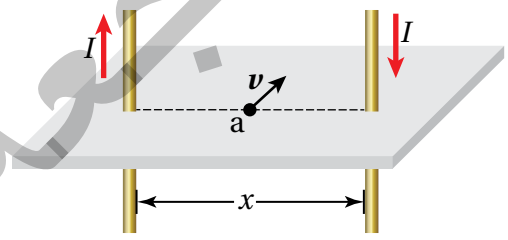
أ . $(B_P) = (B_Q)$، وبالاتجاه نفسه.

ب. $(B_P) = (B_Q)$ ، وباتجاهين متعاكسين.

جـ. $(B_P) \neq (B_Q)$، وبالاتجاه نفسه.

د . $(B_P) \neq (B_Q)$ ، وباتجاهين متعاكسين.

* سلكان طويلان يحملان تيارين متساويين أحدهما باتجاه $(+y)$ والآخر باتجاه $(-y)$. المسافة بين السلكين (x)، والنقطة (a) تقع في منتصف المسافة بينهما. معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل أجب عن الفقرتين الآتيتين:



9. المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة(a):

أ . $\frac{\mu_o I}{2\pi x}$

ب. $\frac{\mu_o I}{\pi x}$

جـ. $\frac{2\mu_o I}{\pi x}$

د . صفر

10. القوة المغناطيسية المحصلة المؤثرة في جسيم شحنته (q) لحظة مروره بالنقطة (a) بسرعة (v) باتجاه $(-z)$ تساوي:

أ. $\frac{\mu_o I q v}{2\pi x}$

ب. $\frac{\mu_o I q v}{\pi x}$

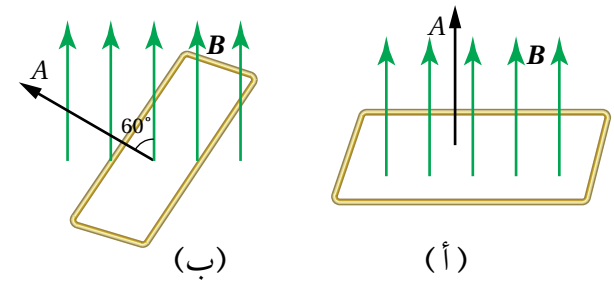
جـ. $\frac{2\mu_o I q v}{\pi x}$

د . صفر

11. ملف لولبي طوله (l) ويمر فيه تيار كهربائي (I)، ومقدار المجال المغناطيسي المتولد عند نقطة داخله يساوي (B)، إذا أصبح التيار المار فيه ($2I$) وطول الملف ($2l$) مع بقاء عدد لفاته ثابت فإن مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة نفسها:

أ . $0.25\,B$ ب. $0.5\,B$ جـ. B د. $2\,B$

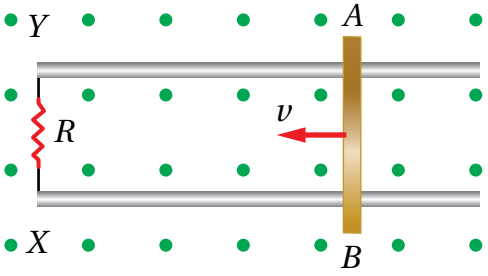
12. حلقة مستطيلة الشكل مغمورة في مجال مغناطيسي منتظم كما في الشكل (أ)، حيث التدفق عبرها (0.1 Wb). أُديرت الحلقة كما في الشكل (ب)، خلال (0.2 s). فإن المعدل الزمني للتغير في التدفق المغناطيسي عبر الحلقة بوحدة (Wb/s) يساوي:



أ . 0.25 ب. -0.25

جـ. 0.05 د. -0.05

* موصل مستقيم (AB) يتحرك على مجرى فلزي بسرعة ثابتة (v) باتجاه محور ($-x$) عموديًا على مجال مغناطيسي منتظم. معتمدًا على الشكل أجب عن الفقرتين الآتيتين:



13. شحنة الطرف (A)، واتجاه التيار في المقاومة (R):

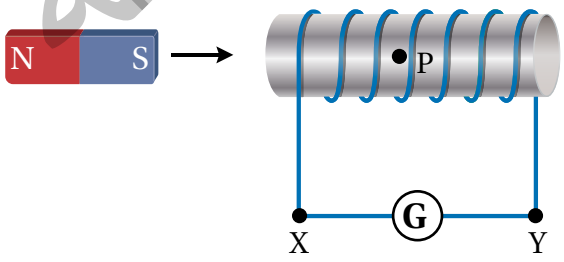
أ . موجبة، من (X) إلى (Y). ب. سالبة، من (X) إلى (Y).

جـ. موجبة، من (Y) إلى (X). د. سالبة، من (Y) إلى (X).

14. عندما يتحرك الموصل بسرعة (v) يمر في المقاومة (R) تيار حثي مقداره (I). عند مضاعفة مقدار سرعة الموصل، ونقصان المقاومة إلى النصف، فإن التيار المار في المقاومة يساوي:

أ . $0.5I$ ب. I جـ. $2I$ د. $4I$

15. في أثناء حركة المغناطيس المبين في الشكل المجاور نحو الملف، يتولد في الملف تيار كهربائي حثي ومجال مغناطيسي حثي. العبارة الصحيحة التي تصف اتجاه التيار المار في الغلفانوميتر، واتجاه المجال الحثي عند النقطة (P) التي تقع داخل الملف هي:



	التيار الحثي	المجال الحثي عند (P)
أ	من (X) إلى (Y)	يمين
ب	من (X) إلى (Y)	يسار
جـ	من (Y) إلى (X)	يمين
د	من (Y) إلى (X)	يسار

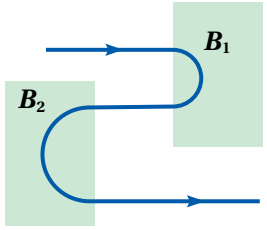
قيد الإعداد والمراجعة

16. محث محاثته (L) ومقاومة (R) ، يتصلان على التوالي مع بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (ε). عند غلق الدارة ينمو التيار الكهربائي مع الزمن حتى يصل إلى قيمته العظمى (I_{max}). القيمة العظمى للتيار تعتمد على:

أ . محاثة المحث (L) فقط.
ب. المقاومة (R) فقط.
جـ. محاثة المحث (L) والقوة الدافعة الكهربائية (ε).
د. المقاومة (R) والقوة الدافعة الكهربائية (ε).

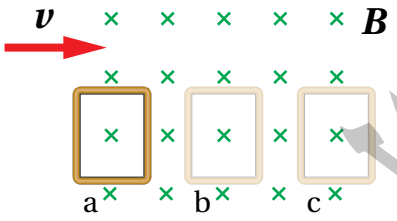
2. **أستنتج:** كيف يمكن استخدام جسيم مشحون لتمييز منطقةٍ مُحدّدة؛ إن كانت منطقةَ مجالٍ مغناطيسيٍّ أم مجالٍ كهربائيّ؟ أوضّح إجابتي بمثال.

3. **أستنتج:** يبين الشكل المجاور مسار إلكترون في أثناء مروره عبر منطقتين تحتويان على مجالين مغناطيسيين منتظمين ($\boldsymbol{B}_1$) و ($\boldsymbol{B}_2$)، حيث يسلك الإلكترون في كلا المنطقتين مسارا على شكل نصف دائرة.



أ . أحدد اتجاه كل مجال.
ب. أي المجالين أكبر مقدارًا؟ أفسر إجابتي.
جـ. أقارن بين الزمن الذي يستغرقه الإلكترون لعبور منطقة المجال ($\boldsymbol{B}_1$) والزمن اللازم لعبوره منطقة المجال ($\boldsymbol{B}_2$). موضحًا إجابتي.

4. **أستنتج:** حلقة فلزّية مستطيلة الشكل تقع في المستوى xy، وتتحرك باتجاه محور $+x$ بسرعة متجهة ثابتة، فتدخل منطقة مجال مغناطيسي منتظم باتجاه محور $-z$، كما في الشكل المجاور. وتُمثّل الرموز a و b وc مرحلة دخول الحلقة منطقة المجال المغناطيسي، ومرحلة حركتها داخله، ومرحلة خروجها من منطقة المجال المغناطيسي، على الترتيب.



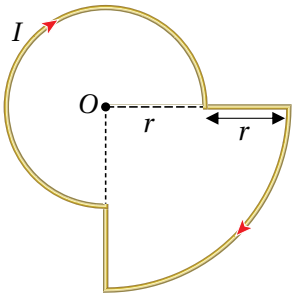
أجيب عمّا يأتي:

أ . أيّ المراحل الثلاث يتولّد فيها قوة دافعة كهربائية وتيار كهربائي حثّي في الحلقة؟ أُفسّر إجابتي.
ب. أُحدّد اتجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد في كل مرحلة إن وُجِد، مفسِّرًا إجابتي.

5. **أُفسّر:** حلقة موصلة وضعت بالقرب من سلك موصل مستقيم يسري فيه تيار كهربائي (I) لجهة اليسار كما في الشكل المجاور. أُحدّد لكل حالة من الحالات الآتية، هل يمر تيار كهربائي حثّي في الحلقة أم لا ؟ وأحدّد اتجاهه.

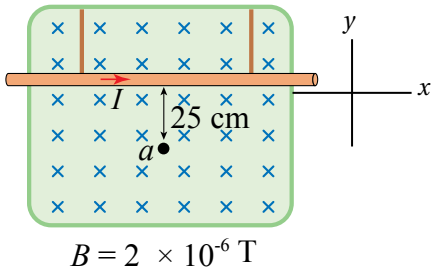
أ. عندما تتحرك الحلقة رأسيًّا إلى الأسفل باتجاه السلك.
ب. في أثناء إنقاص التيار الكهربائي المارّ في السلك مع بقاء الحلقة ثابتة.
جـ. عندما تتحرك الحلقة أُفقيًّا بموازاة طول السلك لجهة اليسار .

قيد إعداد المراجعة



6. **أستخدم الأرقام:** بالاعتماد على البيانات المثبتة على الشكل المجاور، وإذا علمت أن ($r = 3$ cm) وأن المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (O) يساوي ($3.5\ \pi \times 10^{-5}$ T). أحسب مقدار التيار المار في السلك.

7. **أستخدم الأرقام:** أيونٌ موجبٌ شحنتهُ ($+e$) يكمل 5 دوراتٍ في مجال مغناطيسيٍّ مُنتظمٍ (5.0×10^{-2} T) خلال مُدّةٍ زمنيّةٍ (1.5 ms). أحسبُ كتلة الأيون بوحدة (kg).

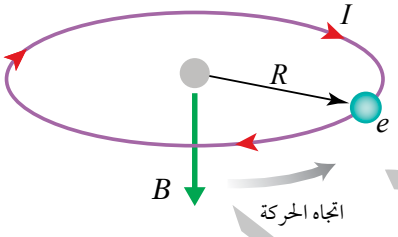


8. **أستخدم الأرقام:** موصلٌ مستقيمٌ لانهائي الطول يحملُ تيّارًا كهربائيًّا (4 A)؛ معلّقٌ أفقيًا داخل مجالٍ مغناطيسيّ كما في الشكل. اعتمادًا على بيانات الشكل؛ أحسب ما يأتي:

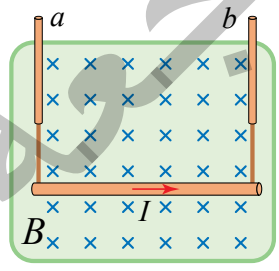
أ . المجالُ المغناطيسيُّ المُحصّل عند النقطة (a).

ب. مقدارُ القوّةُ المغناطيسيّةُ المؤثّرة في وحدة الأطوال من الموصل المستقيم.

جـ. القوّةُ المغناطيسيّةُ المُحصّلةُ المؤثّرة في جُسيمٍ شحنتهُ موجبةٌ مقدارُها (2×10^{-6} C) لحظةَ مروره بالنقطة (a) بسرعة (6×10^{4} m/s) باتّجاه محور ($-y$).



9. **أستخدم الأرقام:** أفترضُ أنّ إلكترونَ ذرّة الهيدروجين يدور حول النواة (البروتون) في مسار دائريٍّ نصفُ قطره (5.3×10^{-11} m) تحت تأثير القوّة الكهربائيّة بينهما. تُشكّل حركةُ الإلكترون تيّارًا كهربائيًّا (اصطلاحيًّا) في حلقةٍ دائريّةٍ بعكس اتّجاه حركته، كما في الشكل. أحسبُ مقدار المجال المغناطيسيّ (B) الناتج عن هذه الحركة؛ علمًا بأنّ الزمن الدوري لحركة الإلكترون (1.46×10^{-16} s).



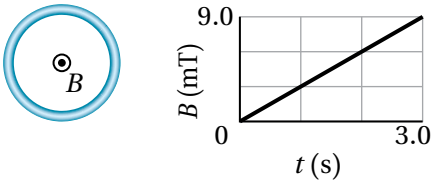
10. **أستخدم الأرقام:** موصلٌ مستقيمُ الشكل طولهُ (0.45 m) وكتلتهُ (60 g)، في وضعٍ أُفقيٍّ مُعلّقٍ بواسطة سلكين رأسيين (a,b) ينقُلان له تيّارًا كهربائيًّا مقداره (5 A). حيث ($g = 9.8$ m/s^2).

أ . أحسبُ أقل مقدار للمجال المغناطيسيّ الذي يتعامد مع الموصل بحيث يجعل الشدّ في السلكين صفرًا.

ب. أحسبُ مجموع الشدّ الكُليّ في السلكين المذكورين عندما ينعكس اتّجاه التيّار الكهربائيّ في الموصل.

11. **أستخدم الأرقام:** حلقة دائرية موصلة نصف قطرها (0.10 m)، موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (0.15 T)، على أن يكون مستواها عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي. سحبت الحلقة من طرفين متقابلين فيها، فتغيّر شكلها، وأصبحت مساحتها ($3.0 \times 10^{-2}\ m^2$) خلال (0.20 s). أحسب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتوسطة المتولّدة في الحلقة خلال هذه المدّة الزمنية.

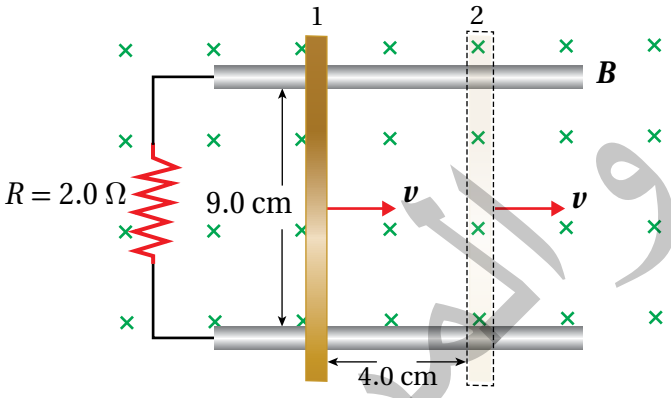
12. **أستنتج:** يبين الشكل حلقة فلزية مساحة مقطعها العرضي ($8.0 \times 10^{-4}\ m^2$) موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم باتجاه محور ($+z$)، يتغير مقداره بانتظام، والرسم البياني يبين تغير المجال مع الزمن. فيتولد في الحلقة تيار حثي مقداره ($2.0 \times 10^{-3}\ A$).



أ . أحدد اتجاه التيار الحثي المار في الحلقة.

ب. أحسب مقاومة الحلقة .

13. **أستخدم الأرقام:** موصل مستقيم طوله (9.0 cm) مغمور داخل مجال مغناطيسي منتظم مقداره (0.20 T). سُحب الموصل بسرعة ثابتة مسافة (4.0 cm) خلال مدة زمنية (0.10 s) من الموضع (1) إلى الموضع (2). أحسب مقدار التيار المار في المقاومة ($R = 2.0\ \Omega$)، وأحدد اتجاهه.



قيد الإعداد والمراجعة

الوحدة 6

التيّار المتردّد والدارات الإلكترونية

Alternating Current and Electronic Circuits

أتأمّلُ الصورةَ

تزوِّدنا محطات الطاقة الكهربائية بالتيار الكهربائي المتردّد، الذي يكون مُتغيِّرًا في المقدار والاتجاه، وهو يختلف بذلك عن التيار الكهربائي المستمرّ، الذي يكون ثابت المقدار والاتجاه. كلا النوعين له استخداماته الخاصة، فالمتردّد يُستخدَم في تشغيل أجهزة كهربائية مثل الغسالة والثلاجة، والمستمرّ يُستخدَم في تشغيل أجهزة إلكترونية تتكون من دارات إلكترونية مثل الحاسوب.

كيف تختلف الدارات الإلكترونية عن غيرها من الدارات الكهربائية الأخرى؟

الفكرةَ العامةُ:

ظَهَرت محطات توليد الطاقة الكهربائية نهاية القرن التاسع عشر، وكان بعضها يولّد تيارًا مستمرًّا، وبعضها الآخر يولِّد تيارًا متردّدًا، أمّا الآنَ، فيمكن القول إنّ المحطات جميعها تولّد تيارًا متردّدًا، وبوجود أجهزة كثيرة تحتوي دارات إلكترونية تعمل بالتيار المستمرّ، اقتضت الحاجة إلى أجهزة تحوِّل أيّ من التيارين إلى الآخر.

الدرسُ الأولُ: دارات التيار الكهربائيّ المتردّد

Alternating Electric Current Circuits

الفكرةُ الرئيسةُ: تعمل بعض الأجهزة الكهربائية المنزلية بالتيار المتردّد، ويمكن استخدام عناصر الدارات الكهربائية للتيار المستمرّ، مثل المقاومة والمحثّ والمواسع في دارات التيار المتردّد، التي تخضع لمبدأَي حِفْظ الشِّحْنة والطاقة؛ إلا أنَّ مصدر الطاقة فيها يكون مصدر فَرْق جهد متردّد.

الدرس الثاني: الدارات الإلكترونية

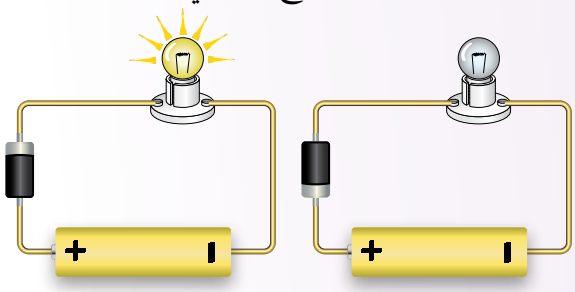
Electronic Circuits

الفكرة الرئيسة: تحتوي الأجهزة الإلكترونية التي نستخدمها، مثل الهاتف الخلوي وجهاز التحكُّم عن بُعْد دارات إلكترونية، من مُكوِّناتها الثنائي والترانزستور، التي جاءت مخرجات لعلم أشباه الموصلات.

اختبار الثنائي البلوري وقياس مقاومته

الموادّ والأدوات: ثنائي بلوري، مقياس متعدد رَقْمي، بطارية (1.5 V)، أسلاك توصيل مصباح كهربائي صغير (1.5 V).

إرشادات السلامة: توخّي الحذر عند التعامل مع الأطراف الحادّة للأدوات والموادّ وعند استخدام أدوات القَطْع.



خُطُوات العمل:

أُنفِّذ الخُطُوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

1. أُحدِّد طرفَي المصعد والمهبط للثنائي البلوري بوصله بالبطارية (1.5 V) والمصباح الكهربائي كما في الشكل، ثم أُحدِّد اتجاه التوصيل الذي يُضاء فيه المصباح، (يضيء المصباح عندما يكون المصعد متصلًا بالقطب الموجب للبطارية).

2. أختار على المقياس المتعدّد الرَّقْمي وَضْع قياس المقاومة عن طريق تدوير المفتاح لكي يشير إلى رمز الأوم (Ω)، ثم أختار مجال قياس المقاومة المنخفضة (2 kΩ) تقريبًا.
3. أصل الطرف الموجب للمقياس (المجس الأحمر) بمصعد الثنائي البلوري، والطرف السالب (المجس الأسود) بمهبط الثنائي البلوري، وألاحظ قراءة الشاشة الرَّقْمية للمقياس، ثم أُدوِّنها.
4. أختار مجال قياس المقاومات الكبيرة (200 kΩ) أو (2 MΩ) مع بقاء مفتاح المقياس المتعدّد باتجاه رمز (Ω).
5. أعيد توصيل الطرف الموجب للمقياس المتعدّد بمهبط الثنائي البلوري، والطرف السالب بمصعد الثنائي البلوري، وألاحظ قراءة الشاشة الرَّقْمية للمقياس، ثم أُدوِّنها.

التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتج:** أُحدِّد أيَّ طرفَي الثنائي البلوري يمثّل المهبط وأيهما يمثّل المصعد عن طريق ملاحظة إضاءة المصباح في الخطوة (1).
2. **أستنتج:** أُحدِّد وضعية الانحيازين الأمامي والعكسي للثنائي البلوري عند تنفيذ الخطوتين (3) و(5).
3. **أقارن** بين قيمتَي مقاومة الثنائي البلوري في وضعيتَي الانحياز السابقتين، ثم أُحدِّد أيهما أكبر، مبينًا أهمية ذلك.

قيد الإعداد والمراجعة

الدرس 1

الفكرة الرئيسة:

تعمل بعض الأجهزة الكهربائية المنزلية بالتيار المتردّد، ويمكن استخدام عناصر الدارات الكهربائية للتيار المستمرّ، مثل المقاومة والمحثّ والمواسع في دارات التيار المتردّد، التي تخضع لمبدأَي حِفْظ الشحنة والطاقة؛ إلا أنَّ مصدر الطاقة فيها يكون مصدر فَرْق جهد متردّد.

نتاجات التعلّم:

- أقارن بين التيارين المتردّد والمستمر من حيث الخصائص ومصادر كلٍّ منهما.
- أحدّد العوامل التي تؤثر في توليد القوة الدافعة الكهربائية الحثّية بين طرفي المولّد.
- أحل مسائل حسابية على دارات التيار المتردد التي تشتمل على: مقاومة فقط، محثّ مثاليّ فقط، مواسع فقط، مقاومة ومحثّ ومواسع تتصل على التوالي.
- أتعرّف تركيب دارة الرنين، ثم أحدّد العوامل التي يعتمد عليها تردّد الرنين لدارة توالي.

المفاهيم والمصطلحات:

فَرْق الجهد المتردّد Alternating Voltage

التيار المتردّد Alternating Current

المعاوقة المحثّية Inductive Reactance

المعاوقة المواسعيّة Capacitive Reactance

التردد الطبيعي Natural Frequency

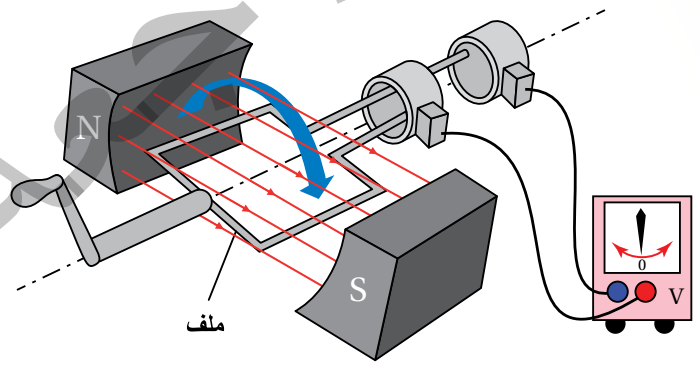
التيار الكهربائيّ المتردّد
Alternating Electric Current

تزود شركة الكهرباء المستهلكين بتيار كهربائي متردد نحصل عليه من المقابس الجدارية لتشغيل أغلب الأجهزة التي نستخدمها مثل: الثلاجة، و المكيف، و المدفأة الكهربائية. في حين أن أجهزة أخرى مثل الحاسوب تكون مزودة بدارات إلكترونية لتحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر.

نحصل على التيار المتردد Alternating current (AC) من المولّد الكهربائيّ الذي يتكوّن في أبسط أشكاله من مِلفّ أحاديّ مصنوع من سلك فلزّي معزول، يدور داخل مجال مغناطيسي، كما يبين الشكل (1).

عندما يدور المِلفّ، تتغير الزاوية المحصورة بين متّجه مساحته واتّجاه المجال المغناطيسي، وهذا ما يؤدّي إلى تغيّر في التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترق الملف، فتتولد قوة دافعة كهربائية حثية في الملف؛ وفقا لقانون فارادي في الحث الكهرمغناطيسي.

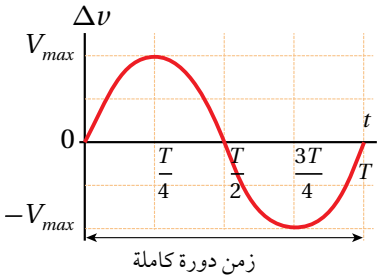
عند دوران المِلفّ يتذبذب مؤشّر الفولتميتر يمينًا ويسارًا على جانبي الصفر، أي أنّ القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتولّدة في المِلفّ تغيّر مقدارها واتجاهها باستمرار، فينشأ عنها تيار كهربائي متغير مقدارًا واتجاهًا.



الشكل (1): مولّد كهربائيّ يتصل طرفا مِلفّه بفولتميتر.

فرق الجهد المتردّد Alternating Voltage

عند توصيل المولد الكهربائي بجهاز راسم الموجات Oscilloscope، وتدوير ملفه بتردد زاوي ثابت، يظهر على شاشة الجهاز رسم بياني، كما في الشكل (2)؛ يُوضّح التغير في فرق الجهد بين طرفي الملف مع الزمن؛ في أثناء دوران الملف دورة كاملة.



الشكل (2): تغيّر فرق الجهد المتردّد بين طرفي المِلفّ مع الزمن وَفْقًا لاقتران جيبيّ.

أستنتج من الشكل، أن فرق الجهد اللحظي (Δv) يتغير بالنسبة إلى الزمن (t) وفقا لعلاقة جيبية؛ فيكون فرق الجهد موجبًا في النصف الأول من الدورة، وسالبًا في النصف الثاني، ويصل إلى قيمة عظمى (V_{max}) عند اللحظة ($\frac{T}{4}$)، وقيمة عظمى بالاتجاه المعاكس عند اللحظة ($\frac{3T}{4}$). حيث (T): الزمن الدوري للملف.

يسمى فرق الجهد في هذه الحالة **فرق الجهد المتردد**، ويعرف بأنه فرق جهد متغير بالنسبة إلى الزمن وفقا لعلاقة جيبية، ويعبر عنه بالعلاقة الآتية:

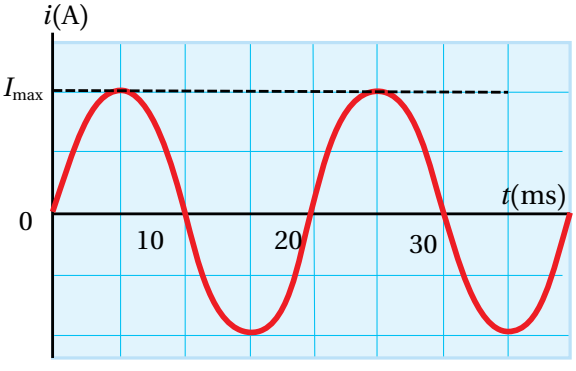
$$\Delta v = V_{max} \sin \omega t$$

حيث، (ω) التردد الزاوي؛ فعند دوران الملف بتردد (f) وزمن دوري (T)، فإن:

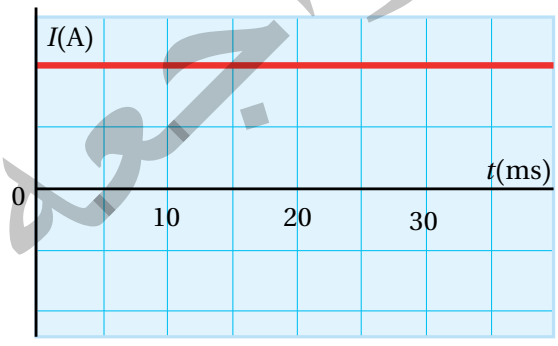
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

يعد المولد الكهربائي مصدرًا لفرق الجهد المتردد؛ يزودنا **بتيار متردّد Alternating current (AC)** ويعرّف بأنه تيار يسري في دارة كهربائيّة مغلقة يتغيّر مقداره واتجاهه بالنسبة إلى الزمن وفقًا لعلاقة جيبيّة. في حين تزوّدنا البطاريات بمختلف أنواعها بتيار كهربائي مستمرّ Direct current (DC). ويبيّن الرسم البياني في الشكل (3/ أ) أنّ مقدار التيار المتردّد (i) يتغيّر باستمرار مع الزمن، ويتغير أيضًا اتجاه سريانه كلّ نصف دورة؛ بسبب تغيّر مقدار واتجاه فَرْق الجهد الكهربائي المُسبِّب له بين طرفَي المِلفّ. في حين يبيّن الشكل (3/ ب) أنّ التيار المستمرّ ثابت في المقدار وفي الاتجاه.

✓ **أتحقّق:** أقارن بين التيارين المستمر والمتردّد من حيث المقدار والاتّجاه.



(أ) : العلاقة بين التيار المتردّد والزمن.



(ب): العلاقة بين التيار المستمر والزمن.

الشكل (3): مقارنة بين التيارين المتردّد والمستمر من حيث المقدار والاتّجاه.

وزارة التربية والتعليم العالي

المثال 1

يُزوّدنا مولّد كهربائي بفرق جهد متردّد، قيمته العظمى (310 V)، وتردّده (50 Hz). أكتب معادلة فَرْق الجهد المتردّد، ثمّ أجد فرق الجهد عند كل من اللحظات الآتية: $t_1 = \frac{1}{600}\ \text{s}\ ,\ t_2 = \frac{9}{600}\ \text{s}\ ,\ t_3 = \frac{12}{600}\ \text{s}$

المُعطيات:

$$t_1 = \frac{1}{600}\ \text{s},\ t_2 = \frac{9}{600}\ \text{s},\ t_3 = \frac{12}{600}\ \text{s},\ V_{max} = 310\ \text{V},\ f = 50\ \text{Hz}$$

المطلوب: $\Delta v = ?$

الحل:

أحسب (ω) باستخدام العلاقة :

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50 = 100\pi\ \text{rad/s}$$

ثمّ أكتب معادلة فَرْق الجهد :

$$\Delta v = V_{max} \sin \omega t = 310 \sin 100\pi t$$

أجد فَرْق الجهد عند اللحظة ($t_1 = \frac{1}{600}\ \text{s}$).

$$\Delta v = 310 \sin (100\pi \times \frac{1}{600}) = 155\ \text{V}$$

أجد فرق الجهد عن اللحظة ($t_2 = \frac{9}{600}\ \text{s}$)

$$\Delta V = 310 \sin (100\ \pi \times \frac{9}{600}) = -310\ \text{V}$$

أجد فرق الجهد عن اللحظة ($t_3 = \frac{12}{600}\ \text{s}$)

$$\Delta V = 310 \sin (100\ \pi \times \frac{12}{600}) = 0\ \text{V}$$

أفكّر: عند إضاءة مصباح كهربائي بتيار متردّد كما في الشكل (3/ أ) زمنه الدوري (20 ms)، فهل سنلاحظ التغير في شدة سطوع إضاءة المصباح الناتجة من تغير مقدار التيار الذي يسري فيه؟ أفسّر إجابتي.

الربط بالحياة

في محطات توليد الطاقة الكهربائيّة تدور المولّدات بسرعات كبيرة جدًّا، وتستمدّ دورانها من توربينات ضخمة تعمل بالبخار، فتنتج قوة دافعة كهربائيّة حثّية تصل قيمتها إلى آلاف الفولتات، ثمّ تُوزَّع من خلال شبكات وطنيّة.

في الأردن، تزود شركات الكهرباء المنازل بفرق جهد متردد تردده (50 Hz)، وقيمته العظمى (325 V).

قيد الاعداد والمراجعة

دارات التيار الكهربائيّ المتردّد البسيطة Simple AC Circuits

مقاومة في دارة تيار كهربائيّ متردّد Resistor in an AC Circuit

تتكوّن دارة التيار المتردّد في أبسط أشكالها من مصدر فَرْق جهد متردّد ومقاومة (R) كما في الشكل(4)، وبتطبيق قاعدة كيرشوف الثانية، فإنّ المجموع الجبريّ للتغيرات في الجهد في الدارة المغلقة عند أيّ لحظة زمنيّة يساوي صفرًا، ومنه نتوصّل إلى أنّ فَرْق الجهد بين طرفي المقاومة (Δv_R) يساوي فَرْق الجهد للمصدر ويُعبَّر عنه بالعلاقة:

$$\Delta v_R = \Delta v = V_{max} \sin \omega t$$

حيث (Δv_R): فَرْق الجهد بين طرفي المقاومة عند لحظة ما.

ونظرًا إلى أنّ ($i = \frac{\Delta v}{R}$)؛ فإنّ التيار الكهربائي المارّ في المقاومة عند لحظة ما هو:

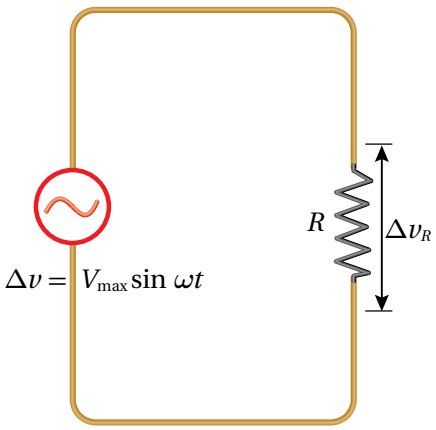
$$i_R = \frac{\Delta v_R}{R} = \frac{V_{max}}{R} \sin \omega t = I_{max} \sin \omega t$$

حيث (I_{max}): القيمة العظمى للتيار ($I_{max} = \frac{V_{max}}{R}$).

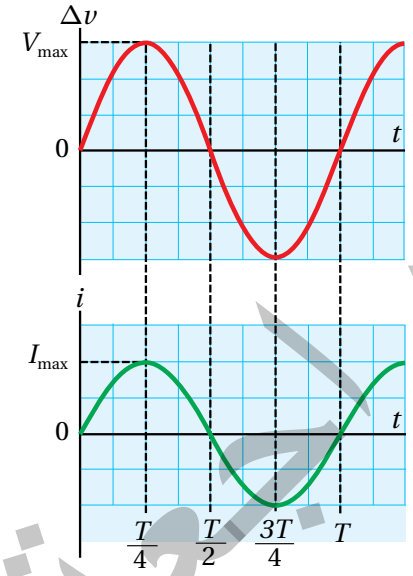
وبتعويض ($V_{max} = I_{max} R$)، فإنّه يمكن التعبير عن فَرْق الجهد بين طرفي المقاومة بالعلاقة الآتية:

$$\Delta v_R = I_{max} R \sin \omega t$$

يمكن تمثيل التغيّر في فَرْق الجهد بين طرفي المقاومة، والتغيّر في التيار المارّ فيها بالنسبة إلى الزمن كما في الشكل (5).



الشكل (4): دارة تيار متردّد تحتوي مقاومة فقط.



الشكل (5): تغيّر كلّ من فَرْق الجهد والتيار بالنسبة إلى الزمن في دارة تيار متردّد تحتوي مقاومة فقط.

القدرة المستهلكة في المقاومة Power Dissipated in the Resistor

تعلّمت حساب القدرة المستهلكة في مقاومة عند سريان تيار كهربائي مستمر (I) فيها باستخدام العلاقة ($P = I^2 R$). أما في حالة التيار المتردّد، فإنّ استخدام العلاقة نفسها تنتج منه قدرة متغيرة بسبب تغير التيّار، لذلك نلجأ إلى حساب القدرة المتوسطة ($\overline{P}$) المستهلَكة في المقاومة عند سريان تيار متردّد فيها، لكنّنا نحتاج إلى قيمة ثابتة للتيار تكافئ (I)؛ هذه القيمة يُرمز إليها بالرمز (I_{rms})، وتُقرأ root–mean–square وتعني الجذر التربيعي للقيمة المتوسطة لمربع التيار، وسنطلق عليه اسم القيمة الفعّالة، وتُحسب بالعلاقة الآتية:

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

أيْ أنّ القدرة المتوسطة المستهلَكة في مقاومة عند سريان تيار متردّد فيها،

وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي

هي القدرة المستهلكة نفسها الناتجة من سريان تيار ثابت في المقاومة نفسها قيمته $\left(\frac{I_{max}}{\sqrt{2}}\right)$ وبذلك فإنّ القدرة المتوسطة المستهلكة في المقاومة عند سريان تيار متردّد فيها تُحسب بالعلاقة الآتية:

$$\overline{P} = I_{rms}^2 R$$

وبالمثل، يمكن حساب قيمة ثابتة (فعّالة) لفرق الجهد المتردّد يُرمز إليها بـِ (V_{rms})، ويُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

إنّ استخدام القيمتين (I_{rms}) و (V_{rms}) يسهّل علينا دراسة دارات التيارات المتردّدة، فأجهزة الأميتر والفولتميتر المستخدمة في قياس التيار وفرق الجهد تقرأ قِيَم (I_{rms}) و (V_{rms})، في حين يُستخدم جهاز راسم الذبذبات في الحصول على منحنى (فَرْق الجهد المتردّد–الزمن).

المثال 2

جهاز كهربائيّ مقاومته $(65\ \Omega)$، وُصِل بمصدر فَرْق جهد متردّد، إذا علمت أنّ القيمة العظمى لفرق الجهد المتردّد بين طرفيه $(325\ V)$، وتردّده $(60\ Hz)$، أُحدّد ما يأتي:

أ . الزمن الدوريّ لفرق الجهد المتردّد.

ب. القيمة العظمى للتيار المتردّد الذي يسري في الجهاز.

جـ. الاقتران الذي يُعبِّر عن التيار المتردّد بدلالة الزمن (t).

المُعطيات: $V_{max} = 325\ V, f = 60\ Hz, R = 65\ \Omega$

المطلوب: $T=?, I_{max} = ?, i_R = ?$

الحل:

أ .

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 1.7 \times 10^{-2}\ s$$

ب.

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{R} = \frac{325}{65} = 5.0\ A$$

جـ.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 1.2 \times 10^2 \pi\ rad/s$$

$$i_R = I_{max} \sin \omega t = 5.0 \sin 120\ \pi t$$

الربط بالتكنولوجيا

المقياس المتعدد Multimeter أداة متعددة الوظائف، تُستخدَم على نطاق واسع في القياسات الكهربائية والإلكترونية، يمتاز بمدى قياس كبير لكل كمية يقيسها وبسهولة استخدامه، يقيس المقاومة والجهد والتيار بنوعيهما المتردّد والمستمرّ. عند استخدامه في القياس تُحدَّد الوظيفة، مثل قياس الجهد (DC)، ثم اختيار مدى القياس، كأن يكون (200 mV)، أو (2 V)، أو (20 V) وهكذا.

المثال 3

القيمة العظمى لمصدر فَرْق الجهد المتردّد في دارة كهربائيّة (88.0 V)، والقيمة العظمى للتيار المتردّد (4.40 A). أحسب القيمتين الفعّالتين (V_{rms} و I_{rms}) للجهد والتيار في الدارة، ثم أبيِّن المقدار المُتوقَّع لمقاومة الدارة.

المُعطيات: $I_{max} = 4.40\ A\ ,\ V_{max} = 88.0\ V$

المطلوب: $I_{rms} = ?,\ V_{rms} = ?,\ R = ?$

الحل:

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{88.0}{\sqrt{2}} = 62.2\ V$$

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{4.40}{\sqrt{2}} = 3.11\ V$$

$$R = \frac{V_{max}}{I_{max}} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = \frac{62.2}{3.11} = 20.0\ \Omega$$

✓ **أتحقّق:** ما القيمة الفعّالة لفرق الجهد التي نحصل عليها من المقابس الجدارية في الأردن، علمًا أنّ القيمة العظمى لفرق الجهد 325 V؟

المثال 4

مدفأة كهربائيّة مقاومتها (40.0 Ω) تعمل على فَرْق جهد متردّد بوحدة الفولت مُعبَّر عنه بالعلاقة: $\Delta v = 310 \sin \omega t$ حيث (t) بوَحْدة الثانية، أحسب ما يأتي:

أ . مقدار القيمة الفعّالة للتيار الذي يسري في المدفأة.

ب. القدرة الكهربائية المتوسطة المستهلكة في مقاومة المدفأة.

المُعطيات: $R = 40.0\ \Omega,\ \Delta v = 310 \sin \omega t$

المطلوب: $I_{rms} = ?,\ \overline{P} = ?$

الحل:

أ . مقارنةً بالمعادلة $\Delta v = V_{max} \sin \omega t$، أجد أنّ:

$$V_{max} = 310\ V$$

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{R} = \frac{310}{40.0} = 7.75\ A$$

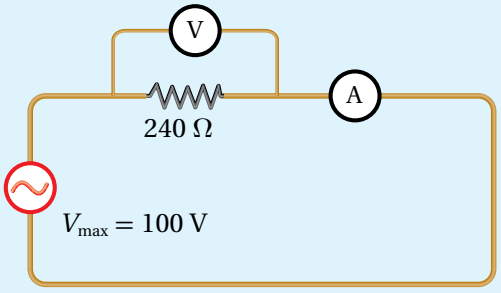
$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{7.75}{\sqrt{2}} = 5.48\ A$$

ب.

$$\overline{P} = I_{rms}^2 R = (5.48)^2 \times 40.0 = 1.20 \times 10^3\ W$$

قيد الإعداد والمراجعة

أستخدم الأرقام: يبيّن الشكل (6) دارة كهربائية تتكوّن من مقاومة مقدارها (240 Ω)، وُصِلت بمصدر فَرْق جهد متردّد، حيث القيمة العظمى لفرق الجهد بين طرفيه (100 V). استُخدِم أميتر وفولتميتر في قياس التيار وفَرْق الجهد بين طرفي المقاومة. أحسب قراءة كلّ من الأميتر والفولتميتر.



الشكل (6): مقاومة في دارة تيار كهربائي متردّد.

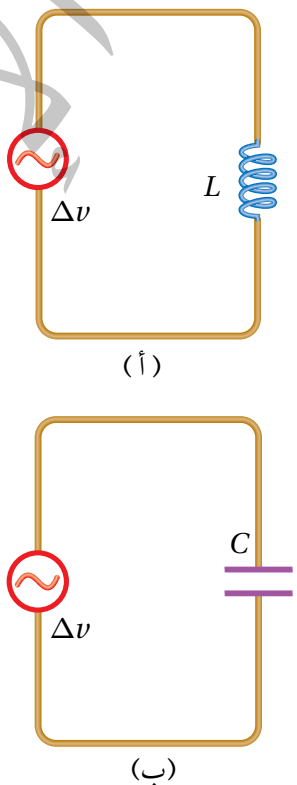
المعاوقة Reactance

يبيّن الشكل (7) شكلين آخرين لدارات التيار الكهربائي المتردّد؛ إذ يبين الشكل (7/ أ) دارة تيار متردّد تحتوي محثًّا مصنوعًا من سلك عديم المقاومة محاثّته (L)، والشكل (7/ ب) يبين دارة تيار متردّد تحتوي مواسعًا مواسعته (C).

يؤدي المحثّ والمواسع دَوْرًا يشبه دَوْر المقاومة من حيث الممانعة التي تبديها هذه العناصر لمرور التيار الكهربائي المتردّد. فالمقاومة Resistance هي خصيصة تعبّر عن الممانعة التي يبديها الموصِل لمرور التيار الكهربائي فيه، وبالمثل أعرف مفهومًا مشابهًا يُسمى **المعاوقة Reactance** يعبّر عن الممانعة التي تبديها عناصر الدارة (محثّ أو مواسع) لمرور التيار الكهربائي المتردّد فيها. ويُرمز إلى المعاوقة بالرمز (X) وتُقاس بوَحْدة قياس المقاومة نفسها وهي الأوم (Ω).

عند دراسة تغيّرات فَرْق الجهد والتيار في الدارتين الموضَّحتين في الشكل (7)، ومقارنتها بتغيرات فَرْق الجهد والتيار في الدارة المبيَّنة في الشكل (4)، نتوصل إلى أنّ:

- الكميّة (ωL) في دارة المحثّ تؤدي دَوْر المقاومة (R) في دارة المقاومة، وتُسمّى **المعاوقة المحثيّة (X_L) Inductive reactance.**
- الكميّة ($\frac{1}{\omega C}$) في دارة المواسع تؤدي دور المقاومة (R) في دارة المقاومة، وتُسمّى **المعاوقة المواسعيّة (X_C) Capacitive reactance.**
- في دارة المقاومة نعبّر عن القيمة العظمى للتيار بالعلاقة $\left(I_{max} = \frac{V_{max}}{R}\right)$، والقيمة الفعّالة للتيار بالعلاقة $\left(I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}\right)$، وبالمثل يمكن التعبير عنها بعلاقات مشابهة في حالة المحثّ والمواسع بدلالة المعاوقة بدلًا من المقاومة كما في الجدول (1).



الشكل (7): دارات التيار المتردّد
(أ) دارة محثّ ومصدر فرق جهد متردّد.
(ب)دارة مواسع ومصدر فرق جهد متردّد.

فريد الأعداد والمراجعة

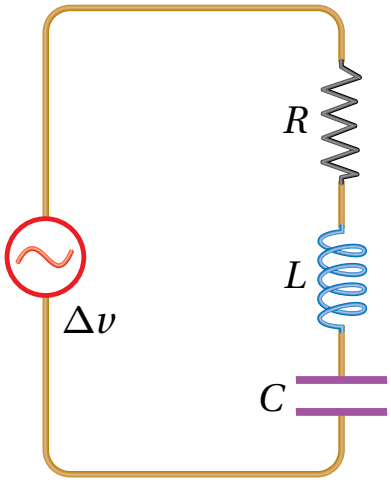
الجدول (1): عناصر دارات التيار المتردّد.

عناصر الدارة	المقاومة/ المعاوقة	I_{max}	I_{rms}
مقاومة	R	$I_{max}=\frac{V_{max}}{R}$	$I_{rms}=\frac{V_{rms}}{R}$
محثّ	$X_L=\omega L$	$I_{max}=\frac{V_{max}}{X_L}$	$I_{rms}=\frac{V_{rms}}{X_L}$
مواسع	$X_C=\frac{1}{\omega C}$	$I_{max}=\frac{V_{max}}{X_C}$	$I_{rms}=\frac{V_{rms}}{X_C}$

أفكّر: ما مقدار معاوقة كلٍّ من المحثّ والمواسع عندما يكون التردُّد الزاوي لمصدر فَرْق الجهد صغيرًا جدًّا، وعندما يكون تردّده كبيرًا جدًّا؟

يتضّح من الجدول (1) أعلاه أنّ المعاوقة تتغيّر بتغيُّر التردّد الزاويّ لمصدر فَرْق الجهد، أيْ أنّ الممانعة التي يبديها المحثّ أو المواسع لمرور التيار الكهربائي المتردّد تعتمد على تردّد المصدر، حيث تزداد معاوقة محثّ محاثّته (L) بزيادة (ω)، وتقلّ معاوقة مواسع مواسعته (C) بزيادة (ω).

✓ **أتحقّق:** ما العوامل التي تعتمد عليها المعاوقة المحثّية للمحثّ؟



الشكل (8): دارة تيار متردّد تحتوي مواسعًا ومقاومة ومحثًّا موصولة على التوالي.

دارة مقاومة ومحثّ ومواسع (*RLC*) على التوالي

The *RLC* Series Circuit

هذه الدارة تحتوي العناصر الثلاثة: مقاومة (R) ومحثّ (L) ومواسع (C) موصولة جميعها على التوالي بمصدر فَرْق جهد متردّد كما في الشكل (8).

ويُرمز إلى المعاوقة الكليّة للدارة بالرمز (Z)، ويُعبَّر عنها بدلالة معاوقات مكوّناتها الثلاثة بالعلاقة الآتية:

$$Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$$

وبصورة مماثلة لدارات التيار المستمر، يمكننا استخدام القيمة الفعّالة للتيار المتردّد:

$$I_{rms}=\frac{V_{rms}}{Z}$$

وبتعويض المعاوقة الكلية (Z) نتوصّل إلى أنّ:

$$I_{rms}=\frac{V_{rms}}{\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}}$$

تبيّن هذه العلاقة أنّه يمكن الحصول على تيار فعّال له أكبر قيمة ممكنة في الدارة، عندما تكون قيمة المقام أصغر ما يمكن. ويتحقّق ذلك عندما يكون:

$$X_L-X_C=0\rightarrow X_L=X_C$$

قيد الإعداد والمراجعة

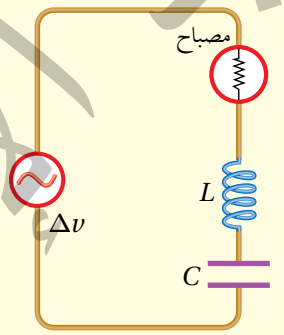
بتعويض معاوقة المحث ومعاوقة المواسع نتوصّل إلى أنّ:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \rightarrow (\omega_0)^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

يشير الرمز (ω_0) إلى قيمة التردد الذي تتساوى عنده قيمة معاوقة المحث ومعاوقة المواسع ويسمى **التردُّد الطبيعي** لدارة **Natural frequency (*RLC*)**، وتعتمد قيمته على كل من مواسعة المواسع ومحاثّة المحثّ، وعندما يتساوى تردُّد مصدر فَرْق الجهد في الدارة مع التردد الطبيعي لها ($\omega = \omega_0$) تكون الدارة في حالة تسمى بالرنين، وتكون قيمة التيار الفعّال عندئذٍ أكبر ما يمكن.

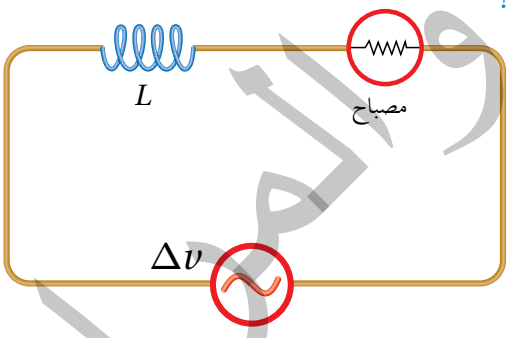
أفكّر: ما الشرط اللازم توافره كي يضيء المصباح بأكبر شدّة ممكنة في الدارة المُبيَّنة في الشكل؟



✓ **أتحقّق:** ماذا تمثّل حالة الرنين في دارة مقاومة ومحثّ ومواسع؟

المثال 5

يبيّن الشكل (9) دارة يتصل فيها محثّ ومصباح بمصدر فَرْق جهد متردّد. ماذا يحدث لإضاءة المصباح عند نقصان تردّد المصدر مع بقاء القيمة العظمى لفرق الجهد ثابتة؟



الشكل (9): مصباح ومحث في دارة تيار متردّد.

المُعطيات: (V_{max}) ثابتة، (ω) قلّت.

المطلوب: كيف تتغيّر إضاءة المصباح؟

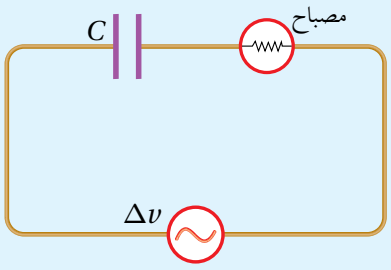
الحل:

وفقًا للعلاقة ($X_L = \omega L$)، فإنّ نقصان تردّد المصدر يؤدّي إلى نقصان معاوقة المحثّ؛ فتقلّ الممانعة التي يبديها المحثّ لمرور التيار. وهذا يعني زيادة مقدار التيار المارّ في الدارة، ومن ثَمَّ، زيادة القدرة المستهلكة في المصباح فتزداد الإضاءة.

قيد المراجعة

تفكير

أستنتج: يبيّن الشكل (10) دارة يتصل فيها مواسع ومصباح بمصدر فَرْق جهد متردّد. ماذا يحدث لإضاءة المصباح عند نقصان تردّد المصدر مع بقاء القيمة العظمى لفرق الجهد ثابتة؟ أفسّر إجابتي.



الشكل (10): مواسع ومصباح في دارة تيار متردّد.

المثال 6

دارة (AC) تحتوي مصدر فرق جهد متردّد قيمته الفعّالة (150 V) وتردّده (60.0 Hz)، يتّصل على التوالي بمقاومة (420 Ω) ومحثّ محاثّته (1.80 H)، ومواسع مواسعته (7.00 μF). أجد كلًّا ممّا يأتي:

أ . المعاوقة المحثّية، والمعاوقة المواسعيّة، والمعاوقة الكليّة للدارة.

ب. القيمة الفعّالة للتيار المتردّد.

المُعطيات:

$C = 7.00 \times 10^{-6}\ \text{F},\ V_{\text{rms}} = 150\ \text{V},\ f = 60.0\ \text{Hz},\ R = 420\ \Omega,\ L = 1.80\ \text{H}$

المطلوب:

$I_{\text{rms}} = ?,\ X_C = ?,\ X_L = ?,\ Z = ?$

الحل:

أ .

$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60.0 = 377\ \text{rad/s}$

$X_L = \omega L = 377 \times 1.80 = 679\ \Omega$

$X_C = \dfrac{1}{\omega C} = \dfrac{1}{377 \times 7.00 \times 10^{-6}} = 379\ \Omega$

$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

$Z = \sqrt{(420)^2 + (679 - 379)^2}$

$Z = \sqrt{176400 + 90000} = 516\ \Omega$

ب . القيمة الفعّالة للتيار المتردّد:

$I_{\text{rms}} = \dfrac{V_{\text{rms}}}{Z} = \dfrac{150}{516} = 0.290\ \text{A}$

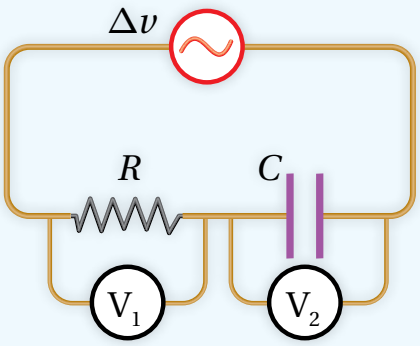
قيد الإعداد والمراجعة

يمكن التوصل بطريقة عملية إلى العلاقة بين تردد مصدر فرق الجهد في دارة التيار المتردد والمعاوقة المواسعية بإجراء التجربة الآتية:.

التجربة 1

حساب مواسعة مواسع باستخدام دارة (*RC*)

المواد والأدوات: مقاومة (1000 Ω)، مواسع (0.1 mF)، مصدر طاقة متردّد (AC) منخفض الجهد وقابل للضبط، فولتميتر عدد 2، أسلاك توصيل.



إرشادات السلامة: توخّي الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائيّة والوصلات الكهربائيّة.

خطوات العمل:

أنفّذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

1 . أصل الدارة كما في الشكل المجاور، على أن تتصل المقاومة والمواسع ومصدر الطاقة جميعها على التوالي، ثم أصِل فولتميتر بطرفي المقاومة وآخر بطرفي المواسع.

2 . أضبط مصدر الطاقة المتردّد على قيمة منخفضة، ولتكنْ بين (1.0 V–5.0 V).

3 . **أجرب:** أضبط مصدر الطاقة على تردّد (400 Hz)، ثمّ أقيس فَرْق الجهد بين طرفي المقاومة بالفولتميتر (V_1)، وفَرْق الجهد بين طرفي المواسع بالفولتميتر (V_2)، ثم أدوّن القراءات في الجدول.

4 . أرفع تردّد مصدر الطاقة إلى القِيَم (600, 800, 1000, 1200, 1400 Hz)، وفي كل مرّة أكرّر الخطوة السابقة، ثم أدوّن النتائج في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1 . **أستخدم الأرقام:** أحسب القيمة الفعّالة للتيار (I_{rms}) الذي يسري في الدارة عند كل محاولة بقسمة فَرْق الجهد بين طرفي المقاومة (V_{rms}) على مقدار المقاومة (R)، ثم أدوّن النتائج في جدول البيانات.

2 . **أستخدم الأرقام:** أحسب المعاوقة المواسعية للمواسع (X_C) عند كل محاولة بقسمة فَرْق الجهد (V_{rms}) بين طرفيه على القيمة الفعالة للتيار، ثم أدوّن النتائج في جدول البيانات.

3 . **أُمثل بيانيًّا** العلاقة بين مقلوب التردّد الزاويّ على محور (x) والمعاوقة المواسعيّة على محور (y).

4 . **أستنتج:** أجد ميل المنحنى، وأستخرج مواسعة المواسع من الميل، ثمّ أقارن النتيجة بالقيمة المكتوبة على المواسع.

قيد الإعداد والمراجعة

تطبيقات تكنولوجيّة

جهاز كَشْف الفلزّات

تُستخدم في المطارات بوابات للكشف عن الفلزّات، عندما يمرّ المسافر خلالها فإنّها تُصدر إشارة تُبيِّن إنْ كان المسافر يخفي أداة فلزّيّة أم لا. ويحتوي إطار الباب المبيَّن في الشكل (11) مِلفًّا من سلكٍ موصل يمثّل محثًّا في دارة (*RLC*)، وتكون الدارة متّصلة بمصدر فَرْق جهدٍ متردّد ضُبط تردُّده لإحداث حالة الرنين. إن اقتراب جسم فلزي من البوابة يغير من قيمة محاثة الملف، ما يؤدي الى انعدام حالة الرنين، وعليه يتغير التيار الكهربائي المار في الدارة، ونتيجة لذلك تصدر دارات الكترونية إشارات تحذيرية صوتية واخرى مرئية.

الشكل (11): بوابة أمنية لكشف الفلزات في الجسم.

أجهزة المذياع والاتصال اللاسلكي

دارات الاستقبال في أجهزة المذياع وأجهزة الاتصال اللاسلكي، تُعدّ مثالًا مُهِمًّا على دارة الرنين، فمحطات الإذاعة تبثّ برامجها على هيئة موجات كهرمغناطيسية، ولكلّ إذاعة تردّدات محدّدة. عندما يضبط أحدُنا مفتاح الموجة في المذياع على إذاعة معينة، فإنّه يغيّر من مواسعة المواسع في دارة الرنين داخل المذياع، وهذا يغيّر من التردد الطبيعي لدارة الاستقبال ليصبح مطابقًا لتردّد موجات الإذاعة، ثم تُمرّر هذه الموجات بعد تكبيرها إلى مكبّر الصوت في المذياع فنسمعها بوضوح، في حين تتلاشى موجات الإذاعات الأخرى التي يختلف تردّدها عن تردّد الرنين.

الشكل (12): أجهزة الاتصال اللاسلكي، كلّ جهاز يحتوي دارة إرسال ودارة استقبال.

وبالطريقة نفسها تعمل أجهزة الاتصال اللاسلكيّة التي تتكوّن من دارتَي إرسال واستقبال، على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (12)، تُستخدم في مجالات كثيرة، مثل التواصل بين دوريات السير، واتصال الطائرات والسفن بالمراكز الأرضيّة، وغير ذلك الكثير من الاستخدامات.

المثال 7

تتكوّن دارة استقبال (*RLC*) في جهاز مذياع من مقاومة ومحثّ محاثّته (1.4 mH) ومواسع. أجد مواسعة المواسع المستخدم لضبط المذياع على استقبال موجات محطة إذاعة عمان (FM) وتردّدها (99 MHz).

المُعطيات: $L = 1.4 \times 10^{-3}\ \text{H},\ f_o = 9.9 \times 10^{7}\ \text{Hz}$

المطلوب: $C = ?$

الحل:

$$\omega_0 = 2\pi f_o = 2 \times 3.14 \times 9.9 \times 10^{7} = 6.2 \times 10^{8}\ \text{rad/s}$$

$$\omega_0^{\,2} = \frac{1}{L\,C} \rightarrow C = \frac{1}{L\omega_0^{\,2}}$$

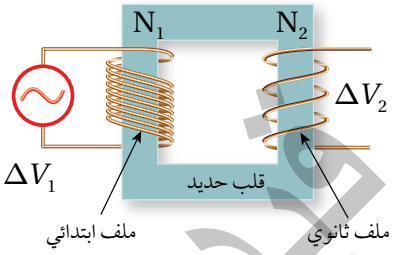
$$C = \frac{1}{1.4 \times 10^{-3} \times 3.8 \times 10^{17}} = 1.9 \times 10^{-15}\ \text{F}$$

وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي
المراجعة

المحوّل الكهربائي ونقل الطاقة
The Transformer and Power Transmission

تعمل العديد من الأجهزة الإلكترونية بفرق جهد منخفض ، ويستخدم لهذا الغرض جهاز يسمى المحول الكهربائي؛ يوصل مباشرة بالمقبس الجداري، فيعمل على تحويل فرق الجهد المتردد الذي تزودنا به شركة الكهرباء إلى قيمة أقل، مناسبة للجهاز الموصول مع المحول .

يعتمد المحوّل الكهربائي في عمله على الحثّ الكهرمغناطيسي، وهو يتكوّن من ملفّين من الأسلاك الموصلة ملفوفين على قلب حديدي مشترك، كما في الشكل (13)، يُسمّى الملف الأول بالملف الابتدائي، ويتكوّن من (N_1) لفة، ويتصل بمصدر فرق جهد متردد. في حين يتكوّن الملف الثاني من (N_2) لفة، ويتصّل بجهاز مستهلك للطاقة، مثل مقاومة أو مصباح، ويُسمَّى الملفّ الثانوي.



الشكل (13): محوّل كهربائي يتكوّن من ملفّين ابتدائي وثانوي.

يولّد مصدر فرق الجهد المتردّد تيارًا كهربائيًّا متردّدًا؛ فيتولّد في الملف الابتدائي مجال مغناطيسي متغيّر مع الزمن، ما يؤدي إلى تغير التدفق المغناطيسي عبره، وبتطبيق قانون فارادي في الحثّ، فإنّ فرق الجهد بين طرفي الملف الابتدائي يُعبَّر عنه بالعلاقة:

$$\Delta V_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

يعمل القلب الحديدي على تركيز المجال المغناطيسي داخل الملف الابتدائي، وتدفّقِ أكبر عددٍ ممكن من خطوط المجال المغناطيسي إلى الملف الثانوي، وبافتراض عدم وجود طاقة مفقودة كما هو الحال في المحول المثالي، فإنّ هذا التدفّق يولّد فرق جهد كهربائي بين طرفي الملف الثانوي، يُعبَّر عنه بالعلاقة:

$$\Delta V_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

وبتعويض التغيّر في التدفّق من العلاقة الأولى في الثانية نحصل على:

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

عندما يكون عدد اللفات (N_2) في الملف الثانوي أكبر من عدد اللفات (N_1) في الملف الابتدائي، فإنّ ($\Delta V_2 > \Delta V_1$)، ويكون المحوّل رافعًا للجهد، في حين يكون المحوّل خافضًا للجهد ($\Delta V_2 < \Delta V_1$) إذا كان عدد اللفات في الملف الثانوي أقلّ منه في الابتدائي. وفي المحوّل المثالي تكون القدرة الداخلة في الملف الابتدائي مساوية للقدرة الناتجة من الملف الثانوي، حسب العلاقة:

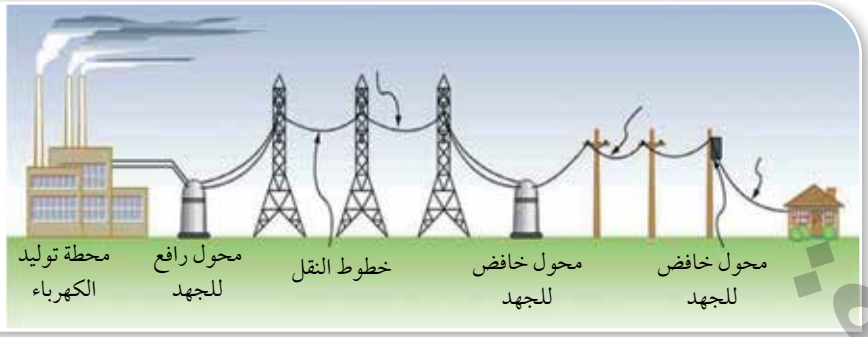
$$P_1 = P_2 \rightarrow I_1 \Delta V_1 = I_2 \Delta V_2$$

عند نقل الطاقة الكهربائية من محطات توليد الكهرباء إلى الأحياء السكنية، فإن جزءا من الطاقة المنقولة يُفقد بسبب المقاومة الكهربائية للأسلاك الناقلة. وتحرص محطات توليد الكهرباء إلى خفض قيمة الطاقة المفقودة إلى الحد الأدنى.

أتحقّق: أوضّح كيف تنتقل الطاقة الكهربائية بين ملفّي المحوّل.

أفكّر: هل يعمل المحول المبيّن في الشكل (13) عند وصل الملف الابتدائي بمصدر تيار مستمر؟ أفسر إجابتي

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (14): نقل الطاقة الكهربائية من محطات توليد الكهرباء إلى الأحياء السكنية.

وفقا للمعادلة ($P = I^2R$) فإن القدرة المستهلكة في الأسلاك تتناسب طرديا مع كل من مقاومة الأسلاك ومربع التيار المار فيها. لذا فإن خفض قيمة أيّ من هذين العاملين سيؤدي إلى التقليل من الطاقة المفقودة. لكن عند نقل الطاقة إلى مسافات طويلة، ولأن التكلفة المادية للأسلاك مرتفعة، تختار محطات توليد الكهرباء استخدام أسلاك مساحة مقطعها صغيرة، فتكون مقاومتها مرتفعة نسبيا. بالمقابل تعمل محطات توليد الكهرباء على خفض قيمة التيار الكهربائي في الأسلاك الناقلة إلى أقل قيمة ممكنة ، حيث توضح العلاقة ($P = IV$) أنه يمكن نقل الطاقة نفسها باستخدام فرق جهد مرتفع وتيار منخفض، ولتحقيق ذلك يستخدم محول لرفع الجهد إلى نحو (230 kV) ما يؤدي إلى خفض قيمة التيار في الأسلاك الناقلة. وعند نهاية خطوط النقل تستخدم محولات خافضة للجهد حتى تصل قيمة فرق الجهد في الأحياء السكنية إلى (230 V). ويبين الشكل (14) مخططا يوضح استخدام المحولات الرافعة والخافضة للجهد لنقل الطاقة الكهربائية.

أفكّر: توجد نهاية قصوى لرفع الجهد الكهربائي، عند نقل الطاقة الكهربائية، يؤدي تجاوزها إلى تأيين جزيئات الهواء. فما الذي ينتج من تأيين الهواء حول خطوط النقل (الأسلاك)؟

المثال 8

محوّل كهربائي مثالي خافض للجهد يتصل ملفّه الابتدائي بمصدر فرق جهد(240 V)، ويتصل ملفّه الثانوي بمصباح كهربائي مقاومته (2 Ω)، وعدد لفّات الملف الابتدائي (1200) لفة، ولفّات الملف الثانوي (30) لفة أحسب:

أ . فرق الجهد بين طرفي الملف الثانوي.

ب. التيار في الملف الابتدائي.

المُعطيات: $\Delta V_1 = 240\ \text{V},\ R = 2\ \Omega,\ N_1 = 1200,\ N_2 = 30$

المطلوب: $\Delta V_2 = ?,\ I_1 = ?$

الحلّ:

أ .

$$\frac{\Delta V_1}{N_1} = \frac{\Delta V_2}{N_2}$$

$$\frac{240}{1200} = \frac{\Delta V_2}{30} \rightarrow \Delta V_2 = 6\ \text{V}$$

ب. التيار الكهربائيّ المارّ في الملف الابتدائي:

$$I_2 = \frac{\Delta V_2}{R} = \frac{6}{2} = 3\ \text{A}$$

$$I_1 \Delta V_1 = I_2 \Delta V_2$$

$$I_1 = \frac{I_2 \Delta V_2}{\Delta V_1} = \frac{3 \times 6}{240} = 0.08\ \text{A}$$

وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي
المراجعة

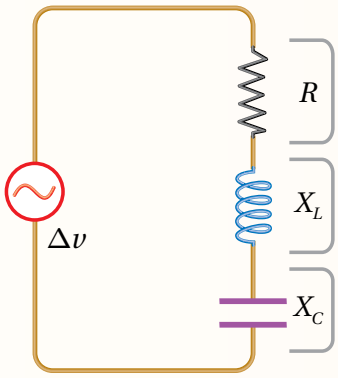
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضح المقصود بالمعاوقتين المحثّية والمواسعية، ثم أبيّن العوامل التي تؤثر في كلٍّ منهما.

2. أوضّح المقصود بالقيمتين العظمى والفعّالة لفرق الجهد المتردّد.

3. **أستنتج:** أوضّح سبب صغر قيمة التيار المتردّد في دارة (AC) تحتوي مواسعًا فقط عند التردّدات المنخفضة جدًّا. ثم أوضّح سبب انعدام التيار في دارة (AC) تحتوي محثًّا فقط عند التردّدات العالية جدًّا.

4. **أفسّر:** عند مضاعفة تردُّد مصدر فَرْق الجهد إلى مثليه في دارة تيار متردّد تحتوي (RLC) كما في الشكل، ماذا يحدث لكلٍّ من: R, X_L, X_C؟ أوضح إجابتي.



5. **أستخدم الأرقام:** ما القيمة العظمى للتيار المتردّد في دارة (AC) تحتوي مواسعًا مواسعته (5.0 μF)، ومصدر فَرْق جهد قيمته العظمى (111 V) وتردّده (86 Hz)؟

6. **أستخدم الأرقام:** عند أيّ تردُّد زاويّ لمصدر فرق الجهد تتساوى المعاوقة المحثّية لمحثّ (57 μH) مع المعاوقة المواسعيّة لمواسع (57 μF) في دارة تيار متردّد؟ وماذا يُسمّى هذا التردّد؟

7. **أستخدم الأرقام:** دارة (RLC) تتكوّن من مقاومة (80 Ω) ومواسع (5.0 μF) ومحثّ، موصولة على التوالي بمصدر فَرْق جهد متردّد، جهده الفعّال (12 V)، وتردّده الزاويّ (2000 rad/s). أجد محاثّة المحثّ التي تجعل للتيار الفعّال أكبر قيمة، ثمّ أجد أكبر قيمة للتيار الفعّال.

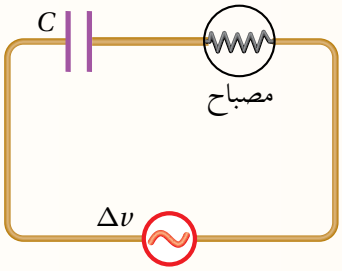
8. **أستخدم الأرقام:** يُستخدم في شبكات توزيع الكهرباء محوّل خافض للجهد، عدد لفات ملفّه الابتدائي (6900) والثانوي (600)، فما مقدار فرق الجهد بين طرفي ملفّه الثانوي، إذا كان فرق الجهد بين طرفي الملف الابتدائي (230 kV)؟

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

1. يدور مِلفّ مولِّد كهربائي فيزوِّدنا بفرق جهد متردّد بحَسَب العلاقة ($\Delta V = 240 \sin 360\pi t$). إنّ القيمة العظمى لفرق الجهد بين طرفيه وتردُّده يساويان:

أ . (120 V) و (180 Hz).
ب. (120 V) و (360 Hz).
جـ. (240 V) و(180 Hz).
د . (240 V) و(360 Hz).

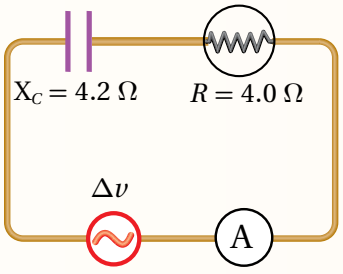
2. يبين الشكل دارة يتصل فيها مصباح مقاومته (R) ومواسع مواسعته (C) مع مصدر فرق جهد متردد على التوالي. عند زيادة تردد المصدر مع بقاء القيمة العظمى لفرق الجهد ثابتة، أي من الكميات الآتية يزداد؟



أ . مواسعة المواسع. ب. معاوقة المواسع.

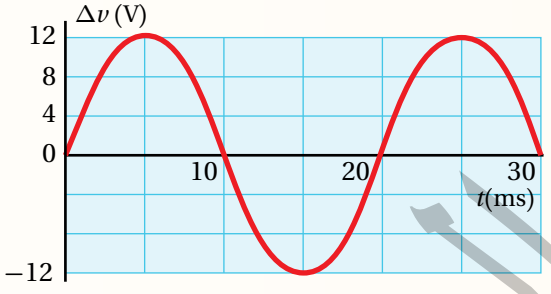
جـ. مقاومة المصباح. د . القدرة المستهلكة في المصباح.

3. يبيّن الشكل المجاور دارة تيار متردّد يتصل فيها مصباح ومواسع بمصدر فَرْق جهد تردُّده (40 Hz)، وقراءة الأميتر (2.0 A)، إذا ارتفع تردُّد مصدر الجهد إلى (56 Hz) مع بقاء قيمته العظمى ثابتة، فإنَّ قراءة الأميتر بوَحْدة أمبير (A) تساوي:



أ . 1.6 ب. 2.0 جـ. 2.3 د . 2.8

* دارة تيار متردّد تحتوي مقاومة فقط مقدارها (6 Ω)، يتغيّر فَرْق الجهد بين طرفيها كما في التمثيل البياني المجاور. أجيب عن الفقرتين الآتيتين مستعينًا بالتمثيل البياني:



4. القيمة الفعّالة للتيار المتردّد الذي يسري في المقاومة بوَحْدة أمبير (A) تساوي:

أ . $\sqrt{2}$ ب. 2 جـ. $2\sqrt{2}$ د . 4

5. التردُّد الزاوي لفرق جهد المصدر في الدارة بوَحْدة (rad/s) يساوي:

أ . 50 ب. 100 جـ. $50\ \pi$ د. $100\ \pi$

6. وصل مصدر للتيار المتردد مع مقاومة (R)، فكانت القدرة المتوسطة المستهلكة في المقاومة ($\overline{P}$)، إذا أصبح فرق الجهد الفعال الخارج من المصدر مثلي ما كان عليه، فإن القدرة المتوسطة المستهلكة في المقاومة تساوي:

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

قيد الإعداد والمراجعة

الفكرة الرئيسة:

تحتوي الأجهزة الإلكترونية التي نستخدمها، مثل الهاتف الخلوي وجهاز التحكُّم عن بُعْد دارات إلكترونية، من مُكوِّناتها الثنائي والترانزستور، التي جاءت مخرجات لعلم أشباه الموصلات.

نتاجات التعلّم:

- أصنّف الموادّ إلى موادّ موصِلة وعازلة وشبه موصِلة.
- أشرح تركيب الثنائي البلوري.
- أمثّل العلاقة بين الجهد والتيار في الثنائي البلوري.
- أصمّم دارة كهربائية أستخدم فيها الثنائي البلّوري بوصفه مقوّمًا للتيار المتردّد.
- أصف أجزاء الترانزستور الرئيسة.
- أذكر استخدامات الترازستور في الأجهزة الإلكترونية الحديثة.

المفاهيم والمصطلحات:

إلكترونات التكافؤ Valance Electrons

موادّ عازلة للكهرباء Insulators

موادّ موصِلة Conductors

موادّ شبه موصِلة Semiconductors

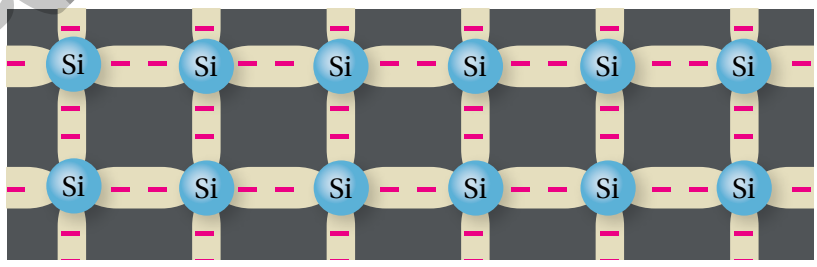
إشابة Doping

الموادّ الموصِلة والعازلة وشبه الموصِلة
Conductors, Insulators and Semiconductors

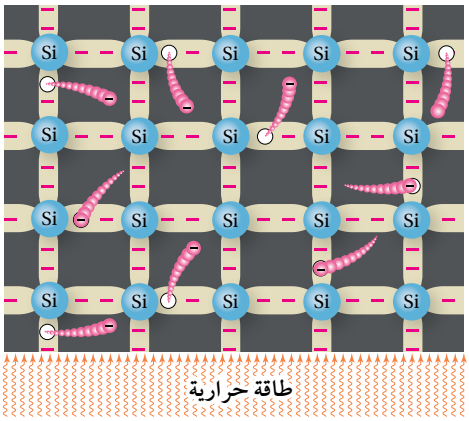
تعلّمتُ سابقاً أنّ الذرّات هي وَحْدات البناء الأساسية للموادّ، وتتكوّن الذرّة من نواة موجبة الشحنة تتحرك حولها إلكترونات سالبة الشحنة تتوزّع في مستويات (أغلفة) طاقة. وتُسمّى الإلكترونات الموجودة في آخر مستوى طاقة **إلكترونات التكافؤ Valance electrons**، وهي التي تُحدّد كثيرًا من خصائص المادّة، مثل التوصيل الكهربائي والتوصيل الحراري. وتُصنَّف الموادّ من حيث قابليتها لتوصيل الكهرباء إلى الأنواع الآتية:

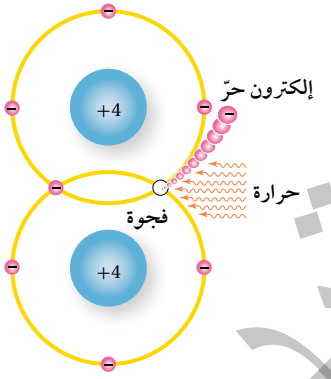
1. **موادّ عازلة Insulators:** عدد إلكترونات التكافؤ لها أكثر من أربعة، وترتبط بذرات المادّة بقُوًى كهربائية كبيرة، لذلك لديها عدد قليل من الإلكترونات الحرّة وهذا يجعلها مادّة عازلة للكهرباء، وعادة توجد على هيئة مركّبات، مثل المطاط والمايكا والزجاج.
2. **موادّ موصِلة Conductors:** عدد إلكترونات التكافؤ لها أقلّ من أربعة، لكن قوى ارتباطها بالذرات ضعيفة، لذلك لديها كثير من الإلكترونات الحرّة وهذا يجعلها موصِلات جيدة للتيار الكهربائي، مثل الحديد والنحاس والفضة.
3. **موادّ شبه موصِلة Semiconductors:** عدد إلكترونات التكافؤ لها يساوي أربعة، وتوجد بين الموادّ الموصِلة والموادّ العازلة من حيث قدرتها على توصيل التيار الكهربائي، ومن الأمثلة على الموادّ شبه الموصلة الجرمانيوم (Ge) والسليكون (Si)، وهما من أهمّ أشباه الموصِلات المستخدمة في التطبيقات الإلكترونية.

ترتبط كل ذَرّة من ذرات السليكون بأربع ذرّات مجاورة لها بروابط تساهمية، وتشكّل بذلك بلّورة السليكون، وعند درجة حرارة الصفر المطلق (0 K) تكون جميع إلكترونات التكافؤ للسليكون النقي مقيدة نتيجة للروابط التساهمية، ولا توجد إلكترونات حرّة كما في الشكل (15).



الشكل (15): رَسْم تخطيطي لبلورة السليكون عند درجة حرارة الصفر المطلق.

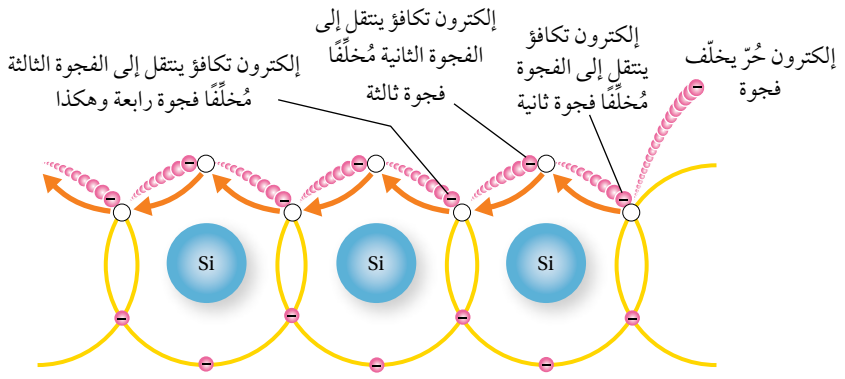




الشكل (16): الإلكترونات الحرة والفجوات في بلورة السليكون عند درجة حرارة الغرفة.

أمّا عند درجة حرارة الغرفة (20° C) مثلًا، فتمتصّ بعض الإلكترونات طاقة حرارية تؤدي إلى كَسْر الروابط التساهمية، ما يؤدي الى تحرير إلكترونات تُسمّى **إلكترونات التوصيل** Conduction electrons. عندما يغادر الإلكترون الرابطة التساهمية يصبح إلكترونًا حرًّا، ويترك خلفه فراغًا يُطلق عليه **فجوة Hole**، أتأمّل الشكل (16). تبدو الفجوة مثل شحنة موجبة نتيجة للنقص في الشِّحْنة السالبة الكليّة على الذَّرّة عند تَرْك الإلكترون موقعَه، وبذلك يكون عدد الفجوات يساوي عدد إلكترونات التوصيل في بلورة السليكون النقيّة، وهو ما يُسمّى **زوج إلكترون–فجوة** Electron–Hole pair.

تسهم الفجوات في التوصيل الكهربائي مثل إلكترونات التوصيل، فحين تتكوّن فجوة نتيجة لإفلات إلكترون عند كَسْر رابطة تساهمية يصبح من السهل لإلكترون ذرة مجاورة الانتقال إلى تلك الفجوة تاركًا خلفه فجوةً جديدةً، ينتقل إليها إلكترون من ذَرّة أخرى مجاورة وهكذا دواليك. فتبدو الفجوات مثل شحنات موجبة تتحرك بعكس اتجاه حركة الإلكترونات، وعليه، يمكن افتراض أنّ الفجوات تشكّل تيارًا كهربائيًّا يسري بعكس اتجاه حركة الإلكترونات كما في الشكل (17).



الشكل (17): التيار الناتج من الفجوات.

قيد الإعداد والمراجعة

أشباه الموصلات من النوع n والنوع p

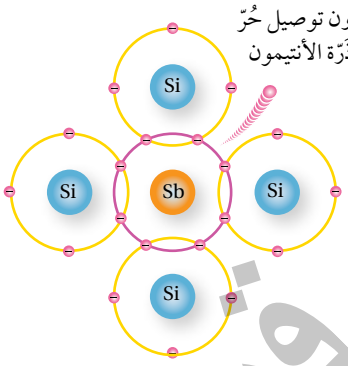
n–type and p–type Semiconductors

أشباه الموصِلات النقيّة لا توصل التيار الكهربائي جيدًا، لكن يمكن زيادة موصليتها الكهربائية بإضافة بعض الموادّ إليها تُسمّى **شوائب** Impurities، ويُطلق على تلك العمليّة **الإشابة** **Doping**، حيث تُضاف مادّة إلى بلّورة السليكون النقيّ تزيد عدد الإلكترونات الحرّة؛ فينتج من ذلك ما يُسمّى **البلورة السالبة** نوع (n) n–type أو تضاف مادة تزيد عدد الفجوات لينتج من ذلك **بلورة موجبة** نوع (p) p–type.

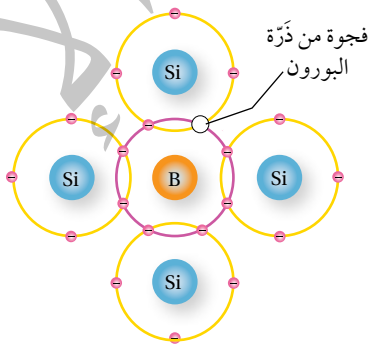
لزيادة عدد الإلكترونات الحرّة في بلّورة السليكون النقيّ، يُضاف إليها عنصر خماسيُّ التكافؤ (يملك خمسة إلكترونات تكافؤ في غلافه الأخير) مثل الأنتيمون أو الفسفور أو الزرنيخ، وفي هذه الحالة تحلّ ذَرّة أنتيمون (Sb) محلّ ذَرّة سليكون مركزية، وتكوّن أربع روابط تساهمية مع أربع ذرات سليكون مجاورة لها، ويبقى إلكترون التكافؤ الخامس حرًّا على نحو ما يظهر في الشكل (18). ونتيجة لذلك يزداد عدد إلكترونات التوصيل في بلورة السليكون، ويصبح أكثر من عدد الفجوات. وتُسمّى البلّورة في هذه الحالة بلّورةً سالبةً أو بلّورة من النوع (n).

أمّا لزيادة عدد الفجوات في بلورة السليكون، فيُضاف عنصر ثلاثي التكافؤ (يمتلك ثلاثة إلكترونات تكافؤ في غلافه الأخير) كالغاليوم أو البورون. وفي هذه الحالة تحلّ ذَرّة البورون محل ذَرّة سليكون مركزية، فترتبط بأربع ذرات سليكون مجاورة لها، وتشارك إلكتروناتها الثلاثة لتكوين ثلاث روابط تساهمية مع ثلاث ذرات سليكون، أمّا الرابطة الرابعة، فينقصها إلكترون واحد، فتتشكّل فجوة كما في الشكل (19)، وهذا يعني أنّ كلّ ذَرّة بورون تضاف إلى بلّورة السليكون تُنتج فجوة جديدة، فيزداد بذلك عدد الفجوات في بلّورة السليكون، ويصبح عددها أكبر من عدد إلكترونات التوصيل، وتُسمّى البلّورة في هذه الحالة بلّورةً موجبةً، أو بلّورة من النوع (p).

عند توصيل البلّورة الموجبة (p) أو السالبة (n) بمصدر فَرْق جهد فإنّ تيارًا كهربائيًّا يسري فيها، وهذا التيار ينتج من حركة الفجوات والإلكترونات، وتُسمّى الفجوات والإلكترونات ناقلات التيار Current carriers. ولأنّ عدد الإلكترونات أكبر في البلورة السالبة، فإنّها تُسمى الناقلات الأغلبية Majority carriers وتُسمّى الفجوات فيها الناقلات الأقليّة Minority carriers. وبالمقابل، فإنّه في البلورة الموجبة تكون الفجوات هي الناقلات الأغلبيّة، والإلكترونات هي الناقلات الأقليّة. وتجدر الإشارة هنا إلى أنّ الشِّحْنة الكليّة للبلورة تساوي صفرًا؛ لأنها تتكون من ذرات متعادلة.

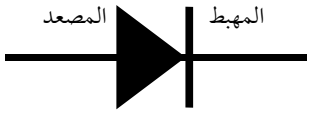


الشكل (18): إضافة عنصر خماسي التكافؤ مثل ذَرّة أنتيمون (Sb) إلى بلورة السليكون. يصبح الإلكترون الزائد إلكترونًا حرًّا.



الشكل (19): إضافة ذَرّة بورون (B) إلى بلّورة السليكون وتكوين فجوة.

✓ **أتحقّق:** أوضّح المقصود بناقلات التيار الأغلبيّة، وناقلات التيار الأقليّة في البلّورة الموجبة (p) والبلورة السالبة (n).



(أ) رمز الثنائي.

(ب) الثنائي الأكثر استخدامًا في الدارات الإلكترونية، حيث يمثل الطرف الذي رُسم عليه خط أبيض المهبط.

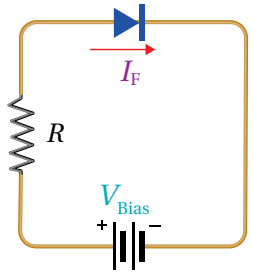
الشكل (20): الثنائي ورمزه في الدارات الإلكترونية.

الثنائي البلّوري Diode

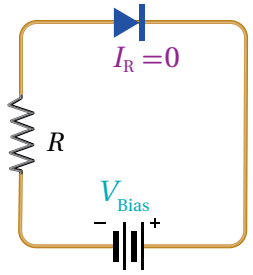
الثنائي البلوري (Diode): وصلة تتكون من بلورة من مادة شبه موصلة، جزؤها الأول من النوع (n)، وجزؤها الثاني من النوع (p)، ويُرمز إليه في الدارات الإلكترونية بالرمز المُوضَّح في الشكل (20/ أ). حيث يُسمّى طرف الثنائي من النوع (n) المهبط Cathode (K)، وطرفه من النوع (p) المصعد Anode (A). ويُظهر الشكل (20/ ب) شكل الثنائي الأكثر استخدامًا في الدارات الإلكترونية، ويستخدم لتمرير التيار الكهربائي باتجاه واحد فقط.

يُسمّى توصيل الثنائي بمصدر فَرْق جهد انحيازًا. وللانحياز حالتان الأولى: انحياز أمامي Forward bias، حيث يوصل الثنائي بمصدر فَرْق جهد (بطارية مثلًا)، على أن يوصل القطب الموجب للبطارية بمصعد الثنائي، ويوصل القطب السالب للبطارية بمهبط الثنائي، كما في الشكل (21/ أ) فينشأ تيار كهربائي (I_F) عندما يكون فرق الجهد بين طرفي الثنائي أكبر من قيمة معينة تسمى حاجز الجهد، والذي تعتمد قيمته على مادّة البلورة؛ فعند درجة حرارة 25 °C، يكون حاجز الجهد (0.7 V) في بلورة السليكون، في حين يساوي (0.3 V) في بلورة الجرمانيوم. أما إذا كان فرق الجهد بين طرفي الثنائي أقل من حاجز الجهد، تكون قيمة التيار صغيرة جدًا. إنّ سريان تيار كهربائي كبير في الثنائي يؤدي إلى تلفه، لذلك يجب توصيل الثنائي بمقاومة لخفض قيمة التيار.

والحالة الثانية لتوصيل الثنائي هي الانحياز العكسي Reverse bias، وهنا يوصل القطب الموجب للبطارية بمهبط الثنائي، ويوصل قطبها السالب بمصعد الثنائي، كما في الشكل (21/ ب)، وتصبح مقاومة الثنائي كبيرة جدًّا، وهذا يؤدي إلى عبور تيار كهربائي صغير جدًّا يمكن عَدُّه صفرًا ($I_R = 0$). وإذا زاد فرق جهد المصدر على قيمة معينة، تُسمّى جهد الانهيار Breakdown voltage، فإنّ مقاومة الثنائي تنهار، ويسري فيه تيار كبير يؤدّي إلى تلفه.



أ) انحياز أمامي



ب) انحياز عكسي

الشكل (21): وَصْلتا الثنائي: الانحياز الأمامي والانحياز العكسي.

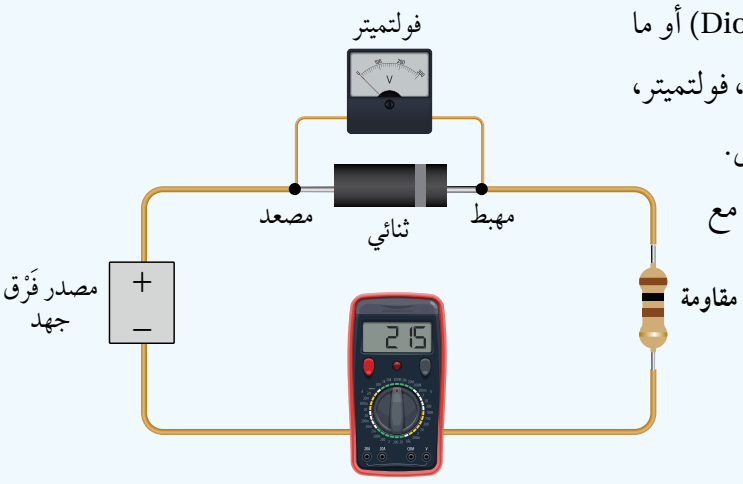
قيد الإعداد والمراجعة

التجربة 2

دراسة فَرْق الجهد والتيار الكهربائي في الثنائي البلّوري

المـوادّ والأدوات: ثنائي بلّوري (Diode 1N4004) أو ما يكافئـه، مصدر فَـرْق جهد مسـتمر (15 V – 0)، فولتميتر، أميتـر رَقْمي، مقاومة (10 kΩ)، أسـلاك توصيل.

إرشادات السلامة: توخّي الحذر عند التعامل مع مصادر التيار الكهربائيّ.



خطوات العمل:

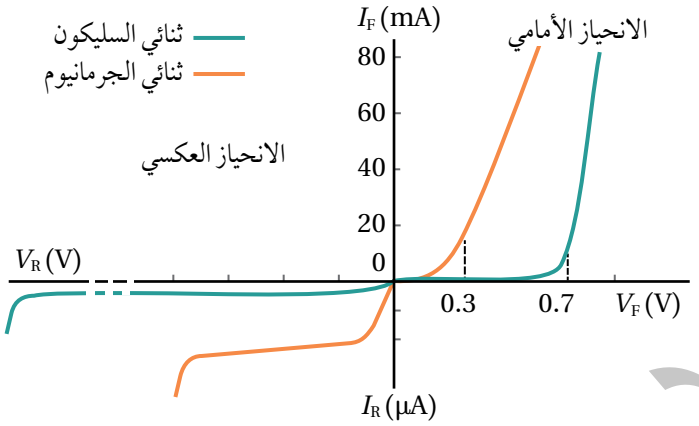
أنفّذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

1. أُركّب الدارة كما في الشكل. ألاحظ أنّ مهبط الثنائي متصل بالقطب السالب لمصدر فَرْق الجهد.
2. **ألاحظ:** أبدأ من فَرْق جهد يساوي صفرًا، ثم أرفع فَرْق الجهد تدريجيًّا بزيادة 0.1 V في كلّ مرّة حتى أصل إلى فَرْق جهد 2 V.
3. أدوّن قراءات الفولتميتر والأميتر في الجدول.
4. أعيد مصدر فَرْق الجهد إلى وضع الصفر.
5. أعكس توصيل أقطاب المصدر ليتصل القطب الموجب للمصدر بمهبط الثنائي.
6. أعيد ضبط الأميتر حتى يستطيع قراءة تيار بالميكرو أمبير.
7. أرفع فَرْق جهد المصدر من (0) إلى 10 V بزيادة 1 V في كلّ مرّة، وأدوّن قراءتيّ الفولتميتر والميكرو أميتر في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. **أتوقّع:** في أيّ الحالتين كان توصيل الثنائي في وضعية الانحياز الأمامي؟ وفي أيّهما كان في وضعيّة الانحياز العكسي؟
2. **أمثّل بيانيًّا** العلاقة بين التيار الكهربائي المارّ في الثنائي وفرق الجهد بين طرفيه على أن يكون التيار الكهربائي على المحور y، وفرق الجهد على المحور x باستخدام برمجية (Excel)، أو على ورق رسم بياني.
3. أحدّد قيمة حاجز الجهد من منحنى ($I-V$).
4. **أستنتج:** أختار من منحنى ($I-V$) نقطتين أكبر من حاجز الجهد، وأحسب ميل الخط المستقيم الواصل بينهما. ماذا تمثل قيمة الميل الذي حصلت عليه؟
5. **أستخدم الأرقام:** أحسب مقدار مقاومة الثنائي في وضعية الانحياز العكسي باستخدام فَرْق الجهد والتيار المقيس في الخطوة (7).
6. **أقارن** بين مقاومة الثنائي في وضعيّتي الانحياز الأمامي والانحياز العكسي.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (22): منحنى ($I-V$) لثنائيين بلوريين: أحدهما سليكون، والثاني جرمانيوم.

مقاومة الثنائي البلوري Diode Resistance

لاحظْتُ في التجربة السابقة أنّ مقاومة الثنائي تختلف باختلاف فَرْق الجهد بين طرفيه، وباختلاف طريقة توصيله بمصدر فَرْق الجهد. يوضّح الشكل (22) التمثيل البياني لمنحنى ($I-V$) لثنائي السليكون (Si) وثنائي الجرمانيوم (Ge)؛ فالعلاقة بين التيار وفَرْق الجهد للثنائي عمومًا غَيْر خطية، وقد سبق أنْ تعرّفْتُ ذلك في الوَحْدة الرابعة من هذا الكتاب، حيث وُصِفت مقاومة الثنائي بأنّها لا أومية.

في حالة الانحياز الامامي، ألاحظ أنّ التيار يكون صغيرًا عندما يكون فرق الجهد على طرفي الثنائي أقلّ من حاجز الجهد، وبزيادة فرق جهد المصدر إلى قيمة أعلى من حاجز الجهد، فإنّ زيادة قليلة في فرق الجهد تؤدّي إلى زيادة كبيرة في التيار الكهربائي، ما يعني أنّ مقاومة الثنائي في وضعيّة الانحياز الأمامي صغيرة جدًّا. في حين أنّه في وضعيّة الانحياز العكسي، يكون التيار الكهربائي صغيرًا جدًّا (بالميكرو أمبير)، ما يعني أنّ مقاومة الثنائي كبيرة جدًّا.

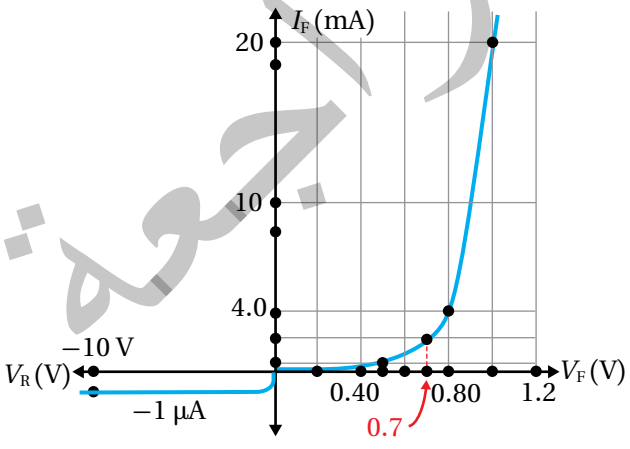
✓ **أتحقّق:** أقارن بين توصيل الثنائي بوضعيّة الانحياز الأمامي ووضعيّة الانحياز العكسي من حيث التوصيل بمصدر فَرْق الجهد، والتيار الكهربائي المارّ في كل حالة.

المثال 8

يبيّن الشكل (23) منحنى ($I-V$) لثنائي السليكون في وضعيتَي الانحيازين الأمامي والعكسي، مُعتمِدًا على الشكل والبيانات المثبتة عليه، (علمًا أنَّ حاجز الجهد لثنائي السليكون (0.7 V)، وجهد المهبط يساوي صفرًا). أجد المقاومة المتوسطة للثنائي في الحالات الآتية:

أ . الانحياز الأمامي.

ب. الانحياز العكسي.



الشكل (23): منحنى ($I-V$) لثنائي السليكون في الانحيازين الأمامي والعكسي.

قيد إعداد المراجعة

المعطيات: بيانات الشكل.

المطلوب: $R_F = ?,\ R_R = ?$

الحلّ:

أ . نختار نقطتين وهما (0.80 V)، وقيمة التيار عندها (4.0 mA)، وعند الجهد (1.0 V) وقيمة التيار عندها (20 mA)، وتُحسَب المقاومة المتوسطة على النحو الآتي:

$$R_F = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1.0 - 0.80}{(20 - 4.0) \times 10^{-3}} = \frac{2.0 \times 10^{2}}{16} \approx 13\ \Omega$$

ب. من المنحنى أجد أن التيار قد تغير من (0) إلى ($-1\ \mu A$) عند تغير الجهد من (0) إلى (-10 V)، وتُحسَب المقاومة المتوسطة على النحو الآتي:

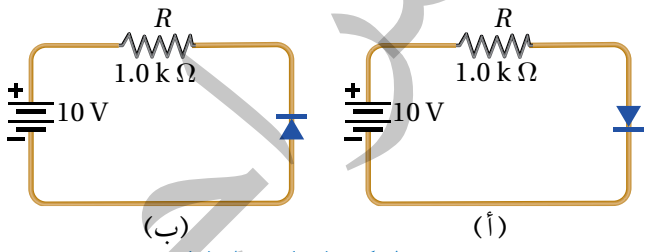
$$R_R = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{-10 - 0}{-1.0 \times 10^{-6} - 0} = 10\ M\Omega$$

المثال 9

اعتمادًا على الدارة في الشكل (24)، علمًا أنّ الثنائي مصنوع من مادة السليكون، والمقاومة الداخلية لمصدر فَرْق الجهد مهملة، أجد لكلٍّ من الشكلين (24/ أ) و (24/ ب) ، فَرْق الجهد على طرفي الثنائي، وفَرْق الجهد على طرفي المقاومة ΔV_R، والتيار الكهربائي المارّ في المقاومة.

المُعطيات: الشكل (24).

المطلوب: $\Delta V_D = ?,\ \Delta V_R = ?,\ I = ?,\ R_F = ?$

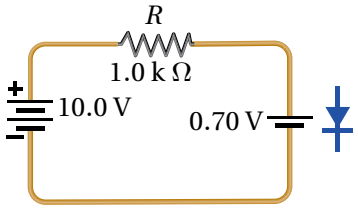


الشكل (24): مثال (9)

الحلّ:

في هذا الكتاب سنتعمد النموذج المبسّط للثنائي (simplified model) حيث يكون فرق الجهد بين طرفيه ثابت، ويساوي 0.7 V للسليكون و 0.3 V للجرمانيوم، في حالة الانحياز الأمامي.

الشكل (24/ أ) يبين أن الثنائي في حالة انحياز أمامي، فيكون فَرْق الجهد على طرفيه ($\Delta V_D = 0.7$ V) كما في الشكل (25)؛ لأنّ الثنائي مصنوع من السليكون.



الشكل (25): تمثيل الثنائي في حالة الانحياز الأمامي.

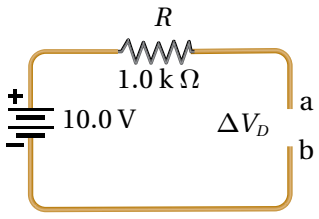
فريد أبو عداد والمراجعة

باستخدام قاعدة كيرتشوف الثانية أجد أنّ

$$\Delta V_R = 10.0 - 0.70 = 9.3\ \text{V}$$

$$I = \frac{10.0 - 0.70}{R} = \frac{9.3}{1.0 \times 10^3} = 9.3\ \text{mA}$$

الشكل (24/ ب)، ونظرًا إلى أنّ مصعد الثنائي متصل بالقطب السالب للبطارية، فإنّ الثنائي في حالة انحياز عكسي، ويعمل عمل مفتاح مفتوح (وكأنّه مقاومة لانهائيّة)؛ كونه لا يمرّر تيارًا كهربائيًّا، وأمثّل الدارة كما في الشكل (26).



الشكل (26): تمثيل الثنائي في حالة الانحياز العكسي.

$$\Delta V_D = V_a - V_b = 10.0\ \text{V}$$

$$\Delta V_R = 0$$

$$I = 0$$

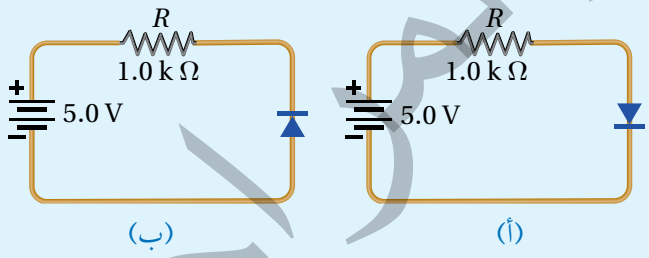
نمرين

أستخدم الأرقام: اعتمادًا على الدارة الموضّحة في الشكل (27) حيث إنّ الثنائي مصنوع من مادة الجرمانيوم، وبإهمال المقاومة الداخلية للبطارية، أجد ما يأتي لكلٍّ من الشكلين (أ) و (ب) :

1 . فَرْق الجهد على طرفي الثنائي .

2 . فَرْق الجهد على طرفي المقاومة.

3 . التيار المارّ في المقاومة.

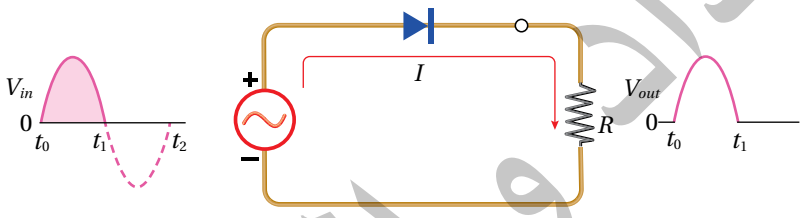


الشكل (27): الانحيازان الأمامي والعكسي لثنائي الجرمانيوم.

قيد الإعداد والمراجعة

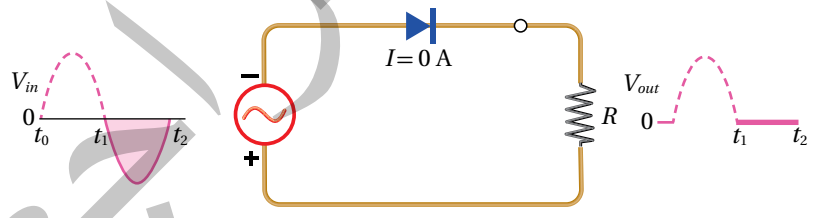
الثنائي مقوّمًا للتيار المتردّد Diode as a Current Rectifier

تعلّمت سابقاً، أنّ المقابس في المنازل تزوّدنا بتيار متردّد، وبعض الأجهزة الكهربائية تعمل بتيار مستمر. فكيف أحوّل التيار المتردّد إلى تيار مستمر؟ عند توصيل الثنائي بمصدر تيار متردّد كما في الشكل (28)، فإنّه يسمح لنصف الموجة التي تمثل جهدًا موجبًا بالعبور؛ لأنّ وصلة الثنائي تكون في حالة الانحياز الأمامي كما في الشكل (28/ أ). أمّا النصف الثاني من الموجة، فيمثّل جهدًا سالبًا وتكون وصلة الثنائي في حالة انحياز عكسي، والثنائي لا يسمح للنصف السالب من الموجة بالعبور كما في الشكل (28/ ب). لذلك تكون الإشارة الناتجة على شكل موجة نصف جيبيّة باتجاه واحد (موجبة فقط) كما في الشكل (28/ جـ)، وتُسمّى الدارة في الشكل (28) دارة تقويم نصف موجة Half wave rectifier وفي هذه الحالة يكون تردّد الموجة الناتجة مساويًا لتردّد الموجة الداخلة.

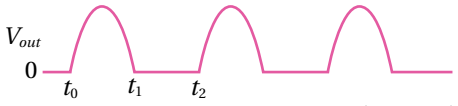


أ) خلال الجزء الموجب من الإشارة المدخلة، يكون الثنائي في حالة انحياز أمامي ويمرّر النصف الموجب (العلوي) من الموجة فقط.

الشكل (28): الثنائي البلوري مقوّم نصف موجة.



ب)خلال الجزء السالب من الإشارة المدخلة، يكون الثنائي في حالة انحياز عكسي ولا يمرّر النصف السالب (السفلي) من الموجة.



جـ) الشكل النهائي للإشارة الناتجة.

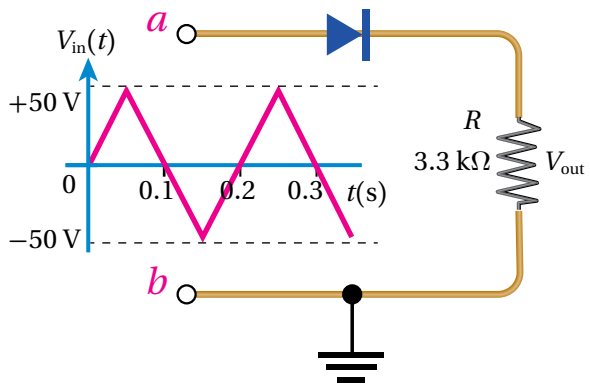
قيد الإعداد والمراجعة

المثال 10

يمثّل الشكل (29) دارة مقوِّم نصف موجة، إذا كانت الموجة الكهربائية الداخلة مثلثّة الشكل كما في الشكل، بافتراض أنّ الثنائي مثالي مقاومته مهملة، وبإهمال فَرْق الجهد بين طرفيه، أجيب عمّا يأتي:

أ . في أيّ المدد الزمنيّة يكون الثنائي في حالة انحياز أماميّ؟ وفي أيّها يكون في حالة انحياز عكسيّ؟

ب. أرسم شكل الموجة الناتجة على المقاومة (R).



الشكل (29): دارة مقوِّم نصف موجة.

المُعطيات: الشكل (29).

المطلوب: شكل الموجة الخارجة.

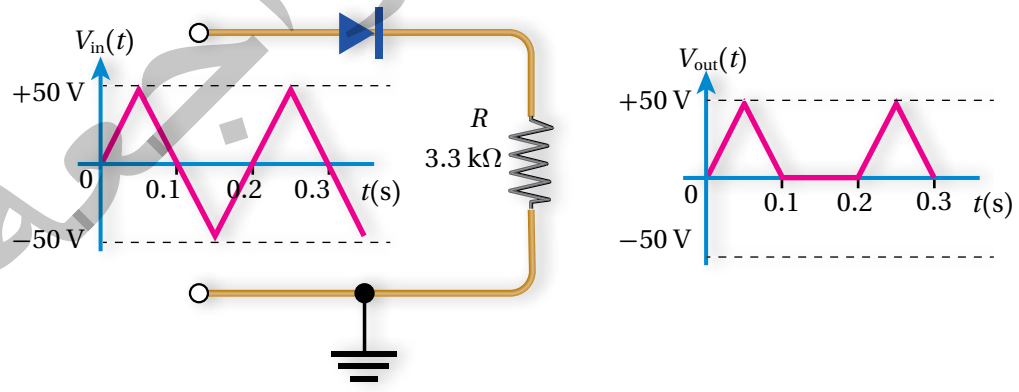
الحلّ:

أ . في المدة الزمنيّة (0–0.1 s) والمدة (0.2–0.3 s) يكون جهد النقطة (a) أكبر من جهد النقطة (b)، أيْ أنّ جهد مصعد الثنائي أكبر من جهد مهبطه، لذلك يكون الثنائي في حالة انحياز أمامي.

أمّا في المدة الزمنيّة (0.1–0.2 s) فيكون جهد النقطة (a) أقلّ من جهد النقطة (b)، أيْ أنّ جهد مصعد الثنائي أقلّ من جهد مهبطه، لذلك يكون الثنائي في حالة انحياز عكسي.

ب . في المدة التي يكون فيها الثنائي في حالة انحياز أمامي يمرِّر الموجة الكهربائيّة، وأمّا في المدة التي يكون فيها الثنائي في حالة انحياز عكسي، فلا يمرِّر الموجة الكهربائية، ويكون شكل الموجة الخارجة على المقاومة (R) كما في الشكل (30).

نلاحظ أن القيمة العظمى للموجة الناتجة على المقاومة (50 V) تساوي القيمة العظمى للموجة الداخلة، ويعود ذلك لافتراض أن الثنائي مثالي لا يوجد فرق في الجهد بين طرفيه.



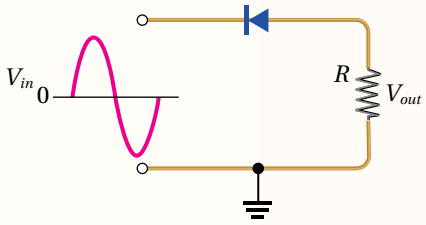
الشكل (30): شكل الموجتين الداخلة والخارجة.

قيد الإعداد والمراجعة

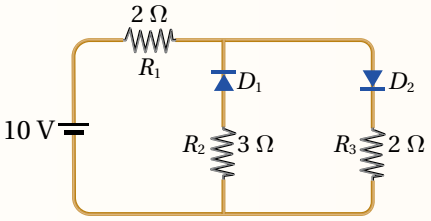
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بكلٍّ من: الموادّ شبه الموصِلة، والإشابة، والثنائي البلوري.

2. **أستنتج:** اعتمادًا على الدارة الموضّحة في الشكل، أرسم شكل الموجة الناتجة. هل سيتغير شكل الموجة الناتجة إذا عُكس الثنائي؟ أفسّر إجابتي.



3. **أستخدم الأرقام:** اعتماداً على الشكل، وبإهمال فَرْق الجهد على طرفي الثنائي في حالة الانحياز الأمامي:

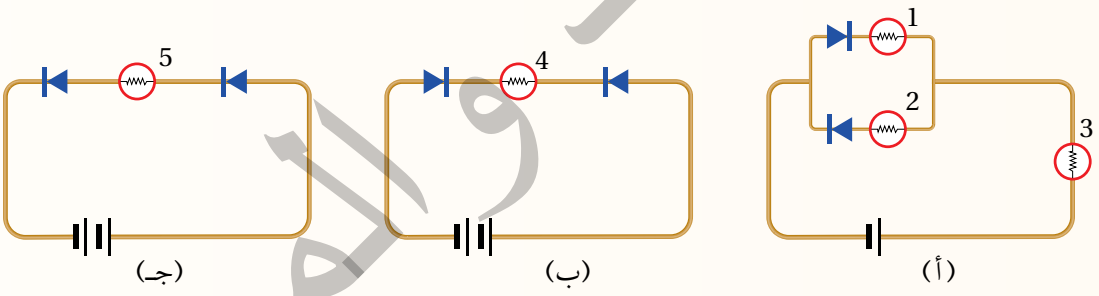


أ . أيّ الثنائيّين في حالة انحياز أمامي؟، وأيّهما في حالة انحياز عكسي؟

ب. أجد التيار المارّ في كلّ مقاومة.

جـ. إذا عُكست أقطاب البطارية، أجد التيار المارّ في كلّ مقاومة.

4. **أستنتج:** اعتمادًا على الشكل التالي أيُّ المصابيح يضيء، وأيُّها لا يضيء؟



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

1. أي العبارات الآتية صحيحة لبلورة السليكون الموجبة:

أ. تحتوي على فجوات فقط.

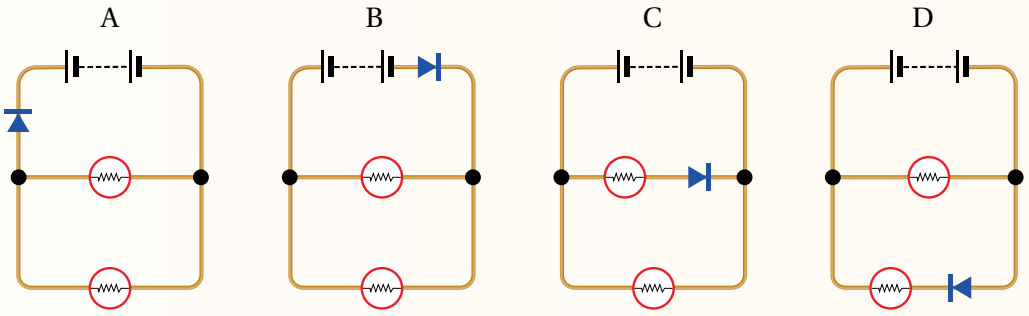
ب. عدد الفجوات فيها يساوي عدد إلكترونات التوصيل.

جـ. عدد الفجوات أكبر من عدد إلكترونات التوصيل.

د. تحتوي على إلكترونات توصيل فقط.

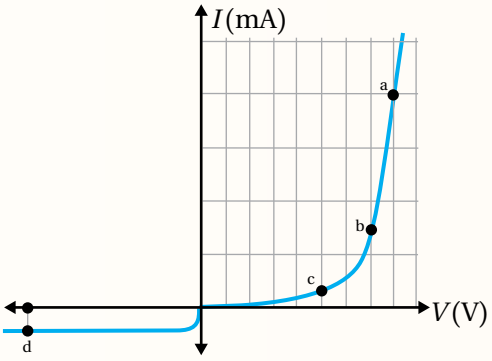
قيد الإعداد والمراجعة

2. في أي دارة من الدارت الأربعة المبينة في الشكل المجاور سوف يضيء المصباحان معًا؟



أ . الدارة (A). ب. الدارة (B). جـ. الدارة (C). د . الدارة (D).

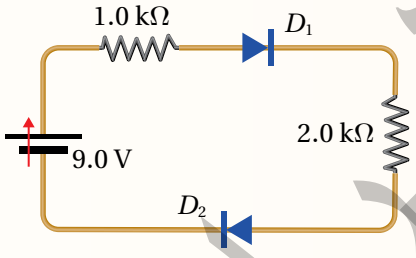
3. يبيّن الشكل المجاور العلاقة البيانية ($I-V$) بين التيار الذي يسري في ثنائي وفَرْق الجهد بين طرفيه. أكبر قيمة لمقاومة الثنائي تكون عند النقطة:



أ . a ب. b

جـ. c د . d

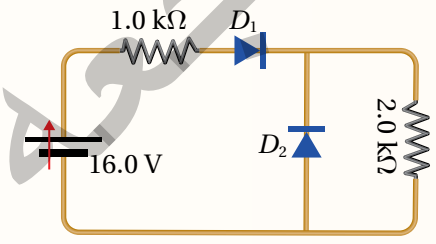
4. تتصل بطارية مثالية بثنائيين من الجرمانيوم ومقاومتين على التوالي كما هو مُبيَّن في الشكل المجاور، مُعتمِدًا على بيانات الشكل، فإنَّ التيار الذي يسري في الدارة بوَحْدة ملي أمبير (mA) يساوي:



أ . 3.0 ب. 2.8

جـ. 2.5 د . 0.2

5. يبيِّن الشكل المجاور دارة كهربائية تتكون من بطارية مثالية وثنائيين من السليكون ومقاومتين، مُعتمِدًا على بيانات الشكل، فإنَّ التيار الذي يسري في المقاومة (2 kΩ) بوَحْدة ملي أمبير (mA) يساوي:



أ . 5.1 ب. 15

جـ. 4.9 د . 0.23

قيد الإعداد والمراجعة

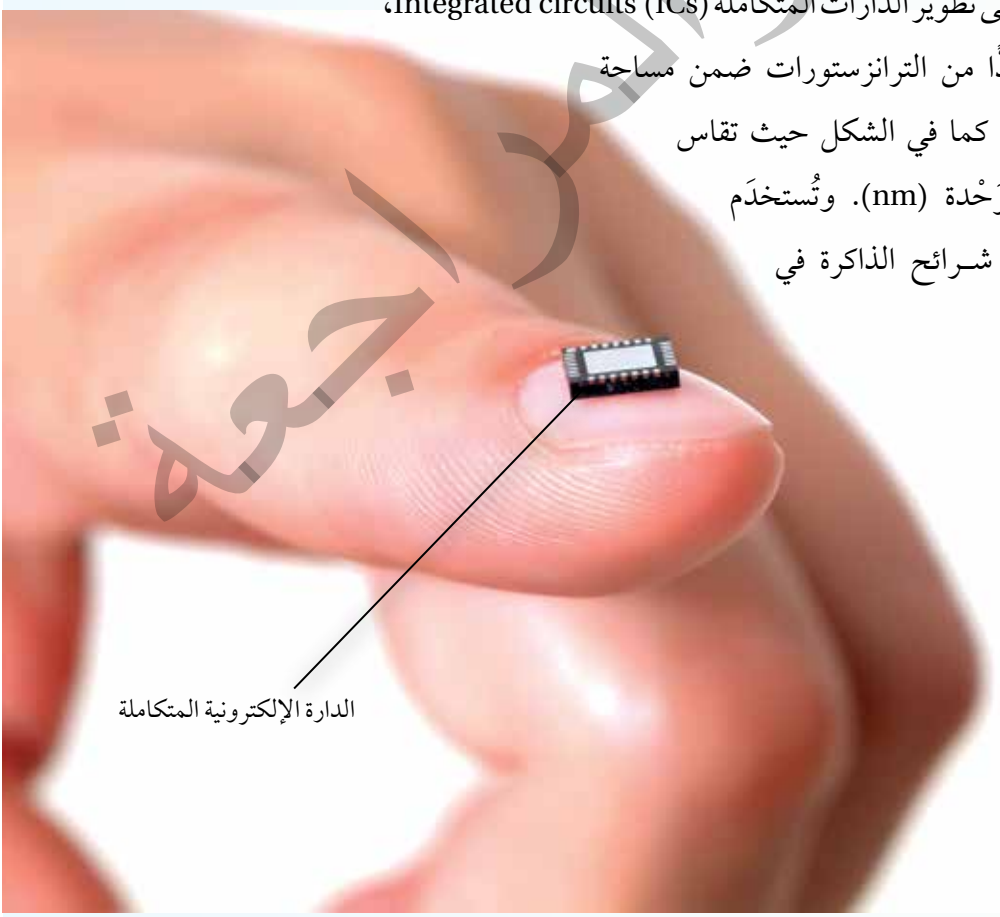
تطوُّر الدارات الإلكترونية

الترانزستور Transistor هو أحد أهم عناصر الدارات الإلكترونية، ويدخل في تركيب الأجهزة الإلكترونية كلها، فالهاتف النقّال يحتوي مئات الآلاف من الترانزستورات، وكذلك الحاسوب وغيرهما من الأجهزة الإلكترونية.

يُصنَع الترانزستور من موادَّ شبه موصلة، مثل السليكون أو الجرمانيوم، وهو يشبه بذلك الثنائي البلوري، إلا أنَّه يتكون من ثلاث طبقات. لقد أحدث اختراع الترانزستور ثورة في الإلكترونيات، حيث أمكن عن طريقه إيجاد أجهزة صغيرة جدًّا وأكثر دقة في أدائها. إذ كانت الدارات الإلكترونية تؤدي وظائفها باحتوائها الصمّامات الثنائية والثلاثية، عوضًا عن الثنائي والترانزستور. لكنّ الصمّام كان كبير الحجم كما في الشكل، ويولّد حرارة ما يستدعي تبريدها للتخلص من الحرارة التي تؤثر سلبا في عملها.

تُستخدَم الترانزستورات مفاتيح كهربائية مثالية؛ لأنّها تُشغَّل وتوقف التشغيل بسرعة، وهذا يجعلها مثالية للدارات الرَّقْمية، وتُستخدَم الترانزستورات في تضخيم التيار أو الجهد الكهربائي، فكانت بدايات استخدامه للتضخيم في الأجهزة السمعية المحمولة مثل المذياع، ثم استخدامه في الأنظمة والآلات الموسيقية وغيرها.

أدّى تطوير الترانزستور وتصغير حجمه إلى تطوير الدارات المتكاملة Integrated circuits (ICs)، حيث تَجْمَع الواحدة منها عددًا كبيرًا جدًّا من الترانزستورات ضمن مساحة صغيرة لا تتجاوز أبعادها بضعة مليمترات كما في الشكل حيث تقاس أبعاد الترانزستور الواحد في الشريحة بوَحْدة (nm). وتُستخدَم الترانزستورات والدارات المتكاملة في شرائح الذاكرة في أجهزة الحاسوب.



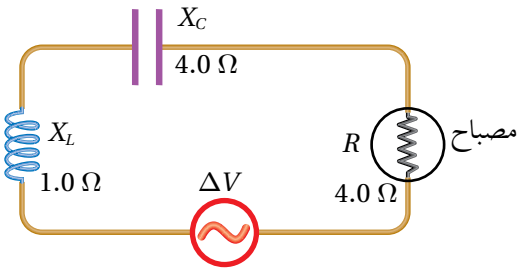
قيد إعداد المراجعة

1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكلّ جملة ممّا يأتي:

1. يدور مِلفّ مولِّد كهربائي بتردُّد (60 Hz) فيزوِّدنا بفرق جهد متردّد. إذا كان فَرْق الجهد يساوي $(8\sqrt{2}\,\text{V})$ عند اللحظة $(t = \frac{1}{480}\,\text{s})$، فإنّ القيمة العظمى لفرق الجهد بوَحْدة فولت (V) تساوي:

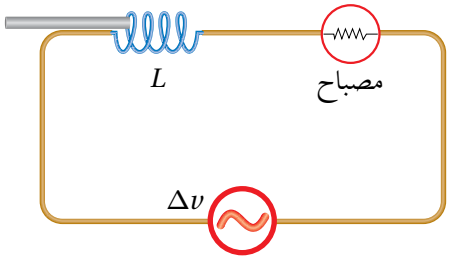
أ. 16 ب. 24 جـ. 32 د. 48

2. دارة كهربائية يتصل فيها مصباح مقاومته R ومحثّ ومواسع بمصدر فَرْق جهد متردّد كما في الشكل، فيسري فيها تيار فعّال (2.0 A). إذا زاد تردُّد مصدر فَرْق الجهد إلى مثلَي ما كان عليه، فإنّ التيار الفعّال في الدارة بوَحْدة أمبير (A) يصبح:



أ. 1.0 ب. 2.5 جـ. 4.0 د. 7.9

3. في الدارة المبينة في الشكل، في أثناء إدخال قضيب من الحديد داخل المحث فإن ما يحدث لكل من محاثة المحث، وإضاء المصباح على الترتيب:



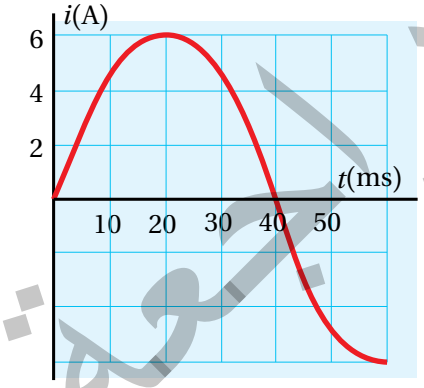
أ. تزداد، تزداد. ب. تقل، تزداد.

جـ. تزداد، تقل. د. تقل، تقل.

4. يمكن التعبير عن نسبة المعاوقة المحثّية إلى المعاوقة المواسعية في دارات التيار المتردّد بإحدى العلاقات الآتية:

أ. $\omega^2 LC$ ب. $\frac{\omega^2}{LC}$ جـ. $\frac{LC}{\omega^2}$ د. $\frac{L}{\omega^2 C}$

5. الشكل البيانيّ المجاور يمثّل تغيّر التيار المتردّد بالنسبة إلى الزمن، إنّ التيار اللحظي يُعبَّر عنه بإحدى العلاقات الآتية:



أ. $i = 6 \sin 40\, t$ ب. $i = 6 \sin 40\, \pi t$

جـ. $i = 6 \sin 12.5\, \pi t$ د. $i = 6 \sin 25\, \pi t$

6. يُعبَّر عن فَرْق الجهد المتردّد بالعلاقة $(\Delta v = V_{max} \sin 3\, \pi t)$. عند أيّ لحظة زمنية تكون القيمة اللحظيّة لفرق الجهد المتردّد مساوية لنصف قيمته العظمى؟

أ. $\frac{1}{18}$ s ب. $\frac{2}{18}$ s جـ. $\frac{3}{18}$ s د. $\frac{6}{18}$ s

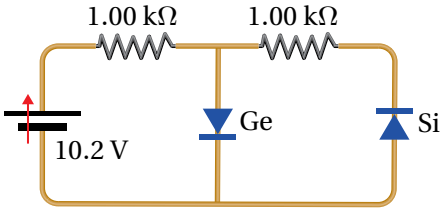
7. دارة (AC) تتصل فيها مقاومة (4.8 Ω) على التوالي مع محثّ محاثّته (40 mH) ومواسع ومصدر فَرْق جهد متردّد قيمته الفعّالة (24 V) وتردُّده الزاوي (400 rad/s). مقدار المواسعة بوَحْدة (μF) التي تجعل التيار الفعّال في الدارة (2.0 A) ممّا يأتي هو:

أ. 5.0×10^{2} ب. 5.0×10^{1} جـ. 5.0 د. 5.0×10^{-2}

8. ما مقدار مقاومة متصلة بمصدر فَرْق جهد متردّد قيمته العظمى (69 V)، عندما يسري فيها تيار متردّد قيمته الفعّالة (3.5 A)؟

أ. 7 Ω ب. 14 Ω جـ. 20 Ω د. 28 Ω

9. في الدارة المبينة في الشكل المجاور، إذا كان أحد الثنائيين جرمانيوم والثاني سليكون، فإنَّ التيار الكلّي الذي يسري في الدارة بوَحْدة ملي أمبير (mA) يساوي:



أ. 9.50 ب. 9.90 جـ. 10.2 د. 10.5

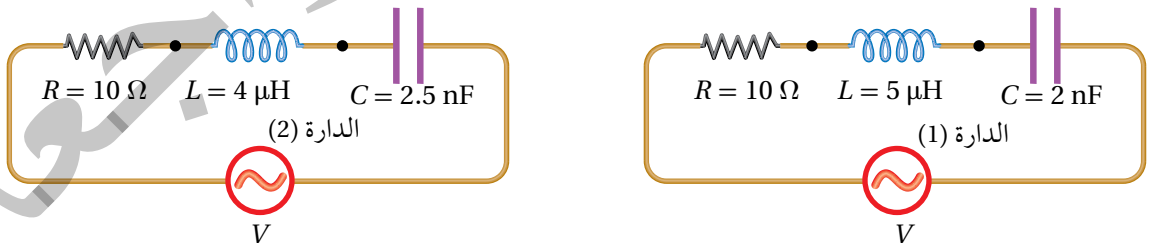
10. محول كهربائي مثالي خافض للجهد، عدد لفات ملفه الابتدائي (600) لفة، وعدد لفات ملفه الثانوي (200) لفة. إذا علمت أن فرق الجهد بين طرفي ملفه الثانوي (3.0 V) ويتصل بمقاومة تستهلك قدرة كهربائية (18 W)، فإن مقدار التيار في الملف الابتدائي بوحدة أمبير (A) يساوي:

أ. 18 ب. 6.0 جـ. 2.0 د. 0.5

11. في المحول الرافع للجهد المثالي، الكمية التي تكون في الملف الثانوي أقل من الملف الابتدائي:

أ. عدد اللفات. ب. التيار الكهربائي. جـ. التدفق المغناطيسي. د. القدرة الكهربائية.

12. يبين الشكل المجاور دارتا ($R\,L\,C$) تتصلان بمصدري فرق جهد متردد متماثلين، ترددهما الزاوي (1×10^{7} rad/s). الجملة الصحيحة التي تصف حالة الرنين للدارتين:



أ. الدارتان في حالة رنين، إلا أن التيار الفعال في الدارة (1) أكبر من الدارة (2).

ب. الدارة (1) فقط في حالة رنين؛ لأن تردد المصدر يتفق مع التردد الطبيعي لهذه الدارة.

جـ. الدارتان في حالة رنين ويمر فيهما التيار الفعال نفسه.

د. الدارتان ليستا في حالة رنين؛ لأن تردد المصدر لا يتفق مع التردد الطبيعي لأي منهما.

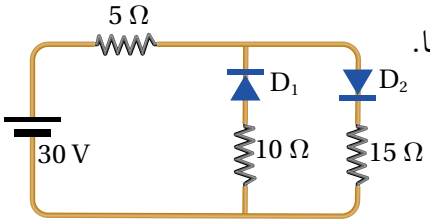
فريق إعداد المراجعة

13. دارة تتكون من مقاومة (40.0 Ω) وصلت مع مصدر فرق جهد متردد. إذا علمت ان الزمن الدوري لمصدر فرق الجهد ($\frac{1}{60.0}$ s)، والقدرة الكهربائية المتوسطة المستهلكة في المقاومة (1210 W) فإن الاقتران الذي يعبر فرق الجهد المتردد بين طرفي المقاومة بدلالة الزمن هو:

أ . $\Delta v_R = 220 \sin (60\ \pi t)$ ب. $\Delta v_R = 220 \sin (120\ \pi t)$

جـ. $\Delta v_R = 311 \sin (60\ \pi t)$ د . $\Delta v_R = 311 \sin (120\ \pi t)$

14. في الدارة المبينة في الشكل المجاور الثنائيان مصنوعان من المادة نفسها. عند عكس أقطاب البطارية فإن التيار المار في المقاومة (5 Ω):

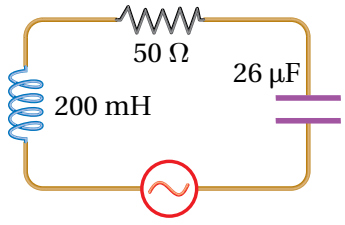


أ . يزداد. ب. لا يتغير.

جـ. يقل. د. يصبح صفرًا.

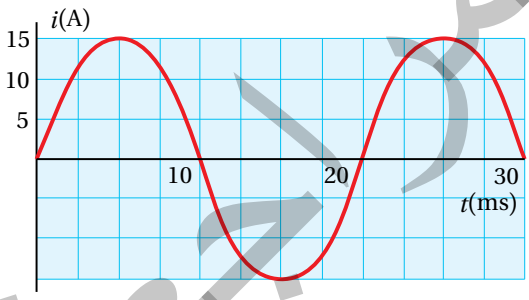
2. **أمثّل البيانات:** القيمة الفعّالة لفرق الجهد الكهربائي المتردّد في الأردن (230 V)، وتردّده (50 Hz). أُمثّل فَرْق الجهد المتردّد بمنحنى بيانيّ، مُبيِّنًا عليه تدريج الزمن والقيمة العظمى لفرق الجهد.

3. **أستخدم الأرقام:** دارة (*RLC*) تحتوي مقاومة ومحثًّا ومواسعًا مبيَّنة قيمها في الشكل المجاور، تتصل بمصدر فَرْق جهد متردّد قيمته العظمى (210 V)، وتردّده (50 Hz). أحسب القيمة العظمى للتيار المتردّد.



4. **أستنتج:** تحتوي دارة استقبال في جهاز مذياع مقاومة (120 Ω)، ومحثًّا محاثّته (0.20 mH)، ومواسعًا متغيّر المواسعة. يمكن ضبط الدارة لكي تستقبل موجات بتردّدات مختلفة، عن طريق إحداث الرنين. أحدّد مجال القيم التي تتغيّر بينها مواسعة المواسع لاستقبال مدى التردّدات (550 kHz–1650 kHz).

5. **أستخدم البيانات:** أجد ما يأتي، مُعتمِدًا على العلاقة البيانيّة المجاورة لتغيّر التيار الذي يسري في دارة (AC) تحتوي مقاومة فقط مقدارها (40 Ω):



أ . القيمتين العظمى والفعّالة للتيار.

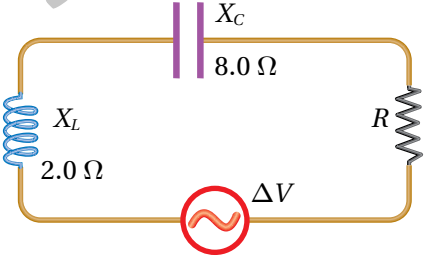
ب. التردّد الزاويّ للتيار.

جـ. القيمة الفعّالة لفرق الجهد.

د . القدرة الكهربائية المتوسطة المستهلكة في المقاومة.

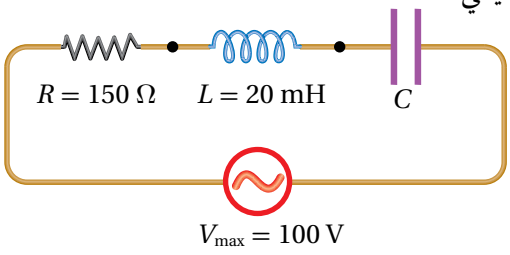
6. **أستخدم الأرقام:** تتكون دارة (*RLC*) من مواسع مواسعته (5.1 μF) ومحث محاثته (50 mH) ومقاومة (24 Ω) وأميتر ومصدر فَرْق جهد قيمته العظمى (178 V) وتردُّده الزاوي (1400 rad/s) أحسب قراءة الأميتر.

7. **أستخدم الأرقام:** يبين الشكل المجاور دارة تتصل فيها مقاومة (*R*) ومحث ومواسع بمصدر فرق جهد متردد قيمته الفعالة (20 V)، فيسري فيها تيار قيمته الفعالة (2 A). إذا ازداد التردد الزاوي لمصدر فرق الجهد إلى أربعة أمثالة، فكم تصبح القيمة الفعالة للتيار في الدارة؟



قيد الإعداد والمراجعة

8. **أستخدم الأرقام:** يبين الشكل دارة (RLC) تتصل مع مصدر فرق جهد متردد تردده الزاوي (5000 rad/s)، معتمدا على القيم المثبتة في الشكل، إذا علمت أن الدارة في حالة رنين مع المصدر أحسب ما ياتي:

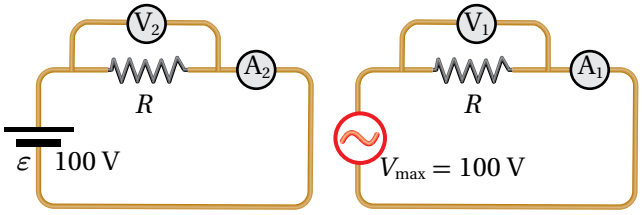


أ . مواسعة المواسع.

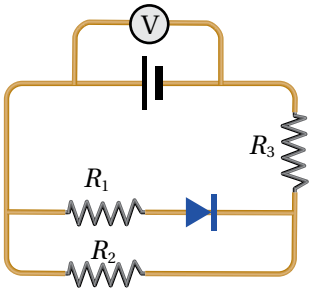
ب. المعاوقة الكلية للدارة.

جـ. التيار الفعال المار في الدارة.

9. **أقارن:** يبين الشكل المجاور دارة تيار متردد، وأخرى للتيار المستمر، معتمدا على القيم المثبتة في الشكل، وإذا علمت أن البطارية مثالية وقيمة المقاومة (R) متساوية في الدارتين، أقارن بين قراءتي كل من الأميتر والفولتميتر في الدارتين، موضحا إجابتي.



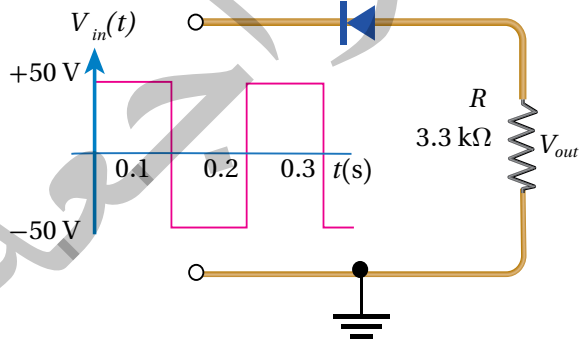
10. **أستنتج:** في الدارة المبينة في الشكل المجاور، المقاومة الداخلية للبطارية مهملة، وقراءة الفولتميتر (6 V)، والمقاومات الثلاثة متساوية، وبإهمال فرق الجهد بين طرفي الثنائي عندما يكون في حالة انحياز أمامي، أجيب عن السؤالين الآتيين:



أ . ما نسبة فرق الجهد للمقاومة (R_2) إلى فرق جهد المقاومة (R_3)؛ ($\frac{V_2}{V_3}$)؟

ب. عند عكس أقطاب البطارية ما نسبة فرق الجهد للمقاومة (R_2) إلى فرق جهد المقاومة (R_3)؛ ($\frac{V_2}{V_3}$)؟

11. **أستنتج:** اعتمادًا على البيانات الموضّحة على الشكل المجاور وبافتراض أن الثنائي مثاليّ:



أ . أمثّل بيانيًّا الإشارة الخارجة (V_{out}) بالنسبة إلى الزمن.

ب. إذا استخدمت مصباحًا بدلًا من المقاومة، أجد عدد المرات التي سيضيء فيها المصباح في الثانية الواحدة.

قيد الإعداد والمراجعة

الوَحْدة 7

الفيزياء الحديثة

Modern Physics

أتأمّلُ الصورةَ

الفيزياء والطاقة

تحوّل الخلايا الشمسيّة الطاقة الشمسيّة إلى طاقة كهربائيّة. والشكل أعلاه يبيّن محطة شمس معان للطاقة الشمسية، التي أُنشئت في مدينة معان عام 2016، وهي من أكبر مشروعات الطاقة الشمسية في الأردن، واستُخدم في تصميمها 600 ألف لوح من الخلايا الشمسية.

هل توجد شروط يجب توافرها في المناطق التي تُبنى فيها محطات الطاقة الشمسية؟ وما القوانين الفيزيائية التي ترتبط بهذه التكنولوجيا؟

الفكرةُ العامةُ:

شهدت الفترة بين 1900–1930 ثورة في علم الفيزياء، أدت إلى بزوغ نظرية جديدة تُعرف «بميكانيكا الكم»، حققت نجاحا كبيرا في تفسير ظواهر فيزيائية، ترتبط بسلوك المادة على المستوى دون الجاهري.

الدرسُ الأولُ: الطبيعة الجُسيميّة للضوء

Particle Nature of Light

الفكـرةُ الرئيسـةُ: للضـوء طبيعـة جُسـيميّة إضافـة إلى طبيعتـه الموجيّة، وفهمنـا الطبيعة الجُسـيميّة للضـوء مكّننا من فهـم الظواهر المتعلّقـة بالجُسـيمات الذرّيّـة ودون الذرّيّـة (دون الجاهريّـة) فهمًـا أعمق.

الدرسُ الثاني: التركيب الذرّي

Atomic Structure

الفكـرةُ الرئيسـةُ: تتكـوّن الـذّرّة مـن نـواة موجبة الشـحنة، تتحرّك حولها إلكترونات سـالبة الشـحنة، تحتـلّ مسـتويات طاقة غير متّصلـة (مُكمّاة)، وفَهْمنا هـذا التركيب أدّى إلى تطويـر تكنولوجيا متطوّرة أسـهمت في تسـهيل سـبل الحيـاة، واكتشـافات علميّـة جديدة.

تجربة استهلالية

العلاقة بين درجة حرارة الجسم والاشعاع الصادر عنه

الموادُّ والأدواتُ: موقد بنسن، سلك فلزّي، ملقط، قُفّازان سميكان، نظّارة واقية للعينين.

إرشاداتُ السلامةِ: ارتداء القفازين واستخدام النظارات الواقية للعينين، وتوخّي الحذر عند استخدام الغاز وموقد بنسن.

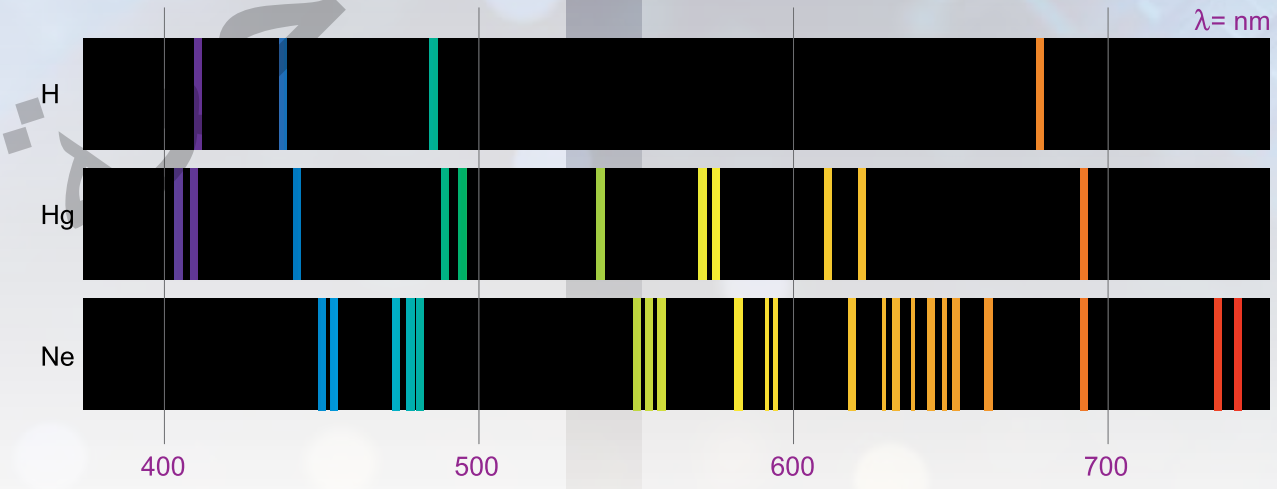
خطواتُ العملِ:

أُنفِّذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

1. أُشعِل موقد بنسن بمساعدة معلّمي/ معلّمتي، وأحمل السلك الفلزّي بالملقط، ثمّ أضعه فوق الموقد.
2. **ألاحظ** لون الوهج الصادر عن السلك في أثناء تسخينه، واستمر بالتسخين حتى أحصل على وهج لونه أبيض.
3. أُدوِّن لون الوهج الصادر عن السلك مع مرور الزمن حتى الحصول على وهج لونه أبيض.

التحليل والاستنتاجُ:

1. ما ألوان الوهج الصادرة عن السلك التي شاهدتها؟
2. **أستنتج:** لماذا تغيّر لون الوهج مع مرور الزمن؟ وهل لذلك علاقة بدرجة حرارة الجسم؟



قيد الإعداد والمراجعة

الطبيعة الجُسيميّة للضوء
Particle Nature of Light

الدرسُ 1

الفكرةُ الرئيسةُ:

للضوء طبيعة جُسيميّة إضافة إلى طبيعته الموجيّة، وفَهْمنا الطبيعة الجُسيميّة للضوء مكّننا من فهم الظواهر المتعلقة بالجُسيمات الذرّيّة ودون الذرّيّة (دون الجاهريّة) فَهْمًا أعمق.

نتاجاتُ التعلّم:

- أصف إشعاع الجسم الأسود.
- أستخدم فرضية بلانك في تفسير إشعاع الجسم الأسود.
- أشرح الظاهرة الكهرضوئيّة.
- أفسّر العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة من سطح الفلز وتردُّد الضوء الساقط عليه.
- أشرح ظاهرة كومبتون.
- أحلّ مسائل حسابية على الظاهرة الكهرضوئية وظاهرة كومبتون.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

الجسم الأسود	Blackbody
الظاهرة الكهرضوئية	Photoelectric Effect
الإلكترونات الضوئية	Photoelectrons
جهد الإيقاف	Stopping Potential
تردّد العتبة	Threshold Frequency
اقتران الشغل للفلز	Work Function

الحاجة إلى الفيزياء الحديثة The Need for Modern Physics

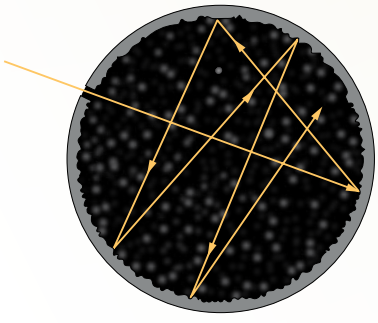
تطوّر علم الفيزياء الكلاسيكيّة على يد كثيرٍ من العلماء، مثل غاليليو Galileo الذي اهتمّ بدراسة الأجسام الساكنة والمتحركة، ونيوتن Newton الذي وضع ثلاثة قوانين في الحركة، وهذا ما درسته في صفوف سابقة. وتُعدّ النظريّة الكهرمغناطيسيّة من مجالات الفيزياء الكلاسيكيّة المهمّة، طوّرها العالم الإنجليزي ماكسويل Maxwell، وتصف الضوء بأنّه موجات كهرمغناطيسيّة، ونجحت هذه النظرية في تفسير كثيرٍ من الظواهر المتعلقة بالضوء كالحيود، والتداخل، والانعكاس، والانكسار.

لكن، في بدايات القرن العشرين، اكتُشفت ظواهر فيزيائية جديدة لم تستطع الفيزياء الكلاسيكية تفسيرها، مثل إشعاع الجسم الأسود، والظاهرة الكهرضوئيّة، وظاهرة كومبتون، وتركيب الذرات والأطياف الخطّيّة المنبعثة عنها، التي سأدرسها لاحقًا في هذه الوَحْدة. إنّ الحاجة إلى تفسير هذه الظواهر أدّت إلى نشوء علم الفيزياء الحديثة، ويندرج تحتها علم فيزياء الكمّ الذي يُعنى بدراسة أنظمة الجُسيمات الذرّيّة ودون الذرّيّة (دون الجاهريّة) ضمن مجالات منها؛ الفيزياء الذرية والفيزياء النووية وفيزياء أشباه الموصلات.

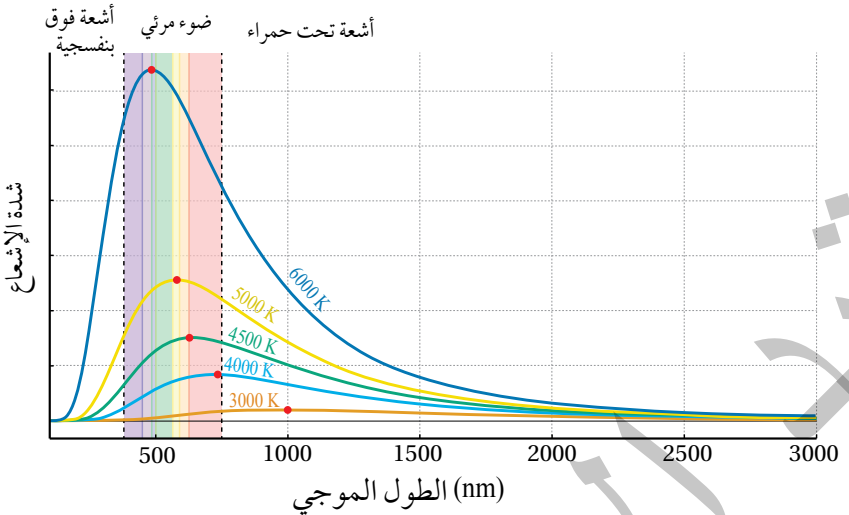
إشعاع الجسم الأسود Blackbody Radiation

عند درجات حرارة أكبر من الصفر المطلق تُشعّ الأجسام طاقة على شكل أشعة كهرمغناطيسيّة، ويعتمد إشعاع جسم للطاقة على درجة حرارته وطبيعة سطحه. وقد لاحظتُ في التجربة الاستهلاليّة أنّ لون توهُّج السلك تغير مع ارتفاع درجة حرارته، بدءًا من اللون الأحمر مرورًا بالأصفر وانتهاءً باللون الأبيض.

لفهم الإشعاع الحراريّ المُنبعث من جسم، طوَّر العلماء مفهوم **الجسم الأسود Blackbody** وهو جسم مثاليّ يمتصّ الأشعة الكهرمغناطيسية الساقطة عليه كلها بغضّ النظر عن تردّداتها، ويُشّعها كلها بالكفاءة نفسها، ويعتمد انبعاث الأشعة منه على درجة حرارته فقط. وأُطلق عليه اسم الجسم الأسود؛ لأنّ الجسم الذي يمتص الأشعة الساقطة عليه جميعها يكون لونه أسود. والشكل (1) يوضّح تصوّرًا للجسم الأسود بأنّه ثقب صغير في جسم أجوف، والأشعة التي تدخل الجسم من خلال الثقب تُمتصّ امتصاصًا كاملًا.



الشكل (1): الجسم الأسود يمتص الأشعة الساقطة عليه كلّها.



الشكل (2): منحنى إشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة. يبين الشكل منطقة الأشعة تحت الحمراء، ومنطقة الضوء المرئي، ومنطقة الأشعة فوق البنفسجية.

تعرف شدة الإشعاع بأنها الطاقة التي يشعها الجسم في الثانية الواحدة لكل وحدة مساحة عند طول موجي معين. ويوضح الشكل (2) منحنى اشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة. من المنحنى نستنتج الأمور الآتية:

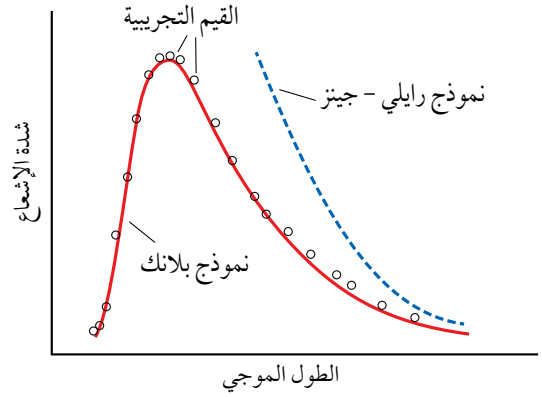
- عند درجة (3000 K) معظم الاشعاع المنبعث من الجسم يقع في منطقة الأشعة تحت الحمراء، وبزيادة درجة الحرارة تصدر عن الجسم اشعاعات في مناطق الأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي، والأشعة فوق البنفسجية.
- بزيادة درجة الحرارة تنزاح قمة منحنى شدة الإشعاع نحو الأطوال الموجية القصيرة (الترددات العالية)، وعند درجة (6000 K) تكون قمة المنحنى في منطقة الضوء المرئي.
- المساحة تحت المنحنى تمثل الطاقة الكلية المنبعثة من سطح الجسم في الثانية الواحدة لكل وحدة مساحة.

استخدم العالِمان رايلي وجينز Rayleigh and Jeans الفيزياء الكلاسيكية في تفسير منحنى إشعاع الجسم الأسود، حيث ترتكز الفيزياء الكلاسيكية على أنّ الأجسام تُشعّ الطاقة، وتمتصّها بأيّ مقدار وعند أيّ تردّد؛ أيْ أنّ امتصاص الطاقة وإشعاعها يكون مُتصِلًا Continuous. وقد أظهر نموذج رايلي- جينز توافقًا مقبولًا مع النتائج التجريبيّة في منطقة الأطوال الموجيّة الكبيرة (الأشعة تحت الحمراء)، في حين أظهر عدم توافق في منطقة الأطوال الموجيّة القصيرة (الأشعة فوق البنفسجية) كما في الشكل (3)، حيث تؤول شدة الإشعاع بحسب نموذج رايلي-جينز إلى اللانهاية عندما يؤول طوله الموجي إلى الصفر، في حين تشير النتائج التجريبية بأنها (شدة الإشعاع) تؤول إلى الصفر، وهذا ما عُرف في تاريخ الفيزياء باسم **كارثة الأشعة فوق البنفسجية** Ultraviolet catastrophe. فلو كان تفسير رايلي-جينز صحيحًا، لتوهَّجَ السلك في التجربة الاستهلالية باللون الأزرق بدلًا من اللون الأبيض عند درجات الحرارة المرتفعة.

الربط بعلوم الفضاء

درجة حرارة سطح الشمس تصل إلى 6000 K تقريبًا، حيث إنّ الشمس تشعّ طاقة في مناطق الطيف الكهرمغناطيسي كلها، ولكن أكبر قيمة لشدة إشعاع الشمس تقع في منطقة الضوء المرئيّ كما في الشكل (2). المساحة تحت المنحنى تمثّل الطاقة الكلية المشعّة في الثانية الواحدة لكل وَحْدة مساحة؛ لذا فإنّ الشمس تشعّ 40% تقريبًا من الطاقة في منطقة الضوء المرئي.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (3): مقارنة نموذج رايلي–جينز ونموذج بلانك بالنتائج التجريبية لإشعاع الجسم الأسود.

تفسير ماكس بلانك لإشعاع الجسم الأسود: تكمية الطاقة

Planck's Interpretation of Blackbody Radiation: Energy Quantization

✓ **أتحقّق:** في أيّ مناطق الطيف الكهرمغناطيسي نجح نموذج رايلي–جينز في تفسير إشعاع الجسم الأسود؟

عام 1900 تمكّن العالم ماكس بلانك Max Planck من وَضْع صيغة رياضيّة تصف شدّة الإشعاع المنبعِث من الجسم الأسود، وتطابقت حساباته مع النتائج التجريبية تمامًا كما في الشكل (3). افترض بلانك أنّ الأشعة الصادرة عن الأجسام ناتجة من مُتذبذِبات Oscillators (الإلكترونات في الذرات مثلًا)، وأنّ هذه المتذبذِبات تشعّ الطاقة أو تمتصّها بكميات محدّدة وغير متصلة، وهذا يخالف تمامًا الفيزياء الكلاسيكية التي تفترض أنّ تلك المتذبذِبات تشعّ الطاقة أو تمتصّها بأيّ مقدار؛ أيْ على نحوٍ متّصل.

أفكّر: في التجربة الاستهلاليّة، مع زيادة درجة حرارة السلك بدأ يشعّ باللون الأحمر، ثم الأصفر، ثم الأبيض. فلماذا تغيّر لون التوهّج إلى الأبيض؟

وَفْقًا لفرضية بلانك، فإنّ الطاقة التي تشعّها الأجسام أو تمتصّها عند تردُّد معيّن تكون عددًا صحيحًا من مضاعفات طاقة الحزمة (الكمة) الواحدة، وطاقة الكمة الواحدة يُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$E = hf$$

حيث h ثابت بلانك وقيمته $(6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s})$، و f تردُّد الموجة. وعند تردُّد معيّن، فإنّ طاقة الأشعة الكهرمغناطيسية التي يشعّها جسم أو يمتصها يُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$E_n = nhf$$

حيث n عدد صحيح موجب. وبذلك، فإنّ طاقة الأشعة الصادرة عن جسم عند التردّد f يمكن أن تأخذ قيمًا غير متصلة، مثل:

$$hf, 2hf, 3hf, 4hf, \ldots$$

وهذا ما يعرف بمبدأ تكمية الطاقة Energy quantization.

لم يكن من السهل حينئذٍ قَبول مبدأ تكمية الطاقة بحَسَب فرضية بلانك، ولكن صحّة هذه الفرضية ترسّخت بنجاح العالم أينشتين Einstein عام 1905 في تفسير الظاهرة الكهرضوئية، مُعتمِدًا على فرضية بلانك في تكمية الإشعاع الكهرمغناطيسي، وأصبحت نقطةً مهمّة في انطلاق ما يُعرف في وقتنا الحالي بفيزياء الكمّ.

✓ **أتحقّق:** أذكر فرضيّة ماكس بلانك في تكمية الطاقة.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 1

جسم ساخن بدرجة حرارة معينة، ومعظم الأشعة الصادرة عنه تردّدها يساوي ($f = 1.00 \times 10^{15}$ Hz)، أجد طاقة الكمة الواحدة من الإشعاع عند هذا التردّد.

المُعطيات: $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s, $f = 1.00 \times 10^{15}$ Hz

المطلوب: $E = ?$

الحلّ:

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 1.00 \times 10^{15} = 6.63 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ومن الجدير بالذكر أنّ وَحْدة قياس الطاقة المستخدمة في الفيزياء الذريّة هي **الإلكترون فولت (eV) Electronvolt.** والإلكترون فولت هو الطاقة التي يكتسبها إلكترون عند تسريعه بفرق جهد مقداره (1V)، حيث

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

وبذلك تصبح طاقة الكمة الواحدة تساوي:

$$E = 6.63 \times 10^{-19} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 4.1 \text{ eV}$$

المثال 2

أجد طاقة كمة أشعّة سينيّة تردّدها (4.20×10^{18} Hz).

المُعطيات: $f = 4.20 \times 10^{18}$ Hz, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s

المطلوب: $E = ?$

الحلّ:

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 4.20 \times 10^{18}$$

$$= 2.78 \times 10^{-15} \text{ J} = 2.78 \times 10^{-15} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 17 \text{ keV}$$

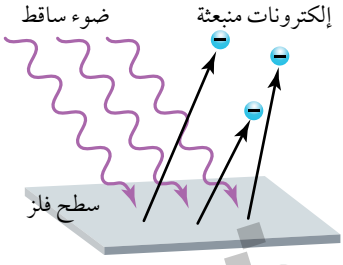
تفكير

أستخدم الأرقام: مصدر أشعة تحت حمراء طولها الموجي (700nm). إذا كان عدد الفوتونات المنبعثة من المصدر في الثانية الواحدة (1.41×10^{21}) فوتون ، أحسب الطاقة الكلية الصادرة عن المصدر في الثانية.

قيد الإعداد والمراجعة

الظاهرة الكهرضوئيّة Photoelectric Effect

لاحظ العالم هيرتز Hertz في تجاربه عام 1887م أنّ الشرارة الكهربائية تحدث على نحوٍ أسرع في جهاز الإرسال الخاص به عند تعريضه لأشعة فوق بنفسجية. تبيّن في ما بعد أنّ سبب ذلك هو انبعاث إلكترونات من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردّد مناسب عليه كما في الشكل (4)، وسُمّيت هذه الظاهرة **بالظاهرة الكهرضوئيّة Photoelectric effect** وتُسمّى الإلكترونات المنبعِثة **الإلكترونات الضوئيّة Photoelectrons** ولكي أتعرّف الظاهرة الكهرضوئية على نحوٍ أكثر، أُنفّذ التجربة الآتية:



الشكل (4): انبعاث إلكترونات من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع بتردّد مناسب على سطحه.

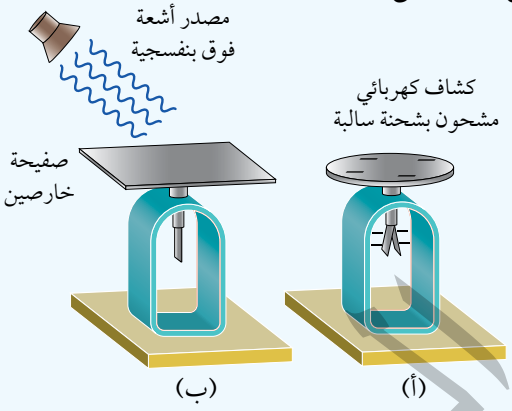
التجربة 1 الظاهرة الكهرضوئيّة

المواد والأدوات: صفيحة خارصين، كشاف كهربائي، مصدر أشعة فوق بنفسجية، مصدرا ضوء أحمر، قضيب من الزجاج، قطعة من الحرير، ورق صنفرة، نظارة واقية، قُفّازان.

إرشادات السلامة: ارتداء المعطف واستخدام النظارة الواقية للعينين والقُفّازين.

خطوات العمل:

أُنفّذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

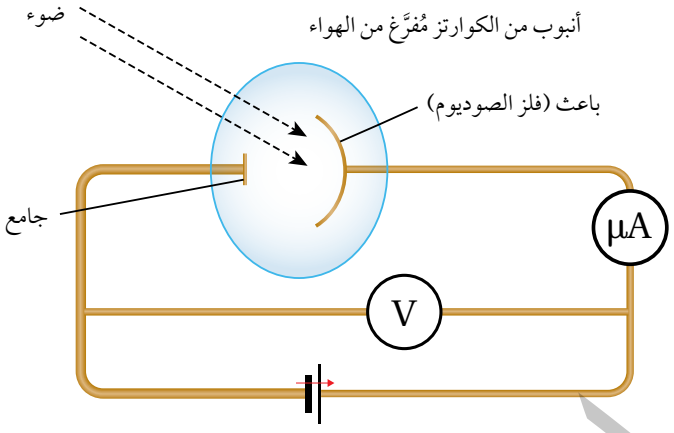


1. أصقل صفيحة الخارصين بورق الصنفرة.
2. **ألاحظ:** أشحن الكشاف الكهربائي بالحثّ مُستخدِمًا قضيبَ زجاجٍ دُلِك بقطعة من الحرير، ثم أُلاحظ انفراج ورقتي الكشاف الكهربائي كما في الشكل (أ).
3. أضع صفيحة الخارصين فوق قرص الكشاف الكهربائي كما في الشكل (ب).
4. **ألاحظ:** أُسلّط الضوء الأحمر على صفيحة الخارصين، وأراقبُ ما يحدث لورقتي الكشاف الكهربائي.
5. **ألاحظ:** أُسلّط كميّة أكبر من الضوء الأحمر (باستخدام المصدر الإضافي للضوء الأحمر) على صفيحة الخارصين، وأراقب ما يحدث لورقتي الكشاف الكهربائي.
6. أُعيد الخطوة (4) باستخدام الأشعة فوق البنفسجية.

التحليل والاستنتاج:

1. **أتوقع:** هل تغير انفراج ورقتي الكشاف عند استخدام مصدر الضوء الأحمر؟ماذا أستنتج من ذلك؟
2. **أصف** ما حدث لورقتي الكشاف عند استخدام مصدر الأشعة فوق البنفسجية.
3. أبحث عن تردُّد الأشعة فوق البنفسجية وتردُّد الضوء الأحمر، باستخدام مصادر التعلّم المختلفة الموثوق بها.
4. **أفسر:** لماذا لم يقلّ انفراج ورقتي الكشاف عند سقوط الضوء الأحمر، حتى عند زيادة شدّته؟
5. **أفسر:** لماذا قلّ انفراج ورقتي الكشاف عند استخدام الأشعة فوق البنفسجية؟

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (5): تجربة لينارد للظاهرة الكهرضوئية.

أُلاحظ من التجربة السابقة أنّه عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية على صفيحة الخارصين قلّ انفراج ورقتي الكشاف، وهذا ما يدلّ على تفريغ شحنة الكشاف السالبة، ويعود ذلك إلى تحرُّر إلكترونات من سطح الخارصين عند امتصاصها طاقةً من الأشعة فوق البنفسجية، أتأمّل الشكل (ب) في التجربة.

الشكل (5) يبيّن رسمًا تخطيطيًّا لجهازٍ استخدمه العالم لينارد Lenard لإجراء كثيرٍ من التجارب الخاصّة بالظاهرة الكهرضوئية، ويتكوّن من أنبوب من زجاج الكوارتز مُفرَّغ من الهواء؛ تجنّبًا لفقد الإلكتروناتِ طاقةً حركيّةً نتيجة تصادمها بجُسيمات الهواء. ويحتوي الجهاز أيضًا قطبين فلزّيّين، أحدهما مصنوع من فلزّ الصوديوم يُسمّى الباعث، موصول بالقطب الموجب لمصدر فَرْق جهد قابل للضبط، والآخر يُطلق عليه اسم الجامع يتصل بالقطب السالب لمصدر فَرْق الجهد. عند سقوط أشعة كهرمغناطيسية بتردّد مناسب على الباعث تتحرّر الإلكترونات من سطحه وتنطلق نحو الجامع، ويُستدلّ على ذلك من التيار الكهربائي الذي يقرؤه الميكرو أميتر والذي يُسمّى التيار الكهرضوئيّ Photocurrent.

كلّما ازدادت سالبيّة جهد الجامع، ازدادت قوّة تنافر الإلكترونات مع الجامع، فيقلّ التيار الكهرضوئي حيث لا يصل الجامع إلاّ الإلكترونات التي تمتلك طاقة حركية كافية للتغلّب على قوة التنافر الكهربائية مع الجامع. ويُسمّى فَرْق الجهد الذي يصبح عنده التيار الكهرضوئيّ صفرًا **جهد الإيقاف Stopping potential (V_s)** الذي يستطيع إيقاف الإلكترونات ذات الطاقة الحركيّة العظمى (KE_{max}) قبل وصولها إلى الجامع. ويرتبط جهد الإيقاف بالطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات بالعلاقة الآتية:

$$KE_{max} = e\,V_s$$

حيث e تساوي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون.

✓ **أتحقّق:** مستعينا بالشكل (5)، أجيب عما يأتي:

أ . ما أهمية أن يكون الأنبوب المستخدم في التجربة مفرغا من الهواء؟

ب. كيف نستدل على وصول الإلكترونات المتحررة إلى الجامع ؟

قيد الإعداد والمراجعة

وقد لاحظ لينارد المشاهدات التجريبية الآتية للظاهرة الكهرضوئية:

1. تتحرّر إلكترونات من سطح الفلزّ فقط عندما يكون تردُّد الأشعة الساقطة على سطحه أكبر من تردُّد معيَّن أو يساويه، يُسمّى **تردُّد العتبة Threshold frequency.**
2. تنبعث الإلكترونات انبعاثًا فوريًّا بمجرد سقوط الأشعة على سطح الفلزّ، عندما يكون تردد الأشعة الساقطة على الفلز أكبر من تردد العتبة أو يساويه.
3. تنبعث الإلكترونات الضوئية بطاقات حركية متفاوتة، والقيمة العظمى للطاقة الحركية (KE_{max}) للإلكترونات المنبعثة من سطح الفلزّ تتناسب طرديًّا مع تردُّد الأشعة الساقطة عليه، ولا تعتمد على شدّة الأشعة.
4. يزداد عدد الإلكترونات المنبعثة بزيادة شدّة الأشعة دون زيادة في الطاقة الحركية العظمى لهذه الإلكترونات.

في حين تتنبّأ النظرية الكهرمغناطيسية التي ترتكز على النموذج الموجيّ للضوء في ما يخص الظاهرة الكهرضوئية بما يأتي:

1. تنبعث الإلكترونات عند أيّ تردُّد للأشعة الساقطة على سطح الفلزّ، لأنّها تمتص الطاقة بأيّ مقدار وعند أيّ تردُّد، وسقوط الأشعة على سطح الفلزّ مدّة زمنيّة مناسبة سيُمكِّن الإلكترونات من امتصاص الطاقة الكافية لتحريرها من سطح الفلزّ.
2. لا تنبعث الإلكترونات الضوئية انبعاثًا فوريًّا؛ لأنّها تحتاج إلى وقت كافٍ لامتصاص الطاقة الكافية من الأشعة الساقطة على الفلزّ لتتحرّر من سطحه.
3. زيادة شدّة الأشعة تزيد من الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات الضوئية المتحرّرة، والزيادة في تردد الضوء لا ينتج عنها زيادة في الطاقة الحركية للإلكترونات المتحررة.

من الواضح أنّ التنبّؤاتِ جميعَها تخالف النتائج التجريبية، وبذلك شكّلت الظاهرة الكهرضوئية دليلاً آخرَ على عجز الفيزياء الكلاسيكيّة بنموذجها الموجيّ للضوء عن تفسير سلوك الجُسيمات دون الجاهريّة.

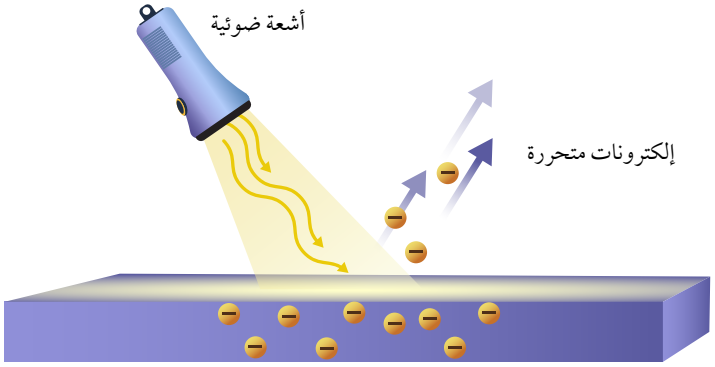
✓ **أتحقّق:** لماذا فشلت الفيزياء الكلاسيكيّة في تفسير نتائج الظاهرة الكهرضوئية؟

أفكّر: سقط ضوء على سطح فلز فتحررت منه إلكترونات، ماذا يحدث لعدد الإلكترونات المتحررة وطاقتها الحركية إذا:

أ. زادت شدة الضوء مع بقاء تردده ثابت.

ب. زاد تردد الضوء مع بقاء شدته ثابتة.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (6): تصور أينشتين للظاهرة الكهرضوئية.

تفسير أينشتين Einstein's Explanation

استخدم أينشتين فرضيّة تكمية الطاقة لبلانك لتفسير الظاهرة الكهرضوئية، وافترض أنّ طاقة الأشعة الكهرمغناطيسية مركّزة في جُسيمات أُطلِقَ على كلٍّ منها اسم فوتون، حيث طاقة الفوتون الواحد تساوي $(E = hf)$؛ أيْ أنّ للأشعة الكهرمغناطيسية طبيعة جُسيميّة إضافة إلى طبيعتها الموجيّة، وعند سقوط الفوتونات على سطح الفلز، كما يبين الشكل (6)، فإن كل إلكترون تحرر من سطح الفلز يكون قد امتص فوتونا واحدا؛ فالفوتون الواحد يعطي طاقته كاملة لإلكترون واحد فقط.

حتى يتحرّر الإلكترون من سطح الفلز، يجب أن يمتلك طاقة كافية للتغلّب على قوة التجاذب الكهربائي مع النوى الموجبة للفلز، وأقلّ طاقة كافية لتحرير إلكترون من سطح الفلز تُسمى **اقتران الشغل Work function** (Φ) وهو يعتمد على نوع الفلزّ كما في الجدول (1). فالفوتون الذي طاقته (hf) أقل من اقتران الشغل للفلز لن يتمكن من تحرير إلكترون من سطح الفلز، أما عندما تكون طاقة الفوتون مساوية لاقتران الشغل، فإن طاقة الفوتون تكون كافية لتحرير الإلكترون دون إكسابه طاقة حركية، ويكون تردد الأشعة الكهرمغناطيسية المستخدم مساويا لتردد العتبة للفلز (f_0)، ويعرف بأنه اقل تردد يلزم لتحرير إلكترون من سطح الفلز دون إكسابه طاقة حركية ، ويحسب تردد العتبة من العلاقة الآتية:

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

أما إذا كانت طاقة الفوتون (hf) أكبر من (Φ) فإن الإلكترون يتحرر مكتسبا طاقة حركية، وتحسب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة (KE_{max}) بالعلاقة الآتية:

$$KE_{max} = hf - \Phi$$

يمكن التعبير عن الطاقة الحركية العظمى بالصيغة $(KE_{max} = \frac{1}{2} mv^2_{max})$، وبذلك يمكن إعادة كتابة العلاقة السابقة على النحو الآتي:

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

حيث: m كتلة الإلكترون.

v_{max} : السرعة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

الجدول (1): اقتران الشغل لبعض الفلزات.

الفلز	Φ (eV)
سيزيوم	2.14
صوديوم	2.28
بوتاسيوم	2.30
نحاس	4.7
تنغستون	4.55
ذهب	5.10

✓ **أتحقّق:** أذكر فرضيّة أينشتين التي استخدمها في تفسير نتائج الظاهرة الكهرضوئية.

قيد الإعداد والمراجعة

عند إمعان النظر في العلاقة التي وضعها آينشتين، نلاحظ أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات تتناسب طرديا مع تردد الإشعاع لا مع شدته،وهذا يتفق مع النتائج التجريبية. أما زيادة شدة الإشعاع فتؤدي إلى زيادة عدد الفوتونات الساقطة على الباعث في الثانية الواحدة، فيزداد عدد الإلكترونات المتحررة في الثانية الواحدة، فيزداد التيار الكهرضوئي.

بالإضافة إلى ماسبق، فقد استطاع النموذج الجُسيميّ للإشعاع تفسير الانبعاث الفوري للإلكترونات من سطح الفلزّ؛ لأنّه يفترض أنّ الطاقة مركّزة في الفوتون، وبمجرد امتصاص الإلكترون للفوتون، فإنّ الإلكترون يكتسب طاقة تُحرّره من الفلزّ مهما كانت شدّة الإشعاع، شريطة أنْ يكون تردُّد الفوتون أكبر من تردُّد العتبة للفلزّ أو يساويه. واستطاع هذا النموذج تفسير التفاوت في الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة، وذلك بحَسَب طاقة رَبْط الإلكترون بذرات الفلزّ، إضافة إلى عمق موقع الإلكترون تحت سطح الفلزّ، فالإلكترونات ذات طاقة الربط الأصغر والأقرب إلى سطح الفلزّ تتحرّر بطاقة حركيّة أكبر.

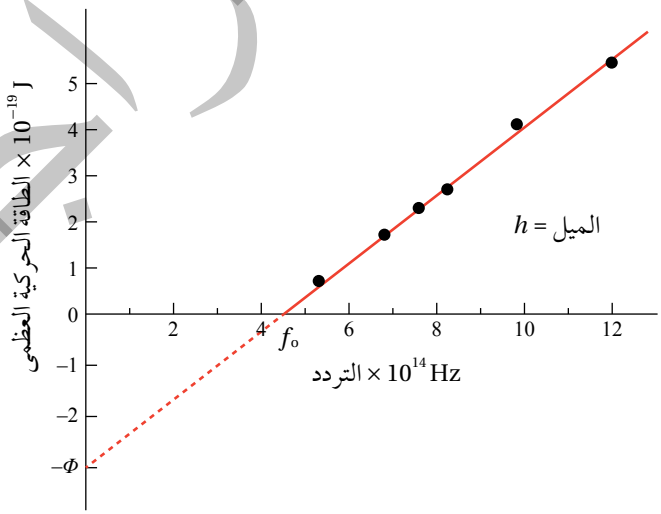
عام 1916 أجرى العالم ميليكان Millikan قياسات تجريبيّة للتحقّق من علاقة أينشتين للظاهرة الكهرضوئيّة، حيث استخدم ميليكان أشعة كهرمغناطيسيّة بتردّدات مختلفة، وقاس جهد الإيقاف عند كل تردُّد، ومثّل العلاقة البيانيّة بين الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة وبين تردُّد الأشعة الساقطة على الباعث برسم بياني فكانت كما في الشكل (7). من الواضح أنّ العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى

أتحقّق:

أُفسِّر اعتمادًا على النموذج الجُسيميّ للضوء:

أ . زيادة شدّة الضوء الساقط تؤدّي إلى زيادة التيار الكهرضوئيّ دون زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

ب. الانبعاث الفوري للإلكترونات من سطح الفلزّ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسيّ بتردّد مناسب على سطحه.



الشكل (7): العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية، وتردُّد الأشعة الكهرمغناطيسية في الظاهرة الكهرضوئية.

لماذا رُسِم امتداد الخط البياني عند قِيَم الطاقة السالبة مُتقطّعًا ولم يُرسَم خطًّا مُتصِلًا؟

قيد الإعداد والمراجعة

للإلكترونات المتحرّرة وتردُّد الأشعة الساقطة على الباعث علاقة خطّيّة، وهذا يتفق مع تفسير أينشتين للظاهرة الكهرضوئية. ويمثّل ميل الخط في الرسم ثابت بلانك، في حين يمثّل تقاطع امتداد الخط مع محور الطاقة ($-\Phi$)، وتمثل نقطة تقاطع الخط مع محور التردّد، تردّدَ العتبة (f_o).

المثال 3

إذا كان اقتران الشغل لفلزّ (2.0 eV)، وسقط على سطحه إشعاع كهرمغناطيسي طاقة الفوتون الواحد منه (6.0 eV). أجد ما يأتي:

أ . تردُّد العتبة للفلزّ.

ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المنطلِقة من سطح الفلزّ بوحدة الإلكترون فولت (eV).

المُعطيات:

$$\Phi = 2.0 \text{ eV}, hf = 6.0 \text{ eV}, h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

المطلوب:

$$f_o = ?, \ KE_{max} = ?$$

الحلّ:

أ . أحسب تردُّد العتبة من العلاقة الآتية:

$$hf_0 = \Phi$$

ألاحظ أن وحدة ثابت بلانك (J.s)، لذا فإن وحدة اقتران الشغل يجب أن تكون بالجول.

$$f_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{2.0 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

ب . أحسب الطاقة الحركيّة العظمى من العلاقة الآتية:

$$KE_{max} = hf - \Phi = 6.0 - 2.0 = 4.0 \text{ eV}$$

الربط بالتكنولوجيا

يعتمد مبدأ عمل كثير من الأجهزة والأدوات في وقتنا الحاضر على الظاهرة الكهرضوئية، حيث تُحوَّل طاقة الفوتونات إلى طاقة كهربائية. مثالا على ذلك الخلايا الشمسية المبينة في الشكل أدناه، تحوّل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. وقد تصل فاعليّة الخلايا الشمسية المستخدمة في الأغراض التجارية إلى 20% تقريبًا. ومن الجدير بالذكر أنّ الخلايا الشمسية من المصادر البديلة النظيفة للطاقة.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 4

سَقَط إشعاع كهرمغناطيسي طول موجته (460 nm) على فلزٍّ اقترانُ الشغل له (2.2 eV). أجد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ بوحدة الجول (J).

المُعطيات: $c = 3.0 \times 10^{8}\ \text{m/s},\ \Phi = 2.2\ \text{eV},\ \lambda = 460\ \text{nm} = 460 \times 10^{-9}\ \text{m},\ h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$

المطلوب: $KE_{\max} = ?$

الحلّ:

أجد تردُّد الضوء الساقط على الفلزّ:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^{8}}{460 \times 10^{-9}} = 6.5 \times 10^{14}\ \text{Hz}$$

أحوّل وَحْدة قياس اقتران الشغل من eV إلى وَحْدة جول (J):

$$\Phi = 2.2 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.5 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

ثمّ أعوّض في العلاقة:

$$KE_{\max} = hf - \Phi = 6.63 \times 10^{-34} \times 6.5 \times 10^{14} - 3.5 \times 10^{-19}$$
$$= 8.1 \times 10^{-20}\ \text{J}$$

المثال 5

إذا كانت الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح النحاس تساوي (22.6 eV) عند سقوط أشعة فوق بنفسجيّة تردُّدها (6.60×10^{15} Hz) على سطحه. أجد اقتران الشغل للنحاس بوحدة (eV).

المُعطيات: $KE_{\max} = 22.6\ \text{eV},\ f = 6.60 \times 10^{15}\ \text{Hz},\ h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$

المطلوب: $\Phi = ?$

الحلّ:

أجد hf بوحدة (eV)

$$hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 6.60 \times 10^{15} = 4.38 \times 10^{-18}\ \text{J}$$
$$= 4.38 \times 10^{-18}\ \text{J} \times \frac{1\ \text{eV}}{1.60 \times 10^{-19}\ \text{J}} = 27.3\ \text{eV}$$

ثمّ أعوّض في العلاقة

$$KE_{max} = hf - \Phi$$
$$22.6 = 27.3 - \Phi \Rightarrow \Phi = 4.70\ \text{eV}$$

فريق إعداد وامراجعة

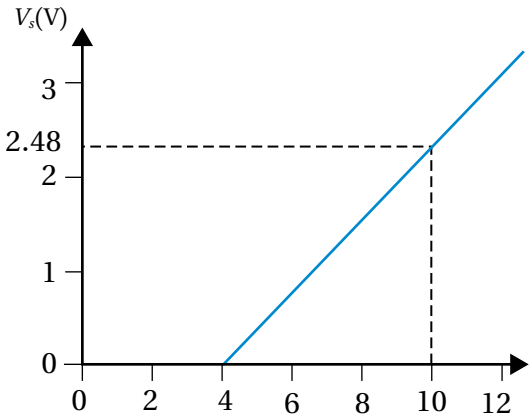
المثال 6

يمثّل الرسم البياني في الشكل (8) العلاقة بين جهد الإيقاف وتردُّدِ الفوتونـات الساقطـة على باعث خليـة كهرضوئيـة، مستعينًا بالبيانات المبيّنة على الرسم، أحسب ما يأتي:

أ . ثابت بلانك.

ب. اقتران الشغل للباعث.

جـ. الطاقة الحركية العظمى (بالجول) للإلكترونات المنبعثة عند إسقاط أشعة تردّدها (12×10^{14} Hz) على الباعث.



الشكل (8): مثال 6

ملاحظة: لحلّ الفرعين (ب) و(جـ)، أستخدم ثابت بلانك الذي حسبته في الفرع (أ).

المُعطيات:

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, الرسم البياني

المطلوب:

$\Phi = ?,\ KE_{max} = ?$

الحلّ:

أ. أجد ميل المنحنى لحساب ثابت بلانك، مُراعِيًا وَحْدات القياس:

$$slope = \frac{\Delta V_s}{\Delta f} = \frac{2.48 - 0}{(10 - 4.0) \times 10^{14}} = 4.1 \times 10^{-15}\ \text{V.s}$$

إنّ ميل الخط المستقيم يساوي $slope = \frac{h}{e}$ ومنه

$$h = slope \times e = 4.1 \times 10^{-15} \times 1.6 \times 10^{-19} = 6.6 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$$

ب. أُلاحظ أنّ تقاطع الخط المستقيم مع محور التردّد هو تردُّد العتبة $f_0 = 4 \times 10^{14}$ Hz

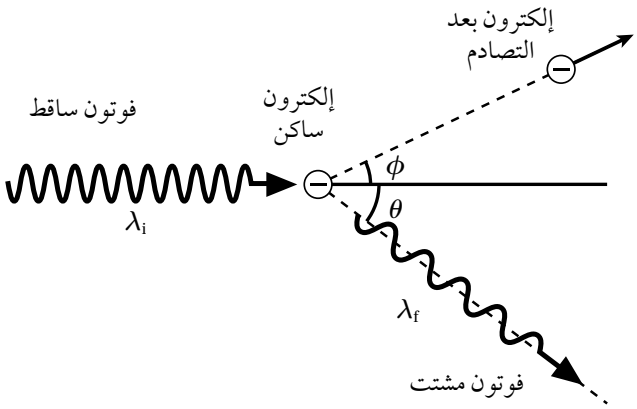
$$\Phi = hf_0 = 6.6 \times 10^{-34} \times 4.0 \times 10^{14} = 2.6 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

جـ. $KE_{max} = hf - \Phi = 6.6 \times 10^{-34} \times 12 \times 10^{14} - 2.6 \times 10^{-19} = 5.3 \times 10^{-19}\ \text{J}$

تمرين

أستخدم الأرقام: أرادت سارة قياس تردُّد العتبة لفلزّ في تجربة الظاهرة الكهرضوئية، فاستخدمت أشعة كهرمغناطيسية طول موجتها (300 nm)، ووجدت أنّ التيار الكهرضوئي يصبح صفرًا عند فرق جهد (2.1 V)، أجد تردّد العتبة للفلزّ.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (9): ظاهرة كومبتون.

ظاهرة كومبتون Compton Effect

بعد نجاح أينشتين في تفسير الظاهرة الكهرضوئية باستخدام النموذج الجُسيمي للإشعاع الكهرمغناطيسي، جاءت ظاهرة كومبتون اختبارًا آخر لهذا النموذج.

أسقط كومبتون أشعة سينيّة على هدف من الغرافيت، ونظرًا إلى أنّ الطاقة الكليّة للإلكترونات في الغرافيت صغيرة جدًّا مقارنة بطاقة فوتونات الأشعة السينية، فإنّ طاقة تلك الإلكترونات تُهمَل وتُعدّ ساكنة. لاحظ كومبتون أنّ طول موجة الأشعة السينيّة المشتَّتة (λ_f) أكبر من طول موجة الأشعة السينيّة الساقطة (λ_i).

لم يستطع النموذج الموجيّ للضوء تفسير زيادة الطول الموجي للأشعة المشتتة في هذه الظاهرة، واستطاع العالم كومبتون تفسير نتائج هذه الظاهرة بالاعتماد على قانوني حفظ الزخم الخطي والطاقة، وبافتراض أنّ الأشعة الكهرمغناطيسية تتفاعل مع الإلكترون بوصفها جُسيمات طاقةُ كلٍّ منها hf ومقدار الزخم الخطي لكلّ منها $p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$ وهذا يتوافق مع الطبيعة الجُسيمية للأشعة الكهرمغناطيسية التي استخدمها أينشتين في تفسير الظاهرة الكهرضوئية. ونتيجة لتصادم الفوتون الساقط مع الإلكترون يكتسب الإلكترون طاقة، ويتحرك بمسار يصنع زاوية (ϕ) مع مسار الفوتون الساقط، في حين ينحرف اتجاه الفوتون المشتَّت بزاوية (θ) كما في الشكل (9)، ويستمر بالسرعة نفسها (c)، ولكن بطول موجيّ أكبر ($\lambda_i < \lambda_f$)، ويُعبَّر عن الطاقة التي اكتسبها الإلكترون (E_e) بالعلاقة الآتية:

$$E_e = E_i - E_f$$

حيث (E_f) طاقة الفوتون المشتَّت، و(E_i) طاقة الفوتون الساقط.

مرةً أخرى فشلت الفيزياء الكلاسيكية بنموذجها الموجيّ للضوء في تفسير هذه الظاهرة، في حين نجح في ذلك النموذج الجُسيمي للضوء.

✓ **أتحقّق:** في تجربة كومبتون، أقارن بين الأشعة الساقطة والأشعة المشتّتة من حيث: الطول الموجيّ، والتردّد، والسرعة.

وزارة التربية والتعليم العالي

المثال 7

فوتون أشعة سينيّة تردّده (4.20×10^{18} Hz). أجد طاقته ومقدار زخمه الخطّي.

المُعطيات:

$$f = 4.20 \times 10^{18}\ \text{Hz}\ ,\ c = 3.0 \times 10^{8}\ \text{m/s}\ ,\ h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$$

المطلوب:

$$E = ?\ ,\ p = ?$$

الحلّ:

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 4.20 \times 10^{18}$$

$$= 2.78 \times 10^{-15}\ \text{J} = 2.78 \times 10^{-15}\ \text{J} \times \frac{1\ \text{eV}}{1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}} = 17\ \text{keV}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c} = \frac{E}{c} = \frac{2.78 \times 10^{-15}}{3.0 \times 10^{8}} = 9.3 \times 10^{-24}\ \text{kg m/s}$$

المثال 8

فوتون مقدار زخمه الخطي (8.85×10^{-26} kg m/s)، أجد طاقته وتردُّده.

المُعطيات:

$$h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s},\ 1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J},\ p = 8.85 \times 10^{-26}\ \text{kg m/s}\ ,\ c = 3.0 \times 10^{8}\ \text{m/s}$$

المطلوب:

$$E = ?\ ,\ f = ?$$

الحلّ:

$$E = pc = 8.85 \times 10^{-26} \times 3.0 \times 10^{8} = 2.7 \times 10^{-17}\ \text{J}$$

$$= 2.7 \times 10^{-17}\ \text{J} \times \frac{1\ \text{eV}}{1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}} = 1.7 \times 10^{2}\ \text{eV}$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{2.7 \times 10^{-17}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.1 \times 10^{16}\ \text{Hz}$$

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 9

سَقَط فوتون أشعة غاما طاقته (662 keV) على إلكترون ساكن، فاكتسب الإلكترون طاقة مقدارها (49 keV). أجد ما يأتي:

أ . طول موجة الفوتون الساقط.

ب. طاقة الفوتون المشتَّت.

جـ. الطول الموجي للفوتون المشتت.

المُعطيات:

$h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s}, 1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J},\ c = 3.0 \times 10^{8}\ \text{m/s}, E_i = 662\ \text{keV}, E_e = 49\ \text{keV}$

المطلوب:

$\lambda_i = ?, E_f = ?, \Delta\lambda = ?$

الحلّ:

أ . أحوّل طاقة الفوتون الساقط إلى وَحْدة جول، ثمّ أحسب الطول الموجيّ.

$$E_i = 662\ \text{keV} = 662 \times 10^{3}\ \text{eV} \times \frac{1.6 \times 10^{-19}\text{J}}{1\ \text{eV}} = 1.1 \times 10^{-13}\ \text{J}$$

$$\lambda_i = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_i} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^{8}}{1.1 \times 10^{-13}} = 1.8 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

ب . $E_f = E_i - E_e = 662 - 49 = 613\ \text{keV} = 613 \times 10^{3}\ \text{eV} \times \frac{1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}}{1\ \text{eV}} = 9.8 \times 10^{-14}\ \text{J}$

جـ. أجد طول موجة الفوتون المشتّت (بعد التصادم).

$$\lambda_f = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^{8}}{9.8 \times 10^{-14}} = 2.0 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

تمرين

أستخدم الأرقام: أجد مقدار الزخم الخطّي لكلّ ممّا يأتي:

أ . فوتون أشعّة مرئيّة طاقته $(3.0 \times 10^{-19}\ \text{J})$.

ب. فوتون أشعّة فوق بنفسجيّة تردّده $(5.4 \times 10^{15}\ \text{Hz})$.

جـ. فوتون أشعّة سينيّة طول موجته $(2.0\ \text{nm})$.

قيد الإعداد والمراجعة

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بكلٍّ من: الجسم الأسود، الظاهرة الكهرضوئيّة، اقتران الشغل للفلزّ، تردُّد العتبة.

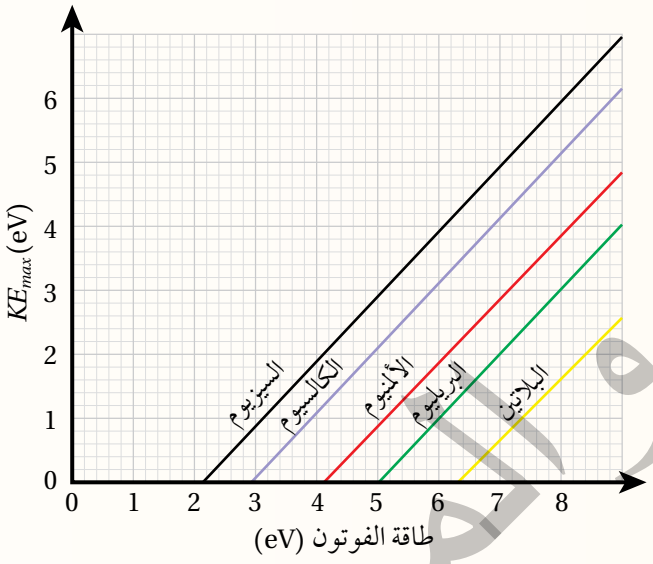
2. **أستخدم الأرقام:** سقط فوتون أشعّة سينيّة مقدار زخمه الخطي (4.3×10^{-23} kg m/s) على إلكترون حرّ، فكان مقدار الزخم الخطي للفوتون المشتت (3.2×10^{-23} kg m/s)، أجد الطاقة التي اكتسبها الإلكترون بوحدة (eV).

3. **أستخدم الأرقام:** سَقَط ضوء طول موجته (300 nm) على سطح فلزّ تردُّد العتبة له (5.0×10^{14} Hz). أجد:

   أ . اقتران الشغل للفلز.

   ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

4. **أُحلِّل رسمًا بيانيًّا:** يمثّل الرسم البيانيّ المجاور العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ وطاقة فوتون الإشعاع الكهرمغناطيسي الساقط على سطح الفلزّ، وذلك لفلزات عدّة.



   أ . جميع الخطوط مستقيمة ومتوازية، أُفسِّر ذلك.

   ب. أُرتِب تردُّد العتبة للفلزّات من الأصغر إلى الأكبر.

   جـ. إذا سقط ضوء طاقته (10 eV) على البيريليوم، أجد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة منه.

   د . إذا سقط ضوء طول موجته (350 nm)، فمن أيّ الفلزّات يستطيع تحرير إلكترونات؟ ومن أيّها لا يستطيع؟ أيّ الفلزات تتحرّر منه إلكترونات بطاقةٍ حركيّة عظمى أكبر؟

5. **أستخدم الأرقام:** سَقَط إشعاع كهرمغناطيسي طول موجته (80 nm) على سطح فلزّ اقتران الشغل له (5.1 eV)، أجد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ.

6. **التفكير الناقد:** بيّنت التجارب أنّ زيادة شدّة الضوء الساقط على سطح فلزّ لا تؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطحه. أناقش فشل الطبيعة الموجيّة للضوء في تفسير هذه المشاهدة.

قيد الإعداد والمراجعة

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

1. نجح نموذج رايلي- جينز في تفسير اشعاع الجسم الأسود في منطقة:

أ . الترددات الكبيرة. ب. الترددات الصغيرة.

جـ. الأطوال الموجية جميعها. د. الأطوال الموجية القصيرة.

2. جسم ساخن يبعث بأشعة ترددها (99.7 MHz)، الطاقة الصادرة عن هذا الجسم عند هذا التردد تساوي 150 kJ في الثانية الواحدة. عدد الكمات المنبعثة من الجسم في الثانية الواحدة يساوي:

أ . 7.32×10^{27} ب. 2.27×10^{30}

جـ. 4.51×10^{32} د . 1.50×10^{29}

3. يبين الجدول المجاور اقتران الشغل لأربعة فلزات. أقل تردد للضوء القادر على تحرير الكترونات من أسطح الفلزات جميعها، بوحدة (Hz):

العنصر	اقتران الشغل (eV)
Be	5.0
Na	2.4
Al	4.0
Cu	4.6

أ . 0.60×10^{15}

ب. 0.90×10^{15}

جـ. 1.1×10^{15}

د . 1.3×10^{15}

4. في تجربة لدراسة الظاهرة الكهرضوئية، أسقط ضوء مناسب على الباعث فانبعث من سطحه الكترونات تحمل طاقة حركية. عند استخدام ضوء آخر شدته أقل وتردده أكبر، فإن الإلكترونات المتحررة في وحدة الزمن:

أ . عددها أقل، وطاقتها الحركية العظمى أكبر. ب. عددها أكبر وطاقتها الحركية العظمى لا تتغير.

جـ. عددها لايتغير، وطاقتها الحركية العظمى أكبر. د . عددها أقل، وطاقتها الحركية العظمى أقل.

5. سقط فوتون أشعة سينية مقدار زخمه الخطي (p_i) على إلكترون حرّ ساكن، فكان مقدار الزخم الخطي للفوتون المشتت (p_f)، إنّ الطاقة التي اكتسبها الإلكترون:

أ . $c(p_i - p_f)$ ب. $c(p_f - p_i)$

جـ. $p_i - p_f$ د . $\frac{p_i - p_f}{c}$

وزارة الإعداد والمراجعة

الفكرةُ الرئيسةُ:

تتكوّن الذّرّة من نواة موجبة الشحنة تتحرك حولها إلكترونات سالبة الشحنة، تحتل مستويات طاقة غير متصلة (مكماة)، وفهمنا هذا التركيب أدّى إلى تطوير تكنولوجيا متطوّرة أسهمت في تسهيل سُبُل الحياة، واكتشافات علمية جديدة.

نتاجاتُ التعلّم:

- أشرح الأسس التي اعتمد عليها بور في بناء نموذجه لذرة الهيدروجين.
- أحسب الأطوال الموجية للأشعة الكهرمغناطيسية الناتجة عن انتقال الإلكترون بين مستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين.
- أصف أنواع الأطياف الذرية.
- أوضح الطبيعة المزدوجة للإشعاع والجسيمات المادية.
- أذكر نص فرضية دي بروي وأعبر عنها رياضيا.
- أصف تطبيقات تكنولوجية يعتمد مبدأ عملها على انتقال الإلكترونات بين مستويات الطاقة في الذرات (الأشعة السينية وأشعة ليزر).

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

طيف الامتصاص الخطّي
Absorption Line Spectrum

طيف الانبعاث الخطّي
Emission Line Spectrum

طاقة التأيُّن Ionization Energy

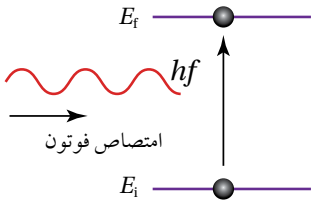
نموذج بور لذرّة الهيدروجين:
Bohr's Model of The Hydrogen Atom

ساد الاعتقاد أنّ الذّرّة أصغر مكوّنات المادّة، لكن، بيّنت التجارب لاحقًا أنّ الذّرّة تتكوّن من جُسيمات أصغر منها. إنّ تفسير بِنية الذّرّة واستقرارها كان التحدي الأكبر للفيزياء الكلاسيكية. بداية، افترض ثومسون أنّ الذّرّة كرة مصمتة موجبة الشحنة تتوزّع فيها الإلكترونات سالبة الشحنة، وأنّ الذّرّة متعادلة كهربائيًّا؛ لأنّ مجموع الشحنة السالبة يساوي مجموع الشحنة الموجبة. لكن تجربة رذرفورد أثبتت عدم صحّة هذا النموذج. ففي تجربته الشهيرة عام 1911، أسقط رذرفورد Rutherford جُسيمات ألفا على صفيحة رقيقة من الذهب، وافترض بناءً على مشاهداته التجريبية، أنّ الذّرّة تتكوّن من نواة موجبة الشحنة تشغل حيزًا صغيرًا جدًّا، تتركّز فيه غالبية كتلة الذّرّة، تدور حوله إلكترونات سالبة الشحنة مثل دوران الكواكب حول الشمس. ولم يُكتب لهذا النموذج النجاح؛ لأنّه لم يستطع تفسير استقرار الذّرّة، حيث إنّ الإلكترون جُسيم مشحون يدور حول النواة ويغيّر اتجاه حركته باستمرار، وبذلك يكتسب تسارعًا مركزيًّا، وبحَسَب النظرية الكهرمغناطيسية فإنّه سيشعّ (يفقد) طاقة بشكل متصل، ونتيجة فقدانه الطاقة، فإنّه سينجذب نحو النواة وهذا يؤدّي إلى انهيار الذّرّة. وهذا يخالف النتائج التجريبية، حيث الذّرّة مستقرة والطاقة التي تشعّها ذات قِيَم محدّدة وغير متصلة.

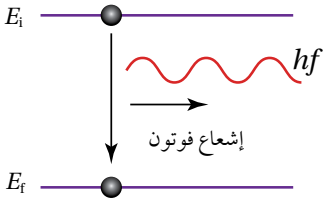
العالم بور كان مقتنعًا بصحّة نموذج رذرفورد، لكنّه اختلف معه في كيفيّة إشعاع الإلكترون للطاقة، فافترض أنّ الإلكترون يفقد الطاقة على هيئة كمات محدّدة من الطاقة (فوتونات) لا على شكل متّصل، واستخدم بور مبدأ تكمية الطاقة، ونموذج رذرفورد إضافة إلى النموذج الجُسيمي للإشعاع ليبني نموذجًا للذرة عُدَّ في ما بعد من أهمّ الإنجازات العلميّة في ذلك الوقت. تتلخص فرضيات بور لذرّة الهيدروجين في ما يأتي:

1. يدور الإلكترون حول البروتون (النواة) في مسارات دائرية تحت تأثير قوة التجاذب الكهربائي.
2. توجد مدارات محدّدة (مستويات طاقة) مسموح للإلكترون بأن يحتلّها، وإذا بقي في مستوى الطاقة نفسه فلا يشعّ طاقة ولا يمتصّها.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (10/ ب): امتصاص الذّرّة لفوتون، في هذه الحالة تكتسب الذّرّة طاقة.



الشكل (10/ أ): إشعاع الذّرّة لفوتون، في هذه الحالة تفقد الذّرّة طاقة.

3. يشعّ الإلكترون طاقة أو يمتصّها فقط إذا انتقل من مستوى طاقة إلى مستوًى آخر. فعند انتقال الإلكترون من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقلّ، فإنّه يشعّ فوتونًا طاقته تساوي الفرق بين طاقتي المستويين، أتأمّل الشكل (10/ أ). ويمكن أيضًا أن يمتص الإلكترون فوتونًا، وينتقل إلى مستوى طاقة أعلى عندما تكون طاقة الفوتون الممتَصّ مساوية لفرق الطاقة بين المستويين، أتأمّل الشكل (10/ ب). وفي كلتا الحالتين فإنّ طاقة الفوتون (E) المنبَعِث أو الممتَصّ يُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$E = |E_f - E_i| = hf$$

حيث

E_f: طاقة المدار (مستوى الطاقة) النهائي الذي انتقل إليه الإلكترون.

E_i: طاقة المدار (مستوى الطاقة) الابتدائي الذي انتقل منه الإلكترون.

f: تردّد الفوتون المنبَعِث أو المُمتَصّ.

4. المدارات المسموح للإلكترون أن يحتلها هي تلك التي يكون فيها مقدار زخمه الزاويّ $L = m_e vr$ يساوي عددًا صحيحًا من مضاعفات $\hbar$ حيث $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \times 10^{-34}$ J.s. أيْ إنّ

$$L = n\hbar = m_e v r$$

حيث

n: رقم المدار ويسمى الرقم الكمي الرئيس، ويأخذ قيمًا صحيحة 1,2,3,... وهكذا.

m_e: كتلة الإلكترون وتساوي 9.11×10^{-31} kg

r: نصف قطر مدار الإلكترون.

v: سرعة الإلكترون.

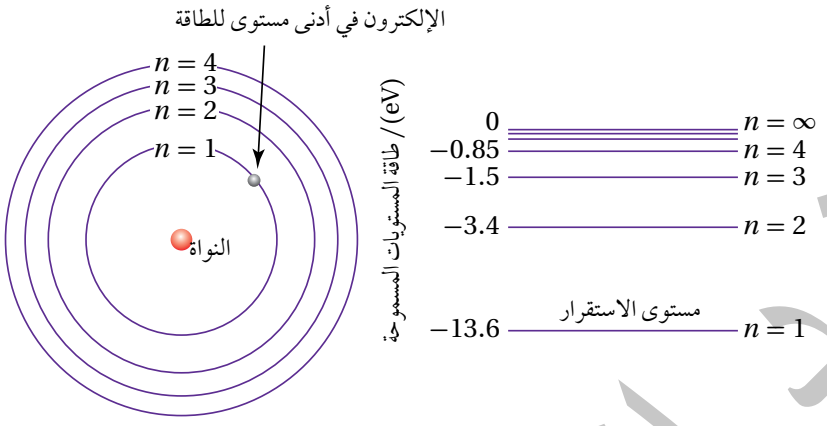
ففي المدار الأول ($n=1$) يكون الزخم الزاويّ للإلكترون $\hbar$، وفي المدار الثاني $2\hbar$ وهكذا.

ويُعبَّر عن طاقة الإلكترون في مستوى الطاقة (n) في ذرّة الهيدروجين بوحدة (eV) بالعلاقة الآتية:

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}$$

✓ **أتحقّق:** ما الشرط الذي وضعه بور للزخم الزاويّ للإلكترون في ذرة الهيدروجين؟

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (11): مستويات الطاقة لذرّة الهيدروجين بحسب نموذج بور.

ما أصغر قيمة للطاقة يمكن أن يمتصها إلكترون ذرة الهيدروجين موجود في مستوى الاستقرار؟

أُلاحظ من العلاقة السابقة أنّ مستويات الطاقة غير متصلة (منفصلة) وتأخذ قيمًا محدّدة، أيْ أنّها مكمّاة، فمثلًا، طاقة المستوى الأول (−13.6 eV) وطاقة المستوى الثاني (−3.40 eV). الشكل (11) يبيّن مستويات الطاقة لذرّة الهيدروجين، حيث يُمثَّل كلُّ مستوًى بخطٍّ أفقيٍّ بجانبه الرقمُ الكميُّ الرئيسُ (n) وطاقةُ المستوى بوحدة (eV).

أُلاحظ من الشكل (11) أنّ الإلكترون في مستوى الطاقة الأول يمتلك أقلّ طاقة وهي ($E_1 = -13.6$ eV)، ويُسمّى مستوى الاستقرار Ground state. أمّا مستويات الطاقة E_n حيث ($n > 1$)، فتُسمّى مستويات الإثارة Excited states ينتقل إليها الإلكترون عندما يمتص فوتونًا طاقته مناسبة. فمثلًا حتى ينتقل إلكترون من مستوى الطاقة الأول ($E_1 = -13.6$ eV) إلى مستوى الطاقة الثاني ($E_2 = -3.4$ eV) يجب أن يمتص فوتونًا طاقته تساوي الفرق بين طاقتي المستويين، أيْ (10.2 eV). أمّا لنقل إلكترون من مستوى الطاقة الأول ($n = 1$) إلى مستوى الطاقة ($n = \infty, E_\infty = 0$)، فيتطلّب امتصاص فوتون طاقته (13.6 eV)، وتُسمّى **طاقة التأيُّن Ionization energy** وهي أقلّ طاقة لازمة لتحرير الإلكترون من الذّرّة دون إكسابه طاقة حركية. فالإشارة السالبة لطاقة المستوى ($E_n = -\frac{13.6}{n^2}$ eV) تعني ضرورة تزويد الإلكترون بطاقة مقدارها ($+\frac{13.6}{n^2}$) لتحريره من الذّرّة.

✓ **أتحقّق:** ما المقصود بطاقة التأين؟

الربط بالتكنولوجيا

معرفة مستويات الطاقة في الذرات المنفصلة أو الموادّ الصُّلْبة، مكّن العلماء من تطوير كثيرٍ من الأجهزة التي تسهّل حياة البشر، مثل أنابيب الفلورسنت، والميكروويف، وأجهزة الهاتف المحمول والحاسوب، وتطوير تكنولوجيا الليزر المستخدمة في الطب والصناعة وتشكيل الصور ثلاثية الأبعاد (هولوغرام).

أفكّر: ماذا يحدث للإلكترون إذا زادت طاقة الفوتون الذي يمتصّه على طاقة التأيُّن؟

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 10

اعتمادًا على الشكل (11)، أجد طاقة الفوتون المنبعث عند انتقال الإلكترون في ذرّة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثالث إلى مستوى الطاقة الثاني بوحدة eV، وبوحدة J.

المُعطيات: $1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J},\ E_3 = -1.50\ \text{eV},\ E_2 = -3.40\ \text{eV}$

المطلوب: $E = ?$

$$E = |\Delta E| = |E_2 - E_3| = |-3.40-(-1.50)|$$
$$= 1.90\ \text{eV}$$
$$= 1.90\ \text{eV} \times \frac{1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}}{1\ \text{eV}} = 3.0 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

المثال 11

أجد تردُّد الفوتون اللازم لنقل إلكترون في ذرّة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الثالث.

المُعطيات: $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s},\ 1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J},\ n_\text{i} = 2,\ n_\text{f} = 3$

المطلوب: $f = ?$

الحلّ:

$$E = |E_\text{f} - E_\text{i}| = \left|\frac{-13.6}{n_\text{f}^2} - \frac{-13.6}{n_\text{i}^2}\right|$$

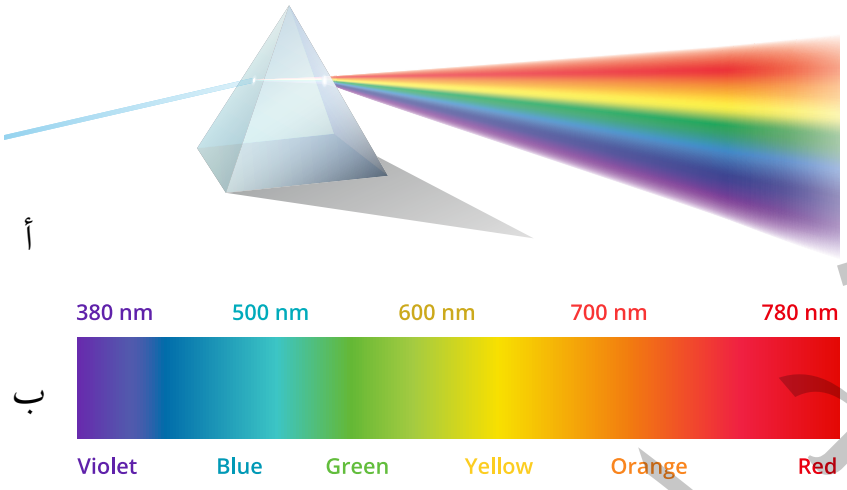
$$E = \left|\frac{-13.6}{3^2} - \frac{-13.6}{2^2}\right| = |-1.5-(-3.4)| = 1.9\ \text{eV} = 1.9 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.0 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{3.0 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.5 \times 10^{14}\ \text{Hz}$$

تمرين

أستخدم الأرقام: انتقل إلكترون ذرّة الهيدروجين من مستوى الطاقة n_i إلى مستوى الطاقة الثاني، فانبعث فوتون بطاقة $(4.08 \times 10^{-19}\ \text{J})$. أجد رَقْم مستوى الطاقة n_i.

قيد الإعداد والمراجعة



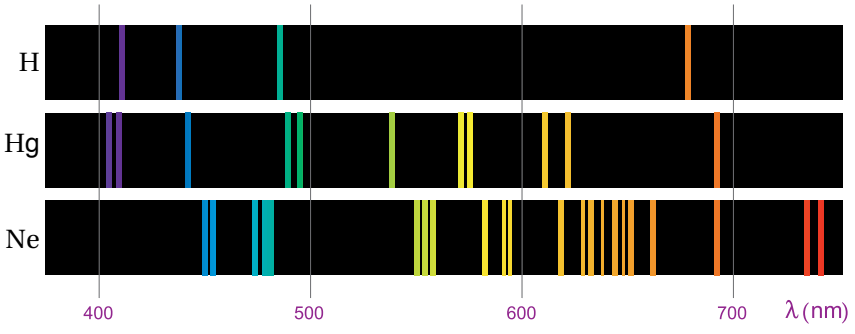
الشكل (12): تحليل ضوء الشمس الأبيض إلى ألوان الطيف المختلفة باستخدام منشور.

الأطياف الذريّة Atomic Spectra

يوضّح الشكل (12/ أ) منشورًا يعمل على تحليل ضوء الشمس الأبيض إلى ألوان الطيف المتصل Continuous spectrum وسُمّي متّصلًا لأنّه يحتوي الأطوال الموجيّة كلها بدءًا من اللون الأحمر وصولًا إلى اللون البنفسجي، أتأمّل الشكل (12/ ب).

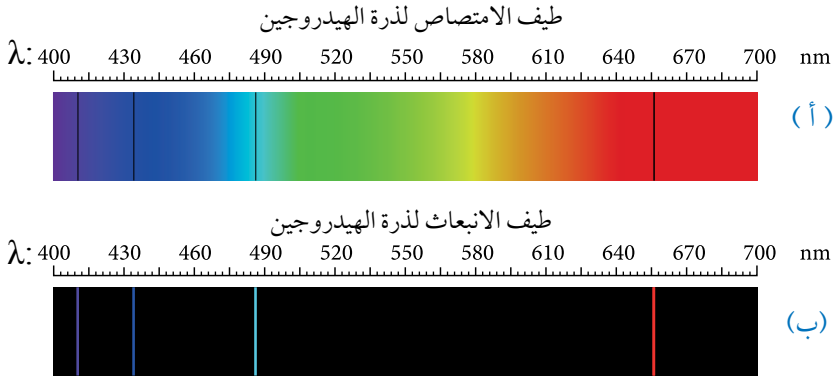
وبخلاف الطيف الشمسي فإنّ الأطياف الناتجة من ذرات عنصر واحد كالهيدروجين مثلا ليست متصلة. والشكل (13) يوضح أطياف الانبعاث لذرات عناصر بعد إثارتها، منها عنصر الهيدروجين، كلٌّ منها يتكون من خطوط غير متصلة (منفصلة) على خلفية سوداء، يُسمّى **طيف الانبعاث الخطّي Emission line spectrum.**

لتفسير الطيف الذريّ غير المتصل لذرة الهيدروجين، افترض وجود الالكترون في مستوى الاستقرار. وعندما يمتص هذا الالكترون فوتونا ذا طاقة مناسبة ينتقل إلى مستوى طاقة أعلى وتصبح الذرة في مستوى إثارة، وعند عودة الالكترون الى مستوى الاستقرار يشع فوتونا طاقته (E) تساوي الفرق بين طاقتي المستويين اللذين انتقل بينهما.



الشكل (13): طيف الانبعاث الخطي لبعض العناصر.

قيد الاعداد والمراجعة



الشكل (14):
(أ) طيف الامتصاص الخطي،
(ب) طيف الانبعاث الخطي لذرّة الهيدروجين.

وإذا مُرِّر ضوء الشمس خلال غاز عنصر معيّن، فإنّ ذرات الغاز تمتص طاقات محددة (أطوالًا موجيّةً معيّنة) فقط، وبتحليل الطيف النافذ لوحظ وجود خطوط معتمة منفصلة على خلفية مضيئة كما في الشكل (14/ أ)، ويُسمّى هذا الطيف **طيف الامتصاص الخطّي Absorption line spectrum** والخطوط المعتمة ناتجة من فقدان أطوال موجيّة معينة امتصّتها ذرات الغاز، وهي تقابل تمامًا الخطوط المضيئة التي ظهرت في طيف الانبعاث الخطّي لذرات العنصر نفسه، ألاحظ الشكل (14/ ب)؛ لأنّ الأطوال الموجيّة المحدّدة من الطيف التي تمتصّها ذرات عنصر معيّن هي الأطوال الموجيّة نفسها التي تشعّها؛ لذا يُعدّ طيف العنصر صفة مميّزة خاصّة به كالبصمة للإنسان، ولا يمكن لعنصرين أن يكون لهما الطيف الخطّي نفسه.

✓ **أتحقّق:** ما الفرق بين الطيف الناتج من أشعة الشمس المرئيّة والطيف الناتج عند عبور أشعة الشمس خلال غاز عنصر معين؟

نموذج بور وطيف ذرّة الهيدروجين
Bohr's Model and the Hydrogen Spectrum

طيف ذرّة الهيدروجين من أبسط الأطياف؛ لأنّها تحتوي إلكترونًا واحدًا فقط، ويوضّح الشكل (15) الأطوال الموجيّة لطيف الانبعاث الخطي لذرّة الهيدروجين في منطقة الضوء المرئي.

لقد نجح نموذج العالم بور في حساب الأطوال الموجيّة لطَيْف ذرّة الهيدروجين. فعند انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة (n_i) إلى مستوى الطاقة (n_f)، فإنّ طاقة الفوتون المنبعث (أو الممتص) بوحدة الجول هي:

الشكل (15): الأطوال الموجيّة لطَيْف الانبعاث الخطي لذرّة الهيدروجين.

قيد الإعداد والمراجعة

$$hf = |E_f - E_i| = 13.6\, e \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

حيث e هي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون، وبالتعويض عن التردّد $f = \frac{c}{\lambda}$، وقسمة المعادلة على hc نحصل على:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{13.6\, e}{hc} \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

المقدار $\frac{13.6\, e}{hc}$ يساوي $1.097 \times 10^7\ \mathrm{m}^{-1}$، قيمة ثابت يُسمّى ثابت ريدبيرغ (R_H)؛ لذا فإنّ:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

حيث (λ) الطول الموجي للفوتون المنبعث (أو الممتص). وعلى الرغم من اتّفاق نتائج نموذج بور مع النتائج التجريبية لطَيْف ذرّة الهيدروجين والأيونات ذات الإلكترون الواحد، فإنّه فشل في تفسير أطياف الذرات عديدة الإلكترونات.

أُفكّر: هل يمكن تفسير الأطياف الذريّة باستخدام مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية؟ أفسِّر إجابتي.

✓ **أتحقّق:** أيّ الأطياف الذرية نجح نموذج بور في حسابها؟ هل نجح في التنبؤ بالأطوال الموجية لأطياف الذرات عديدة الإكترونات؟

الربط بالتكنولوجيا

أشعة الليزر LASER هي ضوء ذات طول موجي واحد ينبعث من جهاز الليزر الذي يعتمد مبدأ عمله على تحفيز ذرات مادة ذات خصائص معينة على إطلاق أعداد كبيرة من الفوتونات، نتيجة لانتقال إلكترونات تلك الذرات من مستويات ذات طاقة أعلى إلى مستويات ذات طاقة أقل.

تتميز أشعة الليزر بشدة سطوعها وبإمكانية توجيهها بدقة عالية إلى نقطة صغيرة دون التأثير في المناطق المحيطة؛ لذلك فإن الليزر أداة فعّالة في العديد من المجالات. ففي مجال الصناعة يُستخدم الليزر في قطع ونقش المعادن والخشب والبلاستيك بدقة عالية، ويُستخدم أيضًا في عمليات اللحام نظرًا لقدرته على تجميع الطاقة الضوئية الصادرة عنه في مساحة صغيرة جدًا. وتطبيقات الليزر في الطب متعددة، منها استخدامه في عمليات تصحيح البصر مثل الليزك لتحسين النظر، وعلاج بعض الأمراض الجلدية بدقة دون تدخل جراحي. أما في الاتصالات، فتُستخدم أشعة الليزر في نقل البيانات بسرعة كبيرة عبر الألياف الضوئية. كذلك يُستفاد من الليزر في السيارات ذاتية القيادة عبر أنظمة تساعد المركبة على التعرف على البيئة المحيطة.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 12

أجـدُ الأطـوال الموجيّـة للفوتونـات المنبعِثـة عند انتقـال إلكتـرون ذرّة الهيدروجين من مسـتويات الطاقـة: الثالث، والرابـع، والخامـس، والسـادس إلـى مسـتوى الطاقـة الثاني. وأقـارن الأطـوال الموجيّة التـي حصلـت عليها بتلك الموجـودة فـي الشـكل (15)، وفـي ضوء ذلـك أصـدر حُكمًا علـى صحة نمـوذج بور.

المُعطيات: $R_H = 1.097 \times 10^7\ m^{-1}$, $n_f = 2$, $n_i = 3, 4, 5, 6$

المطلوب: $\lambda = ?$.

الحلّ :

أحسب طول موجـة الفوتون المنبعث عند انتقال الإلكترون من مستوى الطاقـة الثالث إلى مستوى الطاقـة الثاني من العلاقة الآتية:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right| = 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right|$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.523 \times 10^6\ m^{-1}$$

$$\lambda = 6.563 \times 10^{-7}\ m = 656.3\ nm$$

نكرّر العملية عندما $n_i = 4, 5, 6$

n_i	3	4	5	6
القيم المحسوبة λ	656.3 nm	486.2 nm	434.1 nm	410.2 nm
القيم التجريبيّة λ	656.2 nm	486.1 nm	434.0 nm	410.1 nm

نلاحظ أنّ الأطوال الموجيّة تقع كلّها ضمن الأطوال الموجيّة للطيف المرئي، وأنّ القيم المحسوبة من علاقة بور قريبة جدًّا من القيم التجريبية، وهذا يدلّ على صحة نموذج بور لذرّة الهيدروجين.

تمرين

أستخدم الأرقام: انتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الأول، بحسب نموذج بور. أحسبُ طول موجة الفوتون المنبعث وتردّده وطاقته وزخمه الخطيّ.

قيد الإعداد والمراجعة

الطبيعة الموجيّة-الجُسيميّة المزدوجة Wave-Particle Duality

لقد تعلّمتُ أنّ بعض الظواهر المتعلقة بالضوء، مثل الحيود والتداخل يمكن تفسيرها بافتراض أنّ الضوءَ موجاتٌ كهرمغناطيسية. لكن توجد ظواهر أخرى، مثل: إشعاع الجسم الأسود، والظاهرة الكهرضوئية، وظاهرة كومبتون، والأطياف الذريّة لا يمكن تفسيرها إلّا بافتراض أنّ الضوء يتكوّن من جُسيمات (فوتونات) تمتلك زخمًا خطّيًّا يُحسب مقداره من العلاقة الآتية : $p = \frac{h}{\lambda}$

فـافترض العلماء أنّ للإشعـاع الكهرمغناطيسي طبيعـة **موجيّـة-جُسيميّـة مزدوجة Wave–particle duality of light**. وعلى غرار الطبيعة الموجيّة-الجسيميّة للإشعاع، اقترح العالم دي بروي de Broglie عام 1923 أنّ للأجسام الماديّة طبيعة موجيّة. واستخدم العلاقة السابقة في حساب الطول الموجيّ لجسم ما على النحو الآتي:

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

حيث λ: طول موجة دي بروي، ويُطلق عليها اسم الموجة المصاحِبة للجسم.

h: ثابت بلانك.

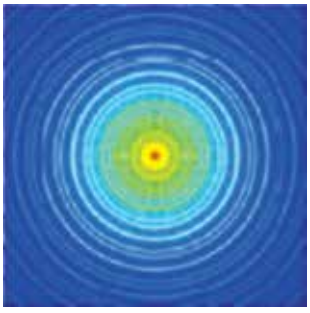
p: مقدار الزخم الخطّي للجسم.

m: كتلة الجسم.

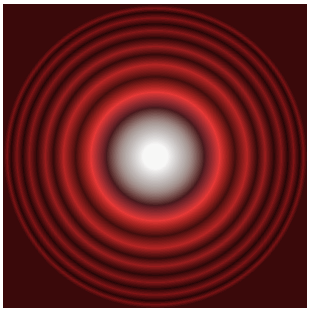
v: سرعة الجسم.

ومن الجدير بالذكر أنّ الموجات المصاحِبة للأجسام ليست موجات ميكانيكية أو كهرمغناطيسية، وهي ذات أهميّة كبيرة في مجال فيزياء الكمّ. وعند حساب طول موجة دي بروي المصاحِبة لجسم كبير (جاهري)، نجد أنّها صغيرة جدًّا بل أصغر بكثير من أبعاد الجسم. وفي المقابل، فإنّ طول موجة دي بروي المُصاحِبة لجُسيم صغير مثل الإلكترون قريب من قيمة المسافة الفاصلة بين الذرات في الموادّ الصُّلبة. بعد ثلاث سنوات من وضع دي بروي لفرضيته تمكن العالمان دافسون Davisson و جيرمر Germer من الكشف عن الطبيعـة الموجيّـة للإلكترونـات عمليا، حيث أسقط العالمان حزمة مسرعة من الالكترونات على بلورة من النيكل. طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترونات المسرّعة قريب من قيمة المسافة الفاصلة بين ذرات بلورة النيكل ما أدى الى ظهور نمط حيود للإلكترونات كما هو مبين في الشكل (16/ أ). هذا النمط شبيه بحيود موجات الضوء المبين في الشكل (16/ ب) عند سقوط حزمة ضوء على فتحة دائرية.

✓ **أتحقّق:** أذكر فرضيّة دي بروي.



(أ)



(ب)

الشكل (16): نمط حيود
(أ) إلكترونات أُسقطت على بلورة من النيكل،
(ب)حزمة ضوئية أُسقطت على فتحة دائريّة.

وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي

الربط بعلوم الحياة

في المجهر الإلكتروني تُستخدم الإلكترونات بدلا من الضوء المرئي لتكوين صور مكبرة جدا للعينات. ويعتمد المجهر الإلكتروني في عمله على الطبيعة الموجية للجسيمات. وضوح الصور التي يكونها المجهر يعتمد على الطول الموجي للضوء المستخدم في الكشف عن العينة المراد دراستها؛ فالكشف عن التفاصيل الدقيقة للخلايا والفيروسات يتطلب استخدام موجات ذات طول موجي صغير. في المجهر الإلكتروني تستخدم موجات الإلكترونات بدلا من الضوء المرئي، حيث يكون طول موجة دي بروي للإلكترونات المسرَّعة صغير جدا؛ عادةً ما تكون الأطوال الموجية للإلكترونات أقصر 100 مرة تقريبًا من الأطوال الموجية للضوء المرئي المستخدم في المجاهر الضوئية، ونتيجة لذلك، فإن المجهر الإلكتروني المزوَّد بعدسات مثالية سيكون قادرًا على تمييز التفاصيل الدقيقة أكبر بمقدار 100 مرة تقريبًا من تلك التي يميزها المجهر الضوئي.

المثال 13

أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة لكلّ ممّا يأتي:

أ . إلكترون سرعته $1.00 \times 10^6\ \text{m/s}$.

ب. رصاصة كتلتها $m_b = 50.0\ \text{g}$ تتحرك بسرعة $v_b = 400\ \text{m/s}$.

المُعطيات: $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s},\ m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg},\ v_e = 1.00 \times 10^6\ \text{m/s}$

$m_b = 50.0 \times 10^{-3}\ \text{kg},\ v_b = 400\ \text{m/s}$

المطلوب: $\lambda_e = ?,\ \lambda_b = ?$

الحلّ:

أ. $$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 1.00 \times 10^6} = 7.27 \times 10^{-10}\ \text{m} = 0.727\ \text{nm}$$

أُلاحظ أنّ طول موجة دي بروي المصاحِبة للإلكترون تقارِب المسافة الفاصلة بين الذرات في البلورات، لذلك يمكن ملاحظة نمط الحيود للإلكترونات كما في تجربة دافسون وجيرمر.

ب. $$\lambda_b = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{50.0 \times 10^{-3} \times 400} = 3.32 \times 10^{-35}\ \text{m} = 3.32 \times 10^{-26}\ \text{nm}$$

من الواضح أنّ طول موجة دي بروي المصاحبة للرصاصة صغير جدًّا حتى مع المقارنة بالمسافات الفاصلة بين الذرات في البلورات، لذلك لا يمكن مشاهدة نمط حيود للأجسام الجاهريّة.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 14

تسارع إلكترون من السكون بفرق جهد مقداره (2.7 V) ، أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة له عند نهاية مدّة تسارُعه.

المُعطيات: $v_i = 0,\ h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s},\ m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg},\ \Delta V = 2.7\ \text{V}$

المطلوب: $\lambda_e = ?$

الحلّ:

أجد مقدار السرعة النهائيّة للإلكترون من العلاقة الآتية:

$$KE = \frac{1}{2} m_e v^2 = e\,\Delta V$$

$$\frac{1}{2} \times 9.11 \times 10^{-31} \times v^2 = 1.6 \times 10^{-19} \times 2.7$$

$$v = 0.97 \times 10^6\ \text{m/s}$$

ثم أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة له:

$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 0.97 \times 10^6} = 7.5 \times 10^{-10}\ \text{m} = 0.75\ \text{nm}$$

تمرين

1. **أستخدم الأرقام:** طول موجة دي بروي لحزمة من الإلكترونات يساوي (2.24×10^{-10} m). أجد فَرْق الجهد المستَخدم في تسريع الإلكترونات.
2. **أستخدم الأرقام:** كرة تنس أرضي كتلتها (60 g) وقطرها (6.5 cm)، تتحرك بسرعة (25 m/s).
   أ . أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة لها.
   ب. أقارن بين طول موجة دي بروي وقطر كرة التنس.

قيد الإعداد والمراجعة

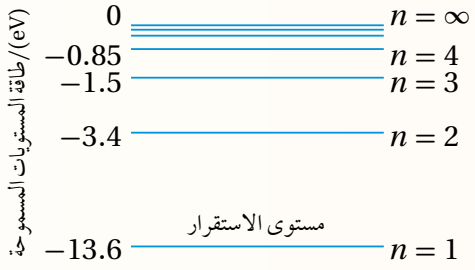
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بكلٍّ من: طيف الامتصاص الخطّي، طيف الانبعاث الخطّي.

2. **أُصنِّف** الكميّات الفيزيائيّة الآتية: (الطول الموجيّ، التردّد، الطاقة، الزخم الخطّي) من حيث ارتباطها بالطبيعة الموجيّة أو الجُسيميّة للمادّة.

3. **أستنتج:** إلكترون في مستوى الطاقة الرابع لذرّة الهيدروجين، ما الانتقالات التي يمكن أن يفقد بها الإلكترون طاقته، أوضّح ذلك على رَسْم لمستويات الطاقة.

4. **أستخدم الأرقام:** إلكترون موجود في مستوى الاستقرار لذرة الهيدروجين. بالاعتماد على مخطط مستويات الطاقة المبين في الشكل المجاور، أجيب عن الأسئلة الآتية:

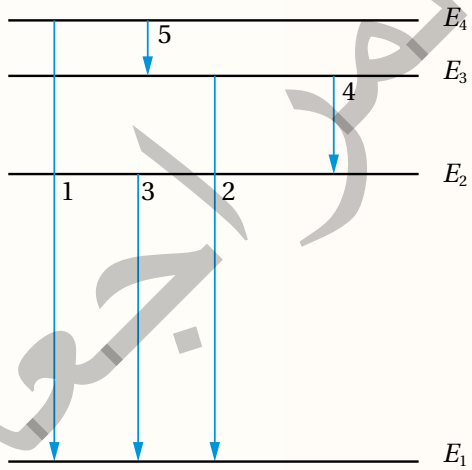


أ . أجد أصغر ثلاث قيم للطاقة يمكن لهذا الإلكترون أن يمتصّها.

ب. أحسب طول موجة الإشعاع اللازم لنقل الإلكترون من مستوى الاستقرار إلى مستوى الطاقة الثالث.

جـ. ما المستوى الذي ينتقل إليه الإلكترون إذا امتص فوتونا طاقته (12.75 eV)؟

5. **أستنتج:** يمثّل الشكل المجاور مستويات الطاقة المسموح بها لإلكترون في ذرّة ما، والانتقالات بين مستويات الطاقة (الأرقام من 1 إلى 5).



أ . أيّ الانتقالات ينتج عنه انبعاث فوتون بأكبر طول موجيّ؟

ب. أيّ الانتقالات ينتج عنه انبعاث فوتون بأكبر طاقة؟

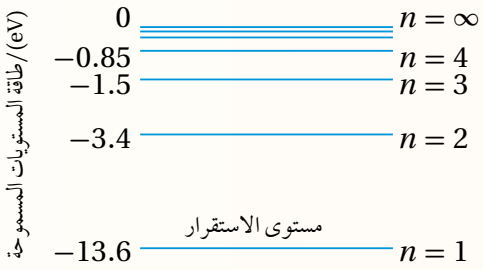
جـ. أيّ الانتقالات ينتج منه انبعاث فوتون بأقلّ تردّد؟

6. **أستخدم الأرقام:** بروتون طاقته الحركية (10 MeV)، أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة له حيث كتلة البروتون $(1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})$.

قيد الإعداد والمراجعة

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

* اعتمادا على مخطط مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين



أجب عن الفقرتين الآتيتن:

1. إلكترون في ذرة الهيدروجين في مستوى الاستقرار.

إذا سقط عليه فوتون طاقته (12.1 eV)، فإنّ الإلكترون:

أ . يمتص الفوتون ويتحرر من الذرة.

ب. يمتص الفوتون وينتقل إلى مستوى الطاقة الثالث.

جـ. لا يمتص الفوتون ويبقى في مستوى الاستقرار.

د . يمتص الفوتون ويبقى في مستوى الاستقرار.

2. ظهر خط معتم في طيف الامتصاص لذرة الهيدروجين عند التردد (6.16×10^{14} Hz)، فإن مستويي الطاقة اللذين انتقل الإلكترون بينهما ليظهر هذا الخط المعتم:

أ . الأول والثاني ب. الثاني والثالث جـ. الثالث والرابع د. الثاني والرابع

3. الزخم الزاوي لإلكترون ذرة الهيدروجين عندما يتواجد في المستوى الثاني :

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

4. إلكترون في ذرة الهيدروجين في مستوى الاستقرار. امتص الإلكترون فوتونًا طاقته (20.4×10^{-19} J) فانتقل إلى مستوى إثارة. الزخم الزاوي للإلكترون في المستوى الذي انتقل إليه:

أ . $\hbar$ ب. $2\hbar$ جـ. $3\hbar$ د. $4\hbar$

5. إلكترون وبروتون يتحركان بالسرعة نفسها، طول موجة دي بروي للإلكترون:

أ . أكبر من طول موجة دي بروي للبروتون؛ لأن كتلة الإلكترون أقل.

ب. أقل من طول موجة دي بروي للبروتون؛ لأن كتلة الإلكترون أقل.

جـ. مساوية لطول موجة دي بروي للبروتون؛ لأن لهما السرعة نفسها.

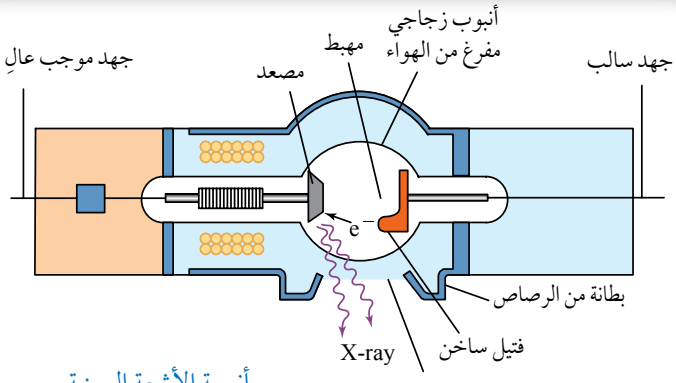
د . أقل من طول موجة دي بروي للبروتون؛ لأن شحنته سالبة.

قيد الإعداد والمراجعة

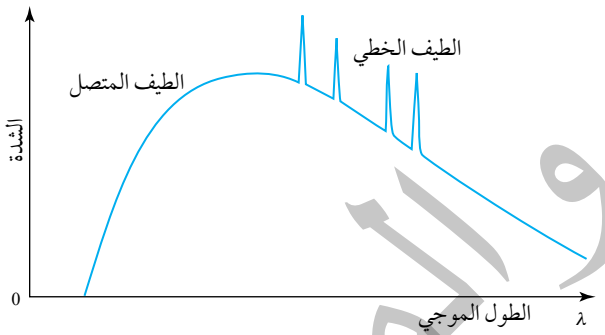
الفيزياء والطبّ: الأشعة السينيّة
Physics in Medicine: X-Ray

لاحظ العالم رونتغن أنّ أشعة ذات طاقة كبيرة (أطوال موجيّة قصيرة $\lambda = 10^{-11} - 10^{-8}\ m$)تنبعث من سطح فلزّ عند اصطدام إلكترونات ذات طاقة عالية به، أطلق عليها اسم الأشعة السينيّة X–ray.

ويتكوّن أنبوب الأشعة السينيّة المبيَّن في الشكل المجاور من أنبوب مفرَّغ من الهواء يحتوي فتيلًا فلزيًّا تنبعث منه إلكترونات عند تسخينه. تُسرَّع الإلكترونات المنبعِثة من الفتيل باستخدام فَرْق جهد كهربائي كبير لتصطدم بعدها بالمِصعد، وهو مادّة فلزيّة فتنبعث منه الأشعة السينيّة. وقد وجد أنّ طيف الأشعة السينية يتكوّن من طيف متّصل وطيف خطّي كما في الشكل المجاور. عند اقتراب الإلكترونات المُسرَّعة من ذرات المِصعد تتباطأ بفعل القوّة الكهربائية، وتفقد جزءًا من طاقتها الحركية التي تظهر على هيئة أشعة كهرمغناطيسية ذات طاقة متّصلة. وقد يصطدم أحد الإلكترونات المُسرّعة بأحد الإلكترونات في مستويات الطاقة الداخلية لذرّة المصعد فيحرّره، ونتيجة لذلك، ينتقل إلكترون من المستويات الخارجية للطاقة لملء الفراغ الذي نتج من تحرير الالكترون في أحد مستويات الطاقة الداخلية (القريبة من النواة). ويصاحِب ذلك انبعاث فوتون بطاقة محدّدة تساوي فرق الطاقة بين المستويين، ويظهر ذلك على هيئة طيف خطّي في طيف الأشعة السينيّة.



أنبوبة الأشعة السينية



الطيف الخطّي المتصل للأشعة السينية.

تمتاز الأشعة السينيّة بقدرتها على النفاذ في الأوساط المادّية، ويعتمد ذلك على الوسط، فمثلًا، قدرتها على النفاذ خلال الكتلة العضلية تكون أكبر من قدرتها على النفاذ خلال العظام؛ ولهذا السبب استُخدمت الأشعة السينيّة في الطبّ لتصوير عظام جسم الإنسان كما في الشكل المجاور، والتحقّق من وجود كسور فيها.

صورة مأخوذة عن طريق الأشعة السينيّة للقفص الصدري.

قيد الإعداد والمراجعة

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

1. تكون شدّة الطاقة المنبَعثة من جسم أسود درجة حرارته مقارِبة لدرجة حرارة الشمس:
   أ . أكبر ما يمكن عند الأطوال الموجيّة الكبيرة جدًّا للإشعاع.
   ب. أكبر ما يمكن عند الأطوال الموجيّة القصيرة جدًّا للإشعاع.
   جـ. أكبر ما يمكن في منطقة الأطوال الموجيّة للضوء المرئي.
   د . متساوية عند جميع الأطوال الموجيّة للإشعاع.

2. وَفْقًا لتصوّر الفيزياء الكلاسيكية للظاهرة الكهرضوئية:
   أ . تنبعث الإلكترونات انبعاثًا فوريًا بمجرد سقوط الأشعة على سطح الفلز.
   ب. تزداد الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة بزيادة تردُّد الأشعة الساقطة.
   جـ. يستغرق تحرُّر الإلكترونات بعض الوقت حتى تتمكّن من اكتساب الطاقة اللازمة للتحرّر.
   د . لا تتحرّر الإلكترونات من سطح الفلزّ عند التردّدات العالية للضوء.

3. نسبة الزخم الخطي (p) لفوتون إلى طاقته (E)؛ ($\frac{p}{E}$) تساوي:
   أ . $\frac{1}{c}$ ب. $\frac{1}{h}$ جـ. $\frac{h}{c}$ د . $\frac{c}{h}$

4. إذا تضاعف الطول الموجيّ للفوتون مرتين فإنّ طاقته:
   أ . تقلّ إلى النصف وكذلك زخمه الخطي. ب. تبقى ثابتة ويقلّ زخمه الخطي إلى النصف.
   جـ. تتضاعف مرتين ويبقى زخمه الخطي ثابتًا. د . تبقى ثابتة ويبقى زخمه الخطي كذلك.

5. يُحسب الزخم الخطي (p) للفوتون من إحدى العلاقات الآتية:
   أ . mv ب. $\frac{E}{c}$ جـ. Ec د. $\frac{h}{f}$

6. جسم متوهج يُصدر إشعاعًا كهرمغناطيسيًا تردده (1.2×10^{15} Hz)، إن طاقة الكمة الواحدة من هذا الإشعاع بوحدة إلكترون فولت (eV) تساوي:
   أ . 9.3 ب. 7.6 جـ. 5.0 د. 3.0

7. إذا انتقل إلكترون من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الثاني في ذرّة الهيدروجين، فإنّ الفرق في الزخم الزاويّ للإلكترون بحَسَب نموذج بور هو:
   أ . $\hbar$ ب. $4\hbar$ جـ. $3\hbar$ د. $2\hbar$

8. مقدار طول موجة الفوتون الممتص عند انتقال إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة ($n = 2$) إلى مستوى الطاقة ($n = \infty$) بدلالة ثابت ريديرغ (R_H) يساوي:
   أ . $\frac{2}{R_H}$ ب. $\frac{4}{R_H}$ جـ. $\frac{R_H}{2}$ د. $\frac{R_H}{4}$

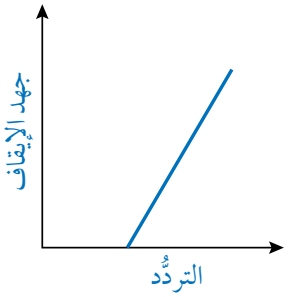
قيد الإعداد والمراجعة

9. أُسقط فوتونان مختلفان في التردّد على الفلزّ نفسه، فانطلق إلكترونان متساويان في الطاقة الحركيّة. فإنّ ذلك يعود إلى اختلاف:

أ . عمق الإلكترونين في الفلزّ. ب. اقتران الشغل.

جـ. مساحة سطح الفلز. د . شدّة الضوء.

10. يمثّل الرسم البياني المجاور العلاقة بين جهد الإيقاف وتردُّد الضوء الساقط في الخلية الكهرضوئية، ميل هذه العلاقة هو:



أ . h ب. $\frac{e}{h}$

جـ. $\frac{h}{e}$ د. $\frac{\Phi}{h}$

* عند سقوط (1.0×10^8) فوتون في وحدة الزمن على سطح فلز اقتران الشغل له (3.3 eV)، وطاقة كل فوتون منها (6.0 eV)، أجيب عن الفقرتين الآتيتين:

11. أكبر عدد من الإلكترونات يمكن أن يصل إلى الجامع في وحدة الزمن يساوي:

أ . 1.0×10^8 ب. 1.0×10^4 جـ. 3.3×10^6 د. 2.7×10^6

12. الطاقة الحركية العظمى للإلكترون بوحدة (J):

أ . 2.7 ب. 9.3 جـ. 1.67×10^{19} د . 4.3×10^{-19}

13. إحدى القيم الآتية للزخم الزاوي لإلكترون ذرة الهيدروجين لا تسمح له بالبقاء في مدارات الذرة:

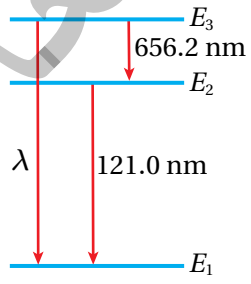
أ . $(1.06 \times 10^{-34}\ \text{J.s})$ ب. $(2.06 \times 10^{-34}\ \text{J.s})$

جـ. $(3.18 \times 10^{-34}\ \text{J.s})$ د . $(4.24 \times 10^{-34}\ \text{J.s})$

14. إلكترون كتلته (m) وشحنته (e)، تسارع من السكون بفرق جهد مقداره (ΔV). طول موجة دي بروي المصاحبة له عند نهاية مدة تسارعه:

أ . $\frac{\sqrt{2e\Delta Vm}}{h}$ ب. $\frac{h}{\sqrt{2e\Delta Vm}}$ جـ. $h\sqrt{2e\Delta Vm}$ د . $\frac{h}{m\sqrt{2e\Delta V}}$

15. يوضح الشكل المجاور مستويات الطاقة في ذرة هيدروجين مثارة والأطوال الموجية للفوتونات المنبعثة نتيجة انتقالات الإلكترون من مستويات طاقة أعلى إلى مستويات طاقة أقل. الطول الموجي (λ) بوحدة (nm) للفوتون الناتج عن انتقال الإلكترون من المستوى الثالث إلى المستوى الأول يكون:



أ . $\lambda < 121.0$ ب. $\lambda > 656.2$

جـ. $121.0 < \lambda < 656.2$ د . $\lambda = 777.2$

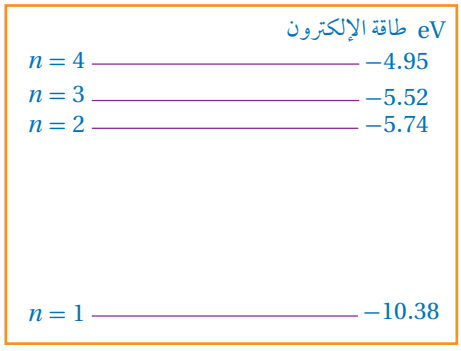
2. **أستنتج:** الأجسام كلّها في الغرفة تبعث أشعّة كهرمغناطيسيّة، فلماذا لا نستطيع رؤية هذه الأجسام في غرفة مُعتمة؟

3. **أستخدم الأرقام:** سقط ضوء طول موجته (300 nm) على سطح فلزّ اقتران الشغل له (2.2 eV). أجد ما يأتي:
   أ . تردُّد العتبة للفلزّ.
   ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

4. **أستنتج:** إلكترون في مستوى الاستقرار لذرّة الهيدروجين، أوضح ما يحدث للإلكترون إذا سقط عليه فوتون طاقتُه:
   أ . 7.0 eV
   ب. 12.1 eV
   جـ. 20.0 eV

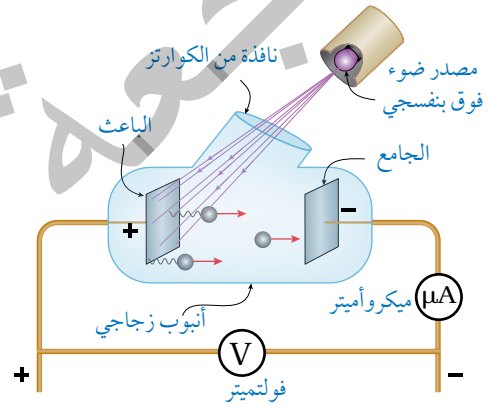
5. **أستنتج:** إلكترون في مستوى الطاقة الثالث لذرّة الهيدروجين، ما قيم الطاقة التي يمكن أن يخسرها الإلكترون؟

6. **أستنتج:** يبيّن الشكل المجاور مخططًا يوضح بعض مستويات الطاقة لإلكترون في ذرّة الزئبق:
   أ . أجد أعلى طاقة فوتون يمكن أن ينبعث من الانتقالات بين هذه المستويات.
   ب. أجد أقلّ طاقة فوتون يمكن أن ينبعث من الانتقالات بين هذه المستويات.



7. **أستخدم الأرقام:** ظهر خط مُعتم في طيف الامتصاص لذرّة الهيدروجين عند التردّد (6.15×10^{14} Hz)، مُعتمدًا على مستويات الطاقة لذرّة الهيدروجين، أُبيّن بالحسابات بينَ أيّ مستويي طاقة انتقل الإلكترون ليظهر هذه الخط المعتم.

8. **التفكير الناقد** يمثّل الشكل المجاور تجربة لدراسة الظاهرة الكهرضوئية أجراها العالم لينارد، وكان تردُّد الضوء الساقط (8×10^{14} Hz). اعتمادًا على ذلك، أُجيب عمّا يأتي:
   أ . أُبيِّن ماذا يحدث لقراءة الميكروأميتر عند زيادة فَرْق الجهد.
   ب. عند فَرْق جهد (2.0 V) أصبحت قراءة الأميتر (صفرًا). فماذا يُسمّى فَرْق الجهد في هذه الحالة؟
   جـ. أبين تأثير زيادة شدة الضوء في قراءة الميكروأميتر عندما تكون قراءته صفرًا.
   د . أبين تأثير زيادة تردُّد الضوء في قراءة الميكروأميتر عندما تكون قراءته صفرًا.
   هـ . كيف تعارضت النتائج في (جـ) و (د) مع الفيزياء الكلاسيكية؟
   و . أحسب تردُّد العتبة لفلزِّ الباعث.

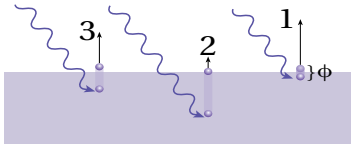


9. **أستخدم الأرقام:** يظهر في طيف امتصاص غاز الهيليوم (12) خط مُعتِم في منطقة الضوء المرئي: أحدُ الخطوط يقابل الطول الموجيّ (686.7 nm)، أحسُب الطاقة التي امتصها الإلكترون بوحدة (eV) لينتج هذا الخط.

10. **أستخدم الأرقام:** سقط ضوء على سطح فلزٍّ، فكانت الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المنبعثة (2 eV)، وكان أكبر طول موجيّ للضوء الساقط يتطلّبه تحرير إلكترونات من سطح الفلزّ يساوي (682 nm). أحسب ما يأتي:

أ . اقتران الشغل للفلز. ب. فَرْق جهد الإيقاف.

11. **أُفسِّر:** يبيّن الشكل المجاور توضيحًا بسيطًا للتصوّر الذي وضعه أينشتين للظاهرة الكهرضوئية.



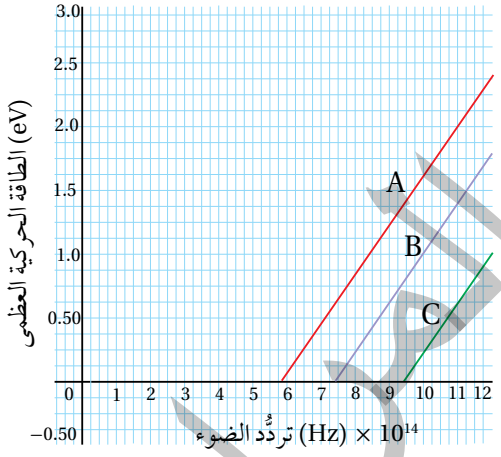
أ . ما فرضيته في ما يتعلق بالضوء؟

ب. ما علاقة عدد الإلكترونات المتحرّرة بشدة الضوء الساقط على الفلزّ؟

جـ. أُرتِّب الطاقة الحركية للإلكترونات المتحرّرة (1،2،3) من الأصغر إلى الأكبر.

د . كيف فسّر أينشتين التفاوت في الطاقة الحركية للإلكترونات المتحرّرة؟

12. **أُحلِّل رسمًا بيانيًّا:** يمثّل الشكل المجاور رسمًا بيانيًّا لتغيّر الطاقة الحركيّة العظمى مع تردُّد الضوء الساقط لثلاثة فلزّات مختلفة، اعتمادًا على الشكل أجيب عمّا يأتي:



أ . أُفسِّر توازي المنحنيات الثلاثة.

ب. أجد ثابت بلانك بوَحْدتَي (eV.s) و (J.s) (أستخدم الخط A).

جـ. أجد اقتران الشغل للفلزِ (A).

د . إذا سقط ضوء تردّده (8×10^{14} Hz)، أُحدّد أيّ الفلزات الثلاثة تنطلق منه إلكترونات ضوئية. وأيّها تنطلق منه الإلكترونات ذات الطاقة الحركية الأكبر.

هـ. أُرتِّب اقتران الشغل للفلزات تصاعديًّا من الأصغر إلى الأكبر.

13. **أستخدم الأرقام:** إذا كان الطول الموجيّ لفوتون قبل الاصطدام بإلكترون حرّ ساكن (60×10^{-9} m)، وبعد الاصطدام به صار (80×10^{-9} m)، أحسب ما يأتي:

أ . الزخم الخطيّ للفوتون قبل التصادم.

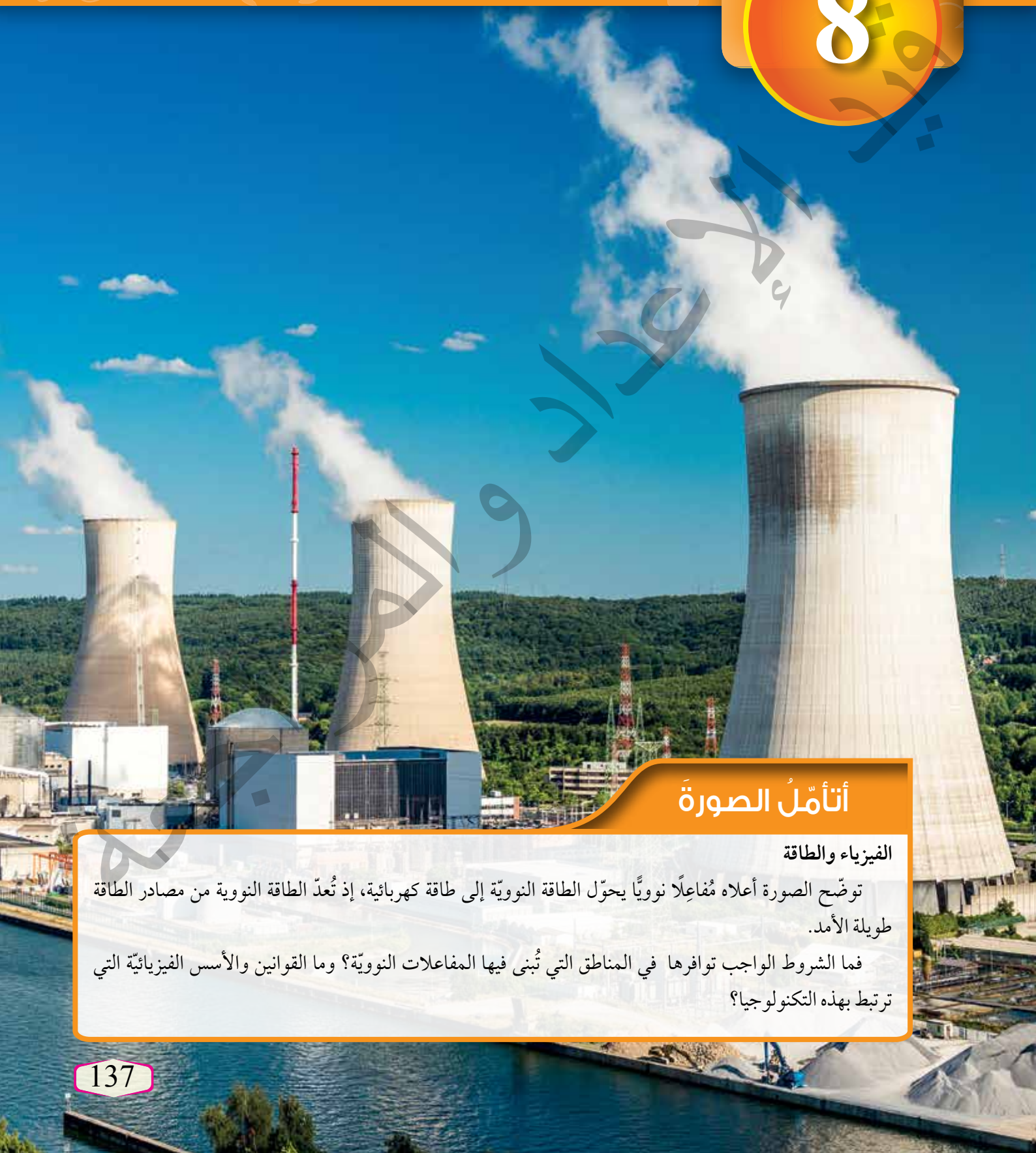
ب. الطاقة التي اكتسبها الإلكترون في أثناء عملية التصادم.

14. **أفسر:** سقطت حزمتان ضوئيتان بتردّدين مختلفين (f_1, f_2) على سطحي فلزّين مختلفين على الترتيب (X, Y)، اقتران الشغل لهما ($\Phi_X > \Phi_Y$)، فتحرّرت إلكترونات لها الطاقةُ الحركية العظمى نفسُها من سطحي الفلزّين، فأيُّ الحزمتين تردّدها أكبر؟ أُفسِّر إجابتي.

الوَحْدة 8

الفيزياء النوويّة

Nuclear Physics



أتأمّلُ الصورةَ

الفيزياء والطاقة

توضّح الصورة أعلاه مُفاعِلًا نوويًّا يحوّل الطاقة النوويّة إلى طاقة كهربائية، إذ تُعدّ الطاقة النووية من مصادر الطاقة طويلة الأمد.

فما الشروط الواجب توافرها في المناطق التي تُبنى فيها المفاعلات النوويّة؟ وما القوانين والأسس الفيزيائيّة التي ترتبط بهذه التكنولوجيا؟

الفكرةَ العامةُ:

للفيزياء النوويّـة تطبيقات كثيرة في حياتنـا تشمل تـوليـد الطاقـة الكهربائيـة، وتشخيص الأمراض وعلاجها، وتدخل في كثير من التطبيقات الصناعية.

الدرسُ الأولُ: تركيب النواة وخصائصها

Nucleus Structure and its Properties

الفكـرةُ الرئيسـةُ: تتكـوّن النـواة مـن بروتونـات ونيوترونـات. وفـي الطبيعـة بعض النـوى تكون مسـتقرة، وبعضهـا الآخـر يكـون مُشـعًّا.

الدرسُ الثاني: الإشعاع النوويّ الطبيعي

Natural Nuclear Radiation

الفكـرةُ الرئيسـةُ: تبعـث النـوى غيـر المسـتقرة إشـعاعات بطاقـات مختلفة، ولهذه الإشـعاعات مزايـا ولهـا أيضًـا أخطار.

الدرس الثالث: التفاعلات النوويّة

Nuclear Reactions

الفكرة الرئيسة: للتفاعلات النوويّة تطبيقات مُهِمّة في الحياة مثل توليد الطاقة، وإنتاج النظائر المُشعّة التي تُستخدم في تشخيص الأمراض وعلاجها، وفي كثير من التطبيقات الصناعية.

نمذجة التفاعل المتسلسل

(أ)

(ب)

المواد والأدوات: 15 قطعة من قطع الدومينو، ساعة توقيت.

إرشادات السلامة: عدم اللعب بالقطع، أو رميها باتجاه الزملاء/ الزميلات.

خطوات العمل:

أُنفِّذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

النموذج الأول:

1. أُرتِّب قطع الدومينو كما في الشكل (أ)، على أن تكون كل قطعة مواجِهة لقطعتين من الدومينو.
2. **أقيس:** أضرب بسبّابتي الطرف العلوي للقطعة الأولى على أن تسقط نحو القطعتين المقابِلتين لها، ثم أقيس الزمن اللازم لسقوط القطع جميعها، ثم أسجّل الزمن في الجدول.
3. أُكرِّر الخطوتين السابقتين ثلاث مرات، ثم أحسب متوسط الزمن.

النموذج الثاني:

4. **أقيس:** أُرتِّب قطع الدومينو مرة أخرى كما في الشكل (ب) على أن تُسقِط القطعة الأولى قطعتي الدومينو في الصف الثاني، وتُسقِط قطعة واحدة من الصف الثاني قطعتي الدومينو في الصف الثالث، وهكذا دواليك. ثم أقيس الزمن اللازم لسقوط القطع جميعها، ثم أسجّل الزمن في الجدول.
5. أُكرِّر الخطوة السابقة ثلاث مرات لحساب متوسط الزمن اللازم لسقوط القطع جميعها.

التحليل والاستنتاج:

1. **أقارن** بين المتوسط الزمني لسقوط القطع جميعها في النموذجين.
2. **أستنتج:** أفترض أنّ كل قطعة دومينو تنتج طاقة عند سقوطها. فأيّ النموذجين تكون كميّة الطاقة الناتجة في وَحْدة الزمن أكبر؟
3. **أتوقع:** أتخيّل أنّ كل قطعة دومينو تسقط تمثّل انشطار نواة، فأيّ النموذجين يمثّل تفاعلًا يمكن السيطرة عليه؟

قيد الإعداد والمراجعة

تركيب النواة وخصائصها
Nucleus Structure and its Properties

الفكرةُ الرئيسةُ:

تتكوّن النواة من بروتونات ونيوترونات. وفي الطبيعة بعض النوى تكون مستقرة، وبعضها الآخر يكون مشعًّا.

نتاجاتُ التعلّمِ:

- أميز بين مكونات النواة(النيوكليونات) من حيث الكتلة والشحنة.
- أعبر عن خصائص النواة (نصف القطر، الحجم، الكتلة، الكثافة) بمعادلات رياضية.
- أفسر أهمية القوة النووية في استقرار النواة.
- أُحلِّل منحنى الاستقرار النووي.
- أحسب طاقة الربط النووي لكل نيوكليون ودورها في تحديد النوى الأكثر استقرارا.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

نيوكليون	Nucleon
النظائر	Isotopes
وَحْدة الكتلة الذريّة	Atomic Mass Unit
نطاق الاستقرار	Stability Valley
طاقة الربط النوويّة	Nuclear Binding Energy
قوة نوويّة قوية	Strong Nuclear Force

بِنية النَّواة Structure of the Nucleus

تتكوّن الذّرّة من نواة موجبة الشحنة تتحرّك حولها إلكترونات سالبة الشحنة، ونظرًا إلى أنّ الذّرّة متعادلة كهربائيًّا، فإنّ شحنة النواة الموجبة تساوي عدديًّا شحنة الإلكترونات السالبة. وعلى الرغم من أنّ حجم النواة صغير جدًّا مقارنة بحجم الذّرّة، فإنّ معظم كتلة الذّرّة تتركز في النواة على نحو ما بيّنت نتائج تجربة رذرفورد.

تتكوّن النواة من نوعين من الجُسيمات؛ بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة، وكتلة النيوترون مقاربة لكتلة البروتون، ويُطلق اسم **نيوكليون Nucleon** على كلٍّ من البروتون والنيوترون.

يُطلق على عدد البروتونات داخل النواة اسم العدد الذري Atomic number ويُرمز إليه بالرمز Z في حين يُسمّى مجموع عدد البروتونات والنيوترونات داخل النواة العدد الكتلي Mass number ويُرمز إليه بالرمز A. والعدد الذري يعبّر عن شحنة النواة، ويساوي عدد الإلكترونات في الذّرّة المتعادلة. ويُعبَّر عن نواة أيّ عنصر برمزه الكيميائي، إضافة إلى عددها الذري وعددها الكتلي على النحو الآتي:

$${}^{A}_{Z}X$$

حيث X تمثّل الرمز الكيميائي للعنصر.

وتتساوى نوى عنصر معيّن في عددها الذري، ولكنّها قد تختلف في عددها الكتلي؛ بسبب اختلاف عدد النيوترونات فيها، وتُسمّى **نظائر Isotopes**. ومثال ذلك ${}^{12}_{6}C$ و ${}^{14}_{6}C$، وهي ذرات للعنصر(الكربون) نفسه كونها تمتلك العدد الذريّ نفسه.

ونظرًا إلى صغر كتل النوى، فإنّ وحدة الكيلوغرام (kg) غير مناسبة للتعبير عن كتلها؛ لذا عُرِّفت وحدة كتلة جديدة تتناسب مع كتل النوى تُسمّى **وَحْدة الكتلة الذرية Atomic mass unit (*amu*)**، وتساوي $\frac{1}{12}$ من كتلة نظير الكربون 12 $\left({}^{12}_{6}C\right)$:

$$1\ amu = 1.660539 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

ويوضّح الجدول (1) كتلة كل من البروتون والنيوترون والإلكترون، بوحدة الكيلوغرام ووحدة الكتل الذرية (*amu*) حيث أُضيف الإلكترون من أجل المقارنة.

✓ **أتحقّق:** أُعرّف العدد الكتليّ والعدد الذريّ للنواة.

الجدول (1):
كتلة كلٍّ من البروتون والنيوترون والإلكترون.

الجُسيم	الكتلة (kg)	الكتلة (*amu*)
إلكترون	9.1094×10^{-31}	0.000549
بروتون	1.672619×10^{-27}	1.007276
نيوترون	1.674929×10^{-27}	1.008665

خصائص النواة Properties of the Nucleus

معظم النوى شكلها كروي تقريبًا، وقد أثبتت التجارب العملية أنّ نصف قُطْر النواة (r) يتناسب مع الجذر التكعيبي لعددها الكتلي:

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

حيث r_0: ثابت يساوي تقريبًا 1.2×10^{-15} m

وعليه، فإنّ حجم النواة (V) يتناسب طرديًّا مع عددها الكتلي:

$$V = \frac{4\pi}{3} r^3 = \frac{4\pi}{3} r_0^3 A$$

ونظرًا إلى أنّ النواة تتكوّن من نيوكليونات (بروتونات ونيوترونات) كتلها متقاربة، فإنّه يمكن التعبير عن كتلة النواة بدلالة كتلة النيوكليون على النحو الآتي:

$$m = m_{\text{nuc}} A$$

حيث m_{nuc}: متوسط كتلة النيوكليون وتساوي تقريبًا $(1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg})$.

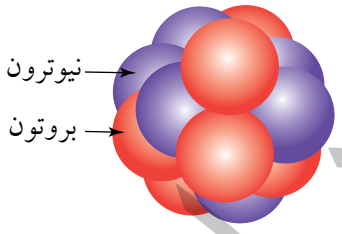
وبقسمة كتلة النواة على حجمها أجد أنّ كثافة النواة لا تعتمد على عددها الكتلي، وهذا يعني أنّ كثافة المادّة النووية عند مركز النواة متساوية في النوى جميعها، وهي كثافة كبيرة جدًّا تساوي تقريبًا $(2.3 \times 10^{17}\ \text{kg/m}^3)$، فلو افترضنا أنّ الأرض تتكون من مادّة نووية فقط (نيوكليونات) وكثافتها تساوي كثافة النواة، لكانت كرة نصف قطرها تقريبًا 180 m فقط.

أُفكّر: هل تختلف النظائر بعضها عن بعض في الخصائص الكيميائيّة أم الفيزيائية؟

أتحقّق: هل تزداد كثافة النواة بزيادة العدد الكُتْلي أم تبقى ثابتة؟

المثال 1

يمثّل الشكل (1) رَسْمًا تخطيطيًّا لنواة عنصر الكربون ورمزه C، حيث تمثّل الكرات الحمراء البروتونات، والكرات الزرقاء النيوترونات. باستخدام الشكل المجاور أجد ما يأتي: العدد الذريّ، الشحنة الكهربائية للنواة، عدد النيوترونات، العدد الكتلي، عدد النيوكليونات.



الشكل (1): نواة الكربون.

المُعطيات: الشكل

المطلوب: $Z = ?\ ,\ A = ?\ ,\ N = ?\ ,\ q = ?$

الحلّ:

العدد الذريّ يساوي عدد البروتونات وهو: $Z = 6$

الشحنة الكهربائية للنواة: $q = Ze = 6 \times 1.6 \times 10^{-19} = 9.6 \times 10^{-19}\text{C}$

عدد النيوترونات: $N = 6$

العدد الكُتْلي للنواة: $A = Z + N = 6 + 6 = 12$، وهو يساوي عدد النيوكليونات.

لذا تُكتب النواة على الشكل: ${}^{12}_{6}C$

قيد الاعداد والمراجعة

المثال 2

أجد لكلٍّ من النوى الآتية العدد الذريّ والعدد الكتليّ، وعدد النيوكليونات والنيوترونات، ثم أضعها في جدول:
${}^{16}_{8}O$, ${}^{17}_{8}O$, ${}^{206}_{82}Pb$, ${}^{208}_{82}Pb$

المُعطيات: ${}^{16}_{8}O$, ${}^{17}_{8}O$, ${}^{206}_{82}Pb$, ${}^{208}_{82}Pb$

المطلوب: Z , A , N

الحلّ:

النواة	Z	N	A	عدد النيوكليونات
${}^{16}_{8}O$	8	8	16	16
${}^{17}_{8}O$	8	9	17	17
${}^{206}_{82}Pb$	82	124	206	206
${}^{208}_{82}Pb$	82	126	208	208

المثال 3

أجد كتلة البروتون بوحدة الكتلة الذريّة.

المُعطيات: كتلة البروتون $m_p = 1.672622 \times 10^{-27}\ \text{kg}$ من الجدول (1).

المطلوب: $m_p = ?$ بوحدة amu.

الحلّ:

$$m_p = 1.672622 \times 10^{-27}\ \text{kg} \times \frac{1\ amu}{1.660539 \times 10^{-27}\ \text{kg}} = 1.007276\ amu$$

المثال 4

أجد نسبة نصف قطر النواة ${}^{A}_{Z_1}X$ إلى نصف قُطْر النواة ${}^{8A}_{Z_2}Y$.

المُعطيات: $A_X = A, A_Y = 8A$

المطلوب: $\frac{r_X}{r_Y}$

الحلّ:

$$\frac{r_X}{r_Y} = \frac{r_0\sqrt[3]{A_X}}{r_0\sqrt[3]{A_Y}} = \frac{\sqrt[3]{A}}{\sqrt[3]{8A}} = \frac{1}{\sqrt[3]{8}} = \frac{1}{2}$$

قيد الإعداد والمراجعة

نطاق الاستقرار Stability Valley

تتكـوّن النـواة من نيوترونـات متعادلة الشـحنة، وبروتونات موجبة الشـحنة محصـورة فـي حيّـز صغيـر جـدًّا، وتؤثـر البروتونـات بعضهـا فـي بعـض بقوة تنافـر كهربائيّـة. ولو كانـت قوة التنافـر الكهربائية هـي القوة الوحيـدة التي تؤثر فـي البروتونـات، لانفصلـت وابتعـد بعضها عـن بعض، فمـا الذي يمنـع النواة مـن التفكُّك؟

لا بـدّ مـن وجـود قـوة تجـاذب بيـن البروتونـات لتتغلّب علـى قـوة التنافر الكهربائيـة، وهـذه القـوة هـي **القـوة النوويـة القويّـة Strong nuclear force.** وسـنكتفي فـي هـذا الكتاب بتسـميتها قـوة نووية، وهي قـوة تجـاذب كبيرة بين النيوكليونـات، ولا تعتمـد علـى الشـحنة الكهربائية؛ أيْ أنّها تكـون قوة تجاذب بيـن: بروتون وبروتون، بروتـون ونيوترون، نيوترون ونيوتـرون. والقوة النووية قصيـرة المـدى لا يظهـر تأثيرهـا إلا إذا كانـت النيوكليونـات قريبة جـدًّا بعضها مـن بعـض. فـإذا زادت المسـافة بيـن نيوكليون وآخـر عن 3 fermi تقريبًـا، فإنّ القـوة النوويـة تنعـدم بينهما، علمًـا أنّ $(1\ \text{fermi} = 10^{-15}\ \text{m})$، حيث تُسـتخدم هـذه الوَحْـدة في الفيزيـاء النوويـة نظرًا إلـى أنّ أبعـاد النواة صغيـرة جدًا.

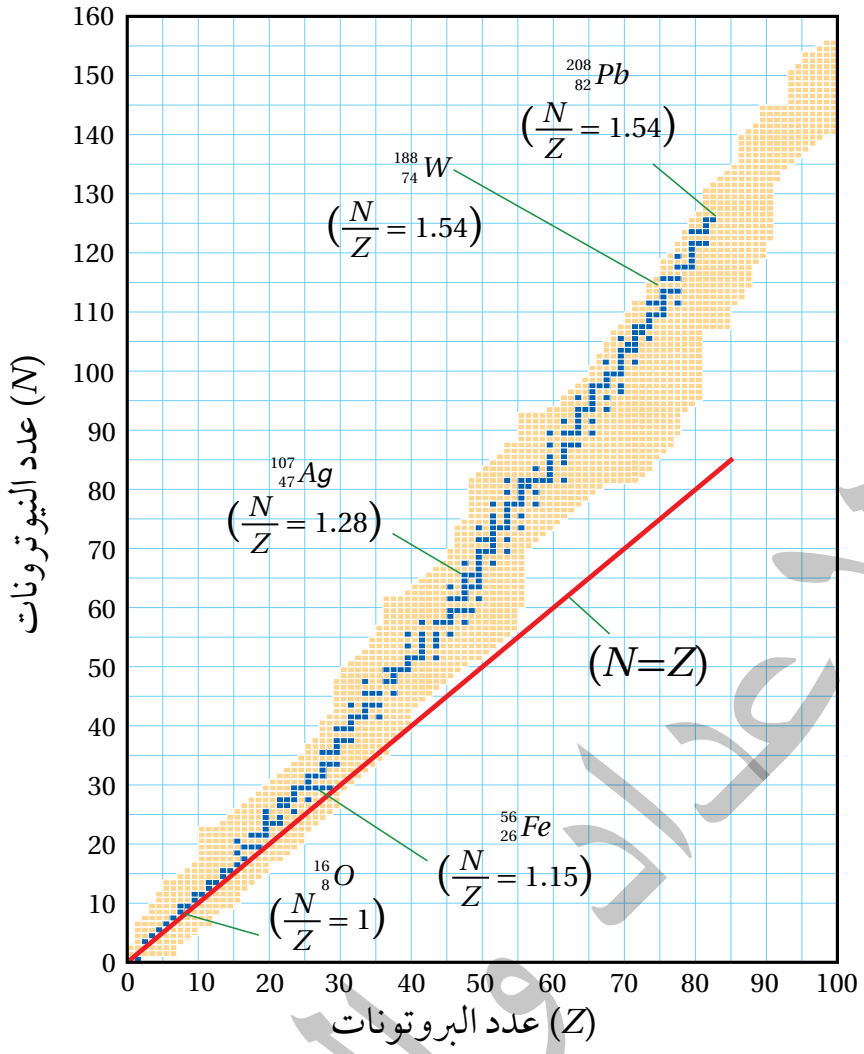
يوجـد فـي الطبيعـة العديـد مـن النـوى المسـتقرة التـي تبقـى علـى حالهـا بمـرور الزمـن، وتوجـد أيضًـا نوى أخـرى غير مسـتقرة قد تفقـد طاقة أو تشـعّ جُسـيمات نوويّـة، وتتحـوّل إلـى نـوًى أخـرى أكثـر اسـتقرارًا، علـى نحـو مـا سـأتعلّم لاحقًـا. فمـا الـذي يجعل بعـض النـوى مسـتقرًّا، وبعضهـا الآخر غير مستقر ؟

إنَّ اسـتقرار النـواة يخضـع لعوامـل عـدّة، أحدهـا نسـبة عـدد النيوترونات إلـى عـدد البروتونات فـي النـواة. باسـتثناء ذرة الهيدروجين التي تتكـون نواتها مـن بروتـون واحـد، لا يوجد نـواة مسـتقرة تحتوي علـى بروتونـات فقط؛ لأن قـوة التنافـر الكهربائيـة بيـن البروتونـات سـتؤدي إلى عدم اسـتقرار النـواة، أما النيوترونـات فهـي متعادلـة كهربائيا، لذا تسـهم في زيادة قوة التجـاذب النووية، مـا يـؤدي إلى اسـتقرار النـواة. وهذا يعني أنَّ نسـبة عـدد النيوترونـات إلى عدد البروتونـات عامـل مهـمّ في اسـتقرار النواة.

أُفكّر: أيّهمـا أكبـر القـوة النوويـة المؤثـرة فـي نيوكليـون موجـود على سـطح النواة أم المؤثّـرة في نيوكليون موجـود داخـل النـواة؟ أُفسِّـر ذلك.

أتحقّق: هل يمكن لنواة تحتوي على بروتونات فقط أن تكون مستقرة؟ أفسر إجابتي.

قيد الإعداد والمراجعة



الشكل (2): توزيع النوى بحَسَب عدد البروتونات والنيوترونات ونطاق الاستقرار.

عند تمثيل العلاقة بين عدد البروتونات وعدد النيوترونات للنوى بيانيًّا، نحصل على الشكل (2)، حيث مثّلت النوى المستقرة بنقاط زرقاء والنوى غير المستقرة مثلت بنقاط صفراء، وألاحظ من الشكل (2) أنّ النوى المستقرة تقع ضمن نطاق ضيق يُسمّى **نطاق الاستقرار** **Stability valley** .

ألاحظ أن الخط الأحمر المرسوم في الشكل (2) يحقق المعادلة $(N = Z)$، وألاحظ من الشكل أن النوى المستقرة التي عددها الذري $(Z \leq 20)$ تقع على الخط أو بالقرب منه؛ أي أن نسبة $\left(\frac{N}{Z}\right)$ لهذه النوى قريبة من (1). أما النوى المستقرة التي عددها الذري $(20 < Z \leq 82)$ فإن نسبة $\left(\frac{N}{Z}\right)$ لها أكبر من (1) وتزداد هذه النسبة بزيادة العدد الذري.

ولا توجد نوًى مستقرة عددها الذري $(Z > 82)$؛ لأنّ عدد البروتونات يصبح كبيرًا، ما يؤدي إلى زيادة قوة التنافر الكهربائية إلى حدٍّ يؤدي إلى عدم استقرار النواة.

✓ **أتحقّق:** كيف تتغير نسبة $\frac{N}{Z}$ التي تحقق الاستقرار للنوى مع تغير العدد الذري؟

قيد الإعداد والمراجعة

طاقة الربط النوويّة Nuclear Binding Energy

بيّن العالم أينشتين عام 1905 أنّ الطاقة (E) ترتبط بالكتلة (m) بالعلاقة الآتية:

$$E = mc^2$$

حيث c: سرعة الضوء في الفراغ $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$

E: الطاقة المكافئة للكتلة بوحدة الجول (J)

m: كتلة الجسم بوحدة (kg)

وتُسمّى العلاقة السابقة تكافؤَ (الكتلة – الطاقة).

عندما تقل كتلة جسم بمقدار Δm فإن هذا النقصان في الكتلة يتحول الى طاقة يمكن حسابها باستخدام العلاقة $E = \Delta mc^2$. كما يمكن للطاقة أن تتحول الى كتلة؛ فعندما تزداد كتلة جسم بمقدار Δm فإن الطاقة اللازمة لحدوث ذلك تعطى بالعلاقة السابقة. وهذه التغيّرات يمكن ملاحظتها على مستوى الأجسام الذريّة أو دون الذريّة (دون الجاهرية) على نحو ما هو موجود في التفاعلات النووية.

ونظرًا إلى أنّ سرعة الضوء كبيرة جدًّا، فإنّ تغيّرًا صغيرًا جدًّا في الكتلة ينتج عنه مقدار كبير من الطاقة. فتغيُّر الكتلة بمقدار ($1\ amu = 1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg}$) ينتج منه طاقة مقدارها ($1.494449 \times 10^{-10} \text{ J}$)، وهذا يساوي (931.5 MeV) تقريبًا، أيْ أنّ:

$$1\ amu = 931.5 \text{ MeV}$$

وبذلك عند استخدام الكتلة بوحدة (amu)، يمكن كتابة معادلة تكافؤ (الكتلة – الطاقة) على الصورة:

$$E = \Delta m \times 931.5 \text{ MeV}$$

ومن الناحية العمليّة، فهذه الصورة لمعادلة تكافؤ (الكتلة–الطاقة) هي المستخدمة في الحسابات النووية.

✓ **أتحقّق:** أكتب بالرموز علاقة تكافؤ (الكتلة – الطاقة).

ترتبط النيوكليونات داخل النواة بعضها ببعض بقوة التجاذب النووية القوية. ولفصل النيوكليونات بعضها عن بعض يجب تزويدها بطاقة تمكّنها من التغلّب على قوة التجاذب النووية. وتُعرّف **طاقة الربط النووية Nuclear binding energy (*BE*)** بأنّها الطاقة التي يجب تزويدها للنواة لفصل مكوّناتها (النيوكليونات) بعضها عن بعض نهائيًّا.

وزارة التربية والتعليم العالي

الجدول (2): طاقة الربط النووية وطاقة الربط لكل نيوكليون لبعض النوى.

النواة	A	BE (MeV)	BE/A (MeV)
ليثيوم $(^{7}_{3}Li)$	7	39.24	5.606
نيكل $(^{62}_{28}Ni)$	62	545.26	8.795
فضة $(^{107}_{47}Ag)$	107	915.26	8.554
رصاص $(^{206}_{82}Pb)$	206	1622.32	7.875

إنّ الفرق بين كتلة النواة ومجموع كتل مُكوِّناتها مضروبًا بمربع سرعة الضوء يساوي طاقة الربط النووية، ويُحسب فَرْق الكتلة من العلاقة الآتية :

$$\Delta m = Z\,m_p + N\,m_n - M$$

حيث M: كتلة النواة

m_p: كتلة البروتون

m_n: كتلة النيوترون

علمًا أنّ مجموع كتل مُكوِّنات النواة دائمًا أكبر من كتلة النواة.

وتُحسب طاقة الربط النووية (BE) بوحدة (MeV) لأيّ نواة من العلاقة الآتية:

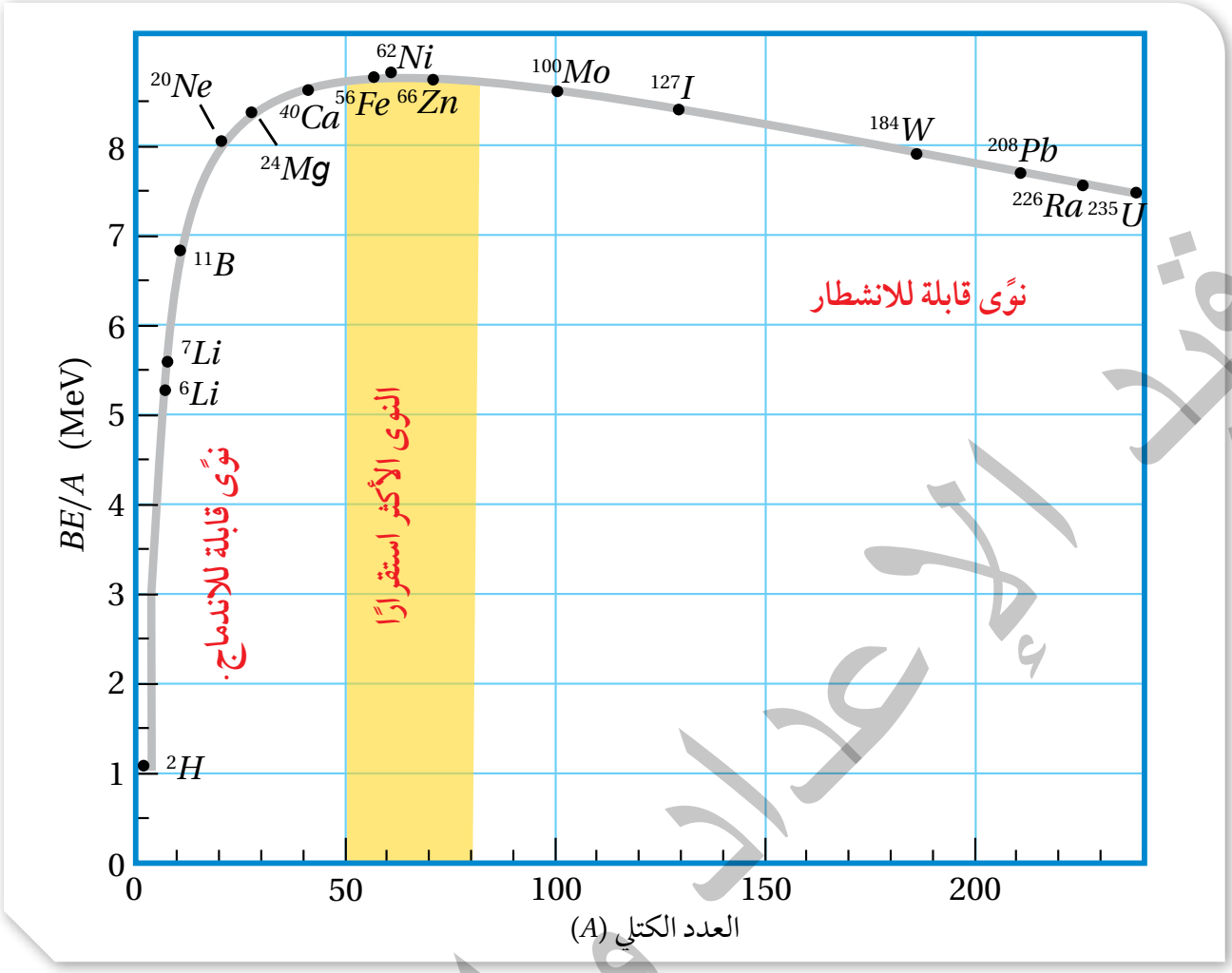
$$BE = \Delta m \times 931.5 = (Z\,m_p + N\,m_n - M) \times 931.5$$

ويبيّن الجدول (2) طاقة الربط النووية لبعض النوى، وعلى نحو ما هو متوقع، كلّما زاد عدد النيوكليونات، زادت الطاقة اللازمة لفصلها، أيْ زادت طاقة الربط النووية.

تعرّف طاقة الربط النووية لكل نيوكليون (BE/A) بأنها حاصل قسمة طاقة الربط النووية على عدد النيوكليونات (A) في النواة. وتعدّ مقياسا لمدى استقرار النواة. فنواة $(^{62}_{28}Ni)$ لها أكبر طاقة ربط نووية لكل نيوكليون (8.795 MeV)؛ لذا فهي أكثر استقرارًا من النوى الثلاث الأخرى المُبيَّنة في الجدول (2). فكلما زادت طاقة الربط النووية لكل نيوكليون، زاد استقرار النواة.

✓ **أتحقّق:**

إذا كان الفرق بين كتلة نواة ومجموع كتل مُكوِّناتها يساوي $(1.64 \times 10^{-28}\ \text{kg})$، أجد طاقة الربط النوويّة للنواة بوحدة الجول (J).



الشكل (3): منحنًى يمثل علاقة طاقة الربط النووية لكل نيوكليون بالعدد الكُتْلي.

الشكل (3) يوضح أن طاقة الربط النووي لكل نيوكليون (BE/A) قليلة للنوى الخفيفة مثل (^{2}H) وتتزايد بشكل ملحوظ مع زيادة العدد الكتلي إلى أن تصل أقصى قيمة لها عند عنصر النيكل (^{62}Ni). بعد ذلك تتناقص بشكل تدريجي مع الزيادة في العدد الكتلي.

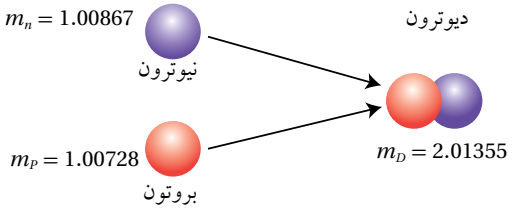
تسعى النوى لأن تكون أكثر استقرارا عن طريق زيادة قيمة (BE/A). لذلك تميل النوى الخفيفة للاندماج لتكوين نوى ذات عدد كتلي أكبر وطاقة الربط لكل نيوكليون لها أكبر، أما النوى الثقيلة فتميل للإنشطار وينتج عن ذلك نوى ذات عدد كتلي أقل وطاقة ربط لكل نيوكليون أكبر. إن اندماج نواتين خفيفتين أو انشطار نواة ثقيلة يحرّر طاقة؛ لأنّ النوى الناتجة في الحالتين ذات طاقة ربط نووية لكل نيوكليون أكبر.

✓ **أتحقّق:** أيّ النوى أكثر استقرارًا؟

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 5

تُسمّى نواة الديتيريوم بالديوترون ($_1^2H \equiv D$)، وتتكوّن من بروتون ونيوترون كما في الشكل (4)، أحسب فَرْق الكتلة بين كتلة الديوترون ومجموع كُتْلتي البروتون والنيوترون، ثم أحسب الطاقة المكافئة لها، مُعتمِدًا على الجدول الآتي:



الشكل (4): اندماج النيوترون والبروتون لتكوين الديوترون.

الجسيم أو النواة	الكتلة (amu)
m_p	1.00728
m_n	1.00867
m_D	2.01355

المُعطيات: الكتل في الجدول

المطلوب: $\Delta m = ?\ ,\ BE = ?$

الحلّ:

$$\Delta m = m_n + m_p - m_D = 2.01595 - 2.01355 = 0.00240\ amu$$

$$BE = \Delta m \times 931.5 = 0.00240 \times 931.5 = 2.24\ \text{MeV}$$

أُلاحظ أنّ مجموع كتلتي البروتون والنيوترون منفردين أكبر من كتلة الديوترون، فأين ذهب فَرْق الكتلة؟ عند اندماج البروتون والنيوترون لتكوين الديوترون يتحوّل فَرْق الكتلة إلى طاقة، وتساوي طاقة الربط النووي للديوترون.

المثال 6

إذا كان فَرْق الكتلة بين كتلة نواة ($_{82}^{208}Pb$) وكتلة مُكوِّناتها يساوي (2.90×10^{-27} kg)، أحسب طاقة الربط النووية للنواة بوحدة J وبوحدة MeV.

المُعطيات:

$$\Delta m = 2.90 \times 10^{-27}\ \text{kg},\ c = 3.0 \times 10^{8}\ \text{m/s},\ 1\ amu = 931.5\ \text{MeV}$$

المطلوب: BE بوحدة J وبوحدة MeV.

الحلّ:

بوحدة الجول

$$BE = \Delta m\, c^2 = 2.90 \times 10^{-27} \times (3.0 \times 10^{8})^2 = 2.6 \times 10^{-10}\ \text{J}$$

فريد الأعداد والمراجعة

لحساب الطاقة بوحدة (MeV)، أحوّل الطاقة من وحدة (J) إلى وَحْدة (MeV) على النحو الآتي:

$$BE = 2.6 \times 10^{-10}\,\text{J} \times \frac{1\,\text{e V}}{1.6 \times 10^{-19}\,\text{J}} = 1.6 \times 10^{9}\,\text{eV} = 1600\,\text{MeV}$$

المثال 7

أجد طاقة الربط النووية وطاقة الربط النووية لكلِّ نيوكليون لنواة كلٍّ من (الرصاص $^{206}_{82}Pb$ والليثيوم $^{7}_{3}Li$)، علمًا أنّ كتل النوى مرفقة في الجدول الآتي:

الجُسيم أو النواة	m_p	m_n	$m_{^{7}_{3}Li}$	$m_{^{206}_{82}Pb}$
الكتلة (amu)	1.00728	1.00867	7.01436	205.92945

المُعطيات: الجدول، $amu = 931.5\,\text{MeV}$

المطلوب: $BE=?,\ \ BE/A=?$

الحلّ:

$$\begin{aligned}
BE(Pb) &= (Z\,m_p + N\,m_n - M) \times 931.5 \\
&= (82 \times 1.00728 + 124 \times 1.00867 - 205.92945) \times 931.5 \\
&= 1.7426 \times 931.5 = 1623\,\text{MeV} \\
\frac{BE(Pb)}{A} &= \frac{1623}{206} = 7.878\,\text{MeV} \\
BE(Li) &= (Z\,m_p + N\,m_n - M) \times 931.5 \\
&= (3 \times 1.00728 + 4 \times 1.00867 - 7.01436) \times 931.5 \\
&= 0.04216 \times 931.5 = 39.27\,\text{MeV} \\
\frac{BE(Li)}{A} &= \frac{39.27}{7} = 5.610\,\text{MeV}
\end{aligned}$$

قيد الإعداد والمراجعة

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بما يأتي: النيوكليون، طاقة الربط النووية، نطاق الاستقرار.

2. **أستنتج:** النواة (X) لها ثمانية أضعاف العدد الكُتْلي للنواة (Y). أجد نسبة:

   أ. نصف قطر النواة (X) إلى نصف قُطْر النواة (Y).

   ب. حجم النواة (X) إلى حجم النواة (Y).

   جـ. كثافة النواة (X) إلى كثافة النواة (Y).

3. **أستخدم الأرقام:** أجد عدد النيوترونات في نواة عنصر عدده الذري يساوي (31)، ونصف قطر نواته $(4.8 \times 10^{-15}\ \mathrm{m})$.

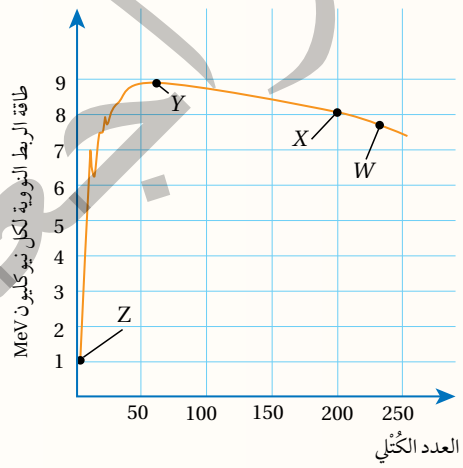
4. **أستخدم الأرقام:** أحسب طاقة الربط النووية وطاقة الربط النووية لكل نيوكليون لنواتي (النيكل $^{62}_{28}Ni$ ، والحديد $^{56}_{26}Fe$)، حيث:

الجسيم أو النواة	m_p	m_n	$m_{^{62}_{28}Ni}$	$m_{^{56}_{26}Fe}$
الكتلة (amu)	1.00728	1.00867	61.91297	55.92066

5. **أستنتج:** يمثّل الجدول الآتي: طاقة الربط النوويّة والعدد الكُتْلي لبعض النوى، فأيّ النوى أكثر استقرارًا؟

النواة	طاقة الربط النوويّة	العدد الكتلي
X	1600 MeV	200
Y	492 MeV	56
Z	28 MeV	4

6. **أستنتج:** يمثّل المنحنى المجاور العلاقة بين طاقة الربط النوويّة لكل نيوكليون والعدد الكُتْلي لنوى العناصر (Z, Y, X, W). اعتمادًا على المنحنى، أُجيب عن الأسئلة الآتية:



   أ. أيّ هذه العناصر أكثر استقرارًا ؟ ولماذا؟

   ب. أيّ هذه العناصر أكثر قابليّة للانشطار، وأيّها أكثر قابليّة للاندماج عند إحداث تفاعل نووي؟

   جـ. أحسب طاقة الربط النووية لنواة العنصر (X).

قيد الإعداد والمراجعة

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

1. إذا علمت أن كتلة نواة تساوي (106.90 *amu*)، ومجموع كتل مكوناتها (107.87 *amu*)، فإن الطاقة اللازمة لفصل مكونات هذه النواة بوحدة (MeV) تساوي:

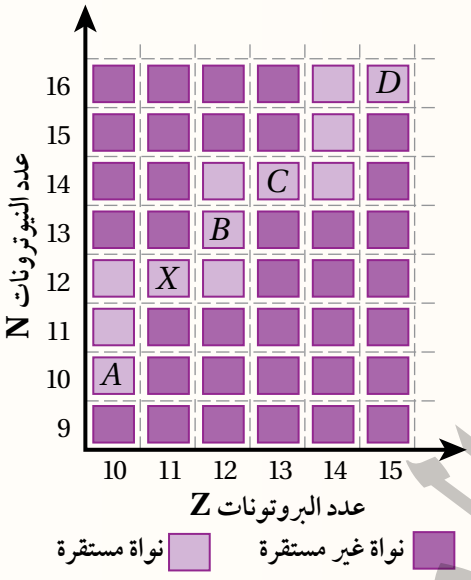
أ . 903.56 ب. 214.77 جـ. 103.79 د. 0.97

2. العبارة التي تصف العلاقة بين النواتين ($^{218}_{84}X$ ، $^{220}_{86}Y$) وصفًا صحيحًا، هي:

أ. عدد النيوكليونات للنواتين متساوٍ. ب. عدد النيوترونات للنواتين متساوٍ.

ج. العدد الذري للنواة (X) أكبر. د . عدد النيوترونات للنواة (X) أكبر.

* معتمدا على الشكل المجاور الذي يبين جزءًا من منحنى الاستقرار، وكل مربع يعبر عن نواة. أجب عن الفقرات الثلاث الآتية:



3. نسبة حجم النواة (B) إلى حجم النواة (A) ؛ $\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$ تساوي:

أ . $\frac{4}{5}$ ب. $\frac{5}{4}$

جـ. $\frac{1}{1}$ د. $\frac{6}{5}$

4. إذا كانت طاقة الربط النووية للنواة (X) تساوي (186.3 MeV)، فإن طاقة الربط النووية لكل نيوكليون لهذه النواة بوحدة (MeV) تساوي:

أ . 8.100 ب. 15.50 جـ. 16.94 د. 0.1200

5. النواة التي لها أكثر من نظير مستقر من بين النوى (A, X, C, D):

أ . A ب. X جـ. C د. D

قيد الإعداد والمراجعة

الفكرةُ الرئيسةُ:

تبعث النوى غير المستقرّة إشعاعات بطاقات مختلفة، ولهذه الإشعاعات مزايا ولها أيضًا أخطار.

نتاجاتُ التعلّمِ:

- أقارن بين جُسيمات ألفا وبيتا وأشعة غاما اعتمادًا على تفاعلاتها مع الأوساط المادّيّة.
- أصف التغيّرات التي تطرأ على خصائص النواة عند انبعاث أحد الإشعاعات النووية منها (ألفا أو بيتا أو غاما).
- أُحلِّل رسومًا بيانيّة لتناقص عدد النوى المشعة مع الزمن وأربطه بعمر النصف للنظير المشع.
- أوضح المقصود بالنشاطية الإشعاعية وأعبر عنها بمعادلة رياضية.
- أحلل سلاسل الإضمحلال الإشعاعي مبينا عدد الجسيمات المنبعثة ونوعها.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

الاضمحلال الإشعاعي
Radioactive Decay

عمر النصف Half–Life

النشاطيّة الإشعاعيّة Activity

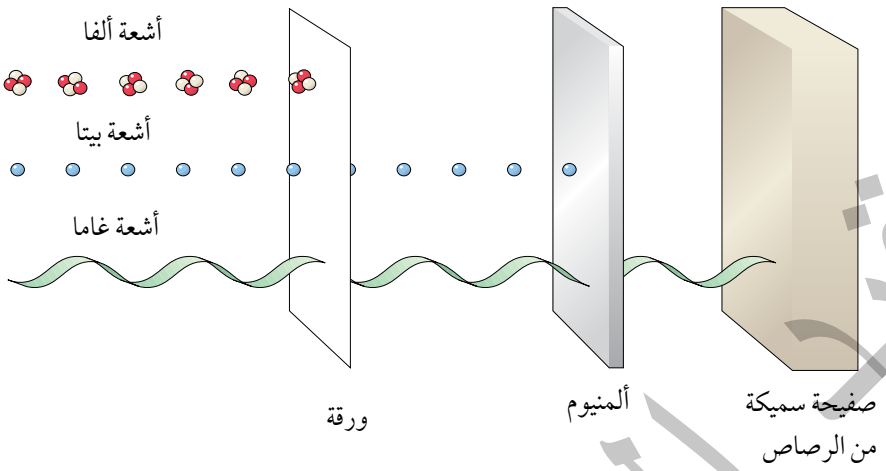
سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي
Natural Radioactive Decay Series

الاضمحلال الإشعاعيّ Radioactie Decay

اكتشف العالم بيكرل عام 1896 أنّ أملاح اليورانيوم تؤثّر في الألواح الفوتوغرافية، بالرغم من تغليفها لحمايتها من الضوء ومنعه من التأثير فيها، وخلُص إلى أنّ أملاح اليورانيوم تبعث تلقائيًّا دون الحاجة إلى تحفيز خارجيّ، نوعًا جديدًا من الإشعاع. وفي نهاية القرن التاسع عشر، اكتشفت ماري كوري وزوجها بيير كوري عنصرين جديدين يُصدران نوعًا مماثلًا للإشعاع الصادر عن أملاح اليورانيوم، وأطلقا عليهما البولونيوم والراديوم.

وبيّنت التجارب أن هناك ثلاثة أنواع من الإشعاعات أُطلِق عليها مسميات ألفا (α) وبيتا (β) وغاما (γ). وجُسيمات ألفا هي نوى الهيليوم ($_2^4He^{+2}$)، أمّا جُسيمات بيتا، فقد تكون بيتا السالبة (β^-) وهي إلكترونات ($_{-1}^{0}e$)، أو بيتا الموجبة وهي بوزيترونات ($_{+1}^{0}e$). والبوزيترون جُسيم له كتلة الإلكترون نفسها، لكنّه يحمل شحنة موجبة مساوية لشحنة الإلكترون ($+1.6 \times 10^{-19}$ C). أمّا أشعّة غاما، فهي أشعّة كهرمغناطسية (فوتونات) ذات تردُّد عالٍ ليس لها كتلة أو شحنة. **والاضمحلال الإشعاعي Radioactive decay** هو التحوّل التلقائي لنواة غير مستقرة إلى نواة أكثر استقرارًا عن طريق انبعاث جسيمات مثل جُسيم ألفا أو جُسيم بيتا، وغالبًا ما يصاحب ذلك انبعاث أشعة غاما.

الإشعاعات النووية الثلاثة؛ ألفا وبيتا وغاما، تُعدّ جميعها من الإشعاعات النووية المؤيّنة بسبب قدرتها على تأيين ذرات الوسط الذي تمرّ فيه. إنّ كتلة جسيمات ألفا نحو أربعة أضعاف كتلة البروتون تقريبًا، وشحنتها ضعفا شحنة البروتون، وهذا يجعل تفاعلها مع ذرات الوسط الذي تمرّ فيه كبيرًا مقارنة بتفاعل جسيمات بيتا وأشعة غاما، فتفقد طاقتها بسرعة؛ لذا فإنّ قدرتها على تأيين ذرات الوسط الذي تمرّ فيه أكبر من قدرة جسيمات بيتا وأشعة غاما، في حين أنّ قدرتها على النفاذ أصغر. وفي المتوسط، تعبر جسيمات ألفا في الهواء مسافة (3.7 cm) تقريبًا قبل أن



الشكل (5): قدرة الأشعة النووية ألفا وبيتا وغاما على النفاذ.

لماذا اخترقت أشعة غاما الورقة والألمنيوم في حين لم تخترق ألفا الورقة؟

تُمتصَّ طاقتها كاملة. ويمكن أيضًا امتصاص طاقة جُسيم ألفا كاملة باستخدام حاجز رقيق من الورق. أمّا أشعة غاما، فهي الأقل قدرة على التأيين والأكثر قدرة على الاختراق؛ لأنّها لا تحمل شحنة كهربائية، وليس لها كتلة. ولمقارنة قدرة الإشعاعات النووية الثلاثة على اختراق الأوساط المادّية أتأمّل الشكل (5). ويمثّل الجدول (3) مقارنة بين خصائص الإشعاعات النوويّة.

يُطلق على انبعاث جُسيمات ألفا أو انبعاث جسيمات بيتا أو انبعاث أشعة غاما اضمحلالًا. في ما يأتي سأتعرّف المزيد عن هذه الاضمحلالات الثلاثة.

الجدول (3): خصائص الإشعاعات النووية.

نوع الأشعة	ألفا	بيتا	غاما
الشِّحْنة	$+2e$	$+e$ أو $-e$	ليس لها شحنة
الكتلة	4.0015 *amu*	0.0005 *amu*	صفر
القدرة على النفاذ	قليلة (تُمتصّ باستخدام حاجز رقيق من الورق)	متوسطة (بضعة ملمترات من الألمنيوم)	كبيرة (سنتمترات عدة من الرصاص)
القدرة على التأيين	كبيرة	متوسطة	قليلة

✓ **أتحقّق:** أقارن بين الإشعاعات النووية ألفا وبيتا وغاما من حيث قدرة كلٍّ منها على التأيين، وقدرتها على الاختراق.

قيد الإعداد والمراجعة

اضمحلال ألفا Alpha Decay

جسيمات ألفا (α) تنبعث في الغالب من النوى الثقيلة ($Z > 82$) غير المستقرة، وينتج نواة جديدة تختلف في عددها الذري وعددها الكُتْلي عن النواة الأمّ، على نحو ما هو موضَّح في ما يأتي:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

فجُسيم ألفا انبعث من نواة نظير اليورانيوم $\left(^{238}_{92}U\right)$ غير المستقر (النواة الأمّ) لينتج من ذلك نواة نظير الثوريوم $\left(^{234}_{90}Th\right)$. وعندما يغادر جسيم ألفا النواة، فإنّها تخسر بروتونين ونيوترونين؛ لذا فإنّ العدد الذريّ للنواة الناتجة يقلّ 2، في حين يقلّ عددُها الكُتْلي بمقدار 4 مقارنة بالنواة الأمّ كما في المعادلتين السابقتين.

ويمكن التعبير عن معادلة اضمحلال ألفا بالمعادلة الآتية:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

ألاحظُ أن مجموع العدد الذريّ للنوى والجسيمات الناتجة من الاضمحلال يساوي العدد الذري للنواة المضمحلّة، وكذلك مجموع العدد الكُتْلي للنوى والجسيمات الناتجة من الاضمحلال يساوي العدد الكتلي للنواة المضمحلّة.

✓ **أتحقّق:** أُبيّن ما التغيّر الذي يطرأ على كلٍّ من العدد الذري والعدد الكُتْلي للنواة الأمّ عند انبعاث جسيم ألفا منها.

اضمحلال بيتا Beta Decay

إنّ النوى التي تقع فوق نطاق الاستقرار تمتلك فائضًا من النيوترونات، ويلزمها تقليل عدد النيوترونات وزيادة عدد البروتونات لتقترب نسبة $\left(\frac{N}{Z}\right)$ فيها من نسبة الاستقرار، ويحدث ذلك عن طريق إشعاع جسيم بيتا السالبة (β^-)، وهو إلكترون $(^{0}_{-1}e)$ ومثال ذلك التفاعل الآتي:

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu}$$

أُلاحظ أنّ العدد الذري للنواة الناتجة قد زاد بمقدار (1)، في حين بقي العدد الكُتْلي ثابتًا مقارنة بالنواة الأمّ. والرمز $(\overline{\nu})$ يمثّل جسيمًا يُسمّى ضديد النيوترينو، وهو جسيم متعادل الشِّحْنة، وكتلته متناهية الصغر.

الربط بالحياة

تحوي أجهزة إنذار الدخان مصدرًا إشعاعيًّا صغيرًا يُطلِق جسيمات ألفا، وعادةً ما يكون نظير الأمريسيوم -241. حيث تعمل جسيمات ألفا على تأيين جزيئات الهواء داخل جهاز الإنذار، وهذا يؤدي إلى مرور تيار كهربائي. وعندما يمتصّ الدخان بعض جسيمات ألفا، فإنّه يقلّل من عدد الأيونات في الهواء ويقلّ التيار الكهربائي، فينطلق جهاز إنذار الحريق، أتأمّل الشكل.

قيد الإعداد والمراجعة

وينتج جسيم بيتا السالبة من تحلّل أحد نيوترونات النواة (وهي نواة الكربون ${}^{14}_{6}C$ في هذا المثال) وتحوّله إلى بروتون، وجسيم بيتا السالبة، وضديد النيوترينو ($\overline{\nu}$) على نحو ما في المعادلة الآتية:

$${}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{+1}p + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu}$$

أمّا النوى التي تقع أسفل نطاق الاستقرار، فإنّها تمتلك فائضًا من البروتونات، ولكي تصل إلى حالة الاستقرار يتطلّب ذلك تقليل عدد البروتونات وزيادة عدد النيوترونات، ويتحقّق ذلك بإشعاع جسيم بيتا الموجبة (β^+) وهو بوزترون $\left({}^{0}_{+1}e\right)$. ومثال ذلك التفاعل الآتي:

$${}^{12}_{7}N \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

أُلاحظ أنّ العدد الذري للنواة الناتجة يقلّ بمقدار (1) عن النواة الأمّ، في حين بقي العدد الكُتْلي ثابتًا. ويُطلق على الجسيم (ν) النيوترينو، وهو جُسيم متعادل الشِّحْنة ذو كتلته متناهية الصغر.

وينتج جسيم بيتا الموجبة من تحلُّل أحد بروتونات النواة الأمّ (وهي ${}^{12}_{7}N$ في هذا المثال) وتحوِّله إلى نيوترون وجُسيم بيتا الموجبة ونيوترينو على نحو ما في المعادلة الآتية:

$${}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

وتجدر الإشارة إلى أنّ النواة لا تحتوي إلكترونات أو بوزترونات، وهذه الجسيمات تنشأ لحظة تحوّل بروتون إلى نيوترون، أو العكس عند حدوث اضمحلال بيتا، وتغادر النواة مباشرة.

ويمكن التعبير عن معادلتي اضمحلال بيتا السالبة وبيتا الموجبة بالمعادلتين الآتيتين:

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu}$$

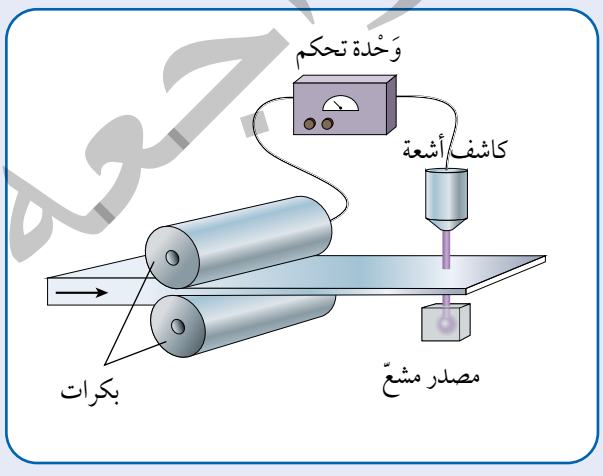
$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

✓ **أتحقّق:** أُبيِّن ما التغيير الذي يطرأ على كلٍّ من العدد الذري والعدد الكُتْلي للنواة عند انبعاث جسيم β^+ أو جُسيم β^- منها.

أُفكّر: تُستخدم أشعة بيتا في ضبط سُمْك الورق، فهل تصلح أشعة غاما أو ألفا لذلك؟ أُفسِّر إجابتي.

الربط بالتكنولوجيا

تُستخدم الأشعّة النوويّة في التحكّم في سُمْك الموادّ المصنَّعة كما في الشكل. حيث يوضع أسفل الشريط مصدر مشعّ، وتُستقبل الأشعة بعد نفاذها من الشريط عن طريق كاشف يُرسِل بدوره إشارة إلى جهاز التحكّم عن مقدار الأشعة التي وصلت إليه، والتي تعتمد على سمك الشريط.



وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي
المراجعة

اضمحلال غاما Gamma Decay

تعلّمتُ أنّ الإلكترونات تتوزّع في مستويات طاقة في الذّرّة، كذلك تتوزّع النيوكليونات في مستويات طاقة في النواة بدءا من **مستوى الاستقرار** Ground state وهو المستوى الأقل طاقة للنواة.

عند إشعاع النواة جسيمات ألفا أو بيتا، تنتج نواة جديدة قد تكون في حالة إثارة، وللانتقال إلى حالة أكثر استقرارًا، يمكن لهذه النواة أن تتخلص من الفائض في طاقتها عن طريق إصدار أشعة غاما، وهي أشعة كهرمغناطيسية (فوتونات) ذات تردّد كبير جدًّا، وليس لها شِحْنة أو كتلة؛ لذلك لا يتغيّر العدد الذري أو العدد الكُتْلي للنواة عند انبعاثها. ويمكن التعبير عن اضمحلال غاما بالمعادلة الآتية:

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma $$

حيث ${}^{A}_{Z}X^{*}$: النواة في حالة إثارة.

${}^{A}_{Z}X$: النواة في حالة الاستقرار.

γ : أشعة غاما المنبعثة.

وطاقة أشعة غاما المنبعثة تساوي فَرْق الطاقة بين حالة الإثارة وحالة الاستقرار للنواة الناتجة. ومن الأمثلة على ذلك، نواة البورون ${}^{12}_{5}B$، حيث تُعدّ نواة البورون من باعثات بيتا السالبة؛ لأنّها تمتلك عددًا من النيوترونات أكبر من عدد البروتونات، وعددها الذري أقل من 20؛ لذا فهي تتموضع فوق نطاق الاستقرار. ويبيّن الشكل (6) رسمًا تخطيطيًّا لتغيّرات الطاقة عند اضمحلال نواة البورون (${}^{12}_{5}B$) بطريقتين: الطريقة الأولى تنتج نواة الكربون −12 في حالة الاستقرار بحَسَب المعادلة الآتية:

$$ {}^{12}_{5}B \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu} $$

حيث يتحرّر 13.4 MeV من الطاقة نتيجة لهذا الاضمحلال، والطريقة الثانية ينتج منها نواة الكربون −12 في حالة إثارة وطاقتها 4.4 MeV كما هو مبيَّن في المعادلة الآتية:

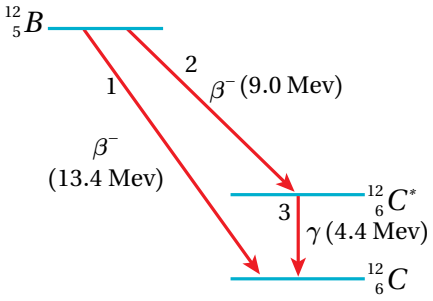
$$ {}^{12}_{5}B \rightarrow {}^{12}_{6}C^{*} + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu} $$

حيث ${}^{12}_{6}C^{*}$ نواة الكربون المُثارة، ويتحرّر مقدارٌ من الطاقة يساوي 9.0 MeV نتيجةً لهذا الاضمحلال. وتتخلّص ذرّة الكربون المثارة (${}^{12}_{6}C^{*}$) من الطاقة الفائضة بإطلاق أشعة غاما طاقتها تساوي 4.4 MeV لتصل إلى حالة الاستقرار بحسب المعادلة الآتية:

$$ {}^{12}_{6}C^{*} \rightarrow {}^{12}_{6}C + \gamma $$

الربط بالتكنولوجيا

تُستخدم أشعة غاما في الصناعة للكشف عن الشقوق في لحام المعادن، حيث يوضع مصدر غاما على أحد جانبي اللحام، وتوضع لوحة فوتوغرافية على الجانب الآخر. ستظهر عندئذٍ نقاط الضعف في اللحام على اللوحة الفوتوغرافية بطريقة مشابهة لصورة الأشعة السينية للعظم المكسور.



الشكل (6): اضمحلال نواة البورون −12 بطريقتين.

✓ **أتحقّق:** أُبيِّن ما يحدث لكلٍّ من العددين الذري والكُتْلي للنواة عند انبعاث أشعة غاما منها.

قيد الاعداد والمراجعة

المثال 8

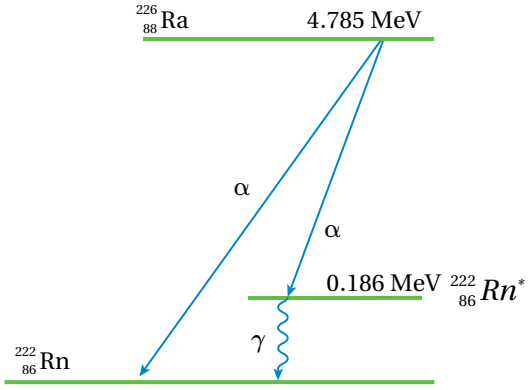
يمثّل الشكل (7) اضمحلال نواة الراديوم $(^{226}_{88}Ra)$ إلى نواة الرادون $(^{222}_{86}Rn)$.عند الكشف عن جسيمات ألفا، وجِد أنّها تنبعث بطاقتين مختلفتين.

أ . ما مقدار طاقتي جُسيم ألفا؟

ب. ما مقدار طاقة أشعّة غاما؟

جـ. أكتب معادلة اضمحلال أشعّة غاما.

د . أكتب معادلة اضمحلال ألفا الذي ينتج منه طاقة أكبر.



الشكل (7): اضمحلال نواة الراديوم –226.

المُعطيات: الشكل (7).

المطلوب: E_α، E_γ ، معادلة اضمحلال غاما، معادلة الاضمحلال التي تُنتج جسيم ألفا بطاقة أكبر.

الحلّ:

أ . طاقتا جُسيم ألفا هما: $E_\alpha = 4.785$ MeV و $E_\alpha = 4.785 - 0.186 = 4.599$ MeV

ب. طاقة أشعة غاما $E_\gamma = 0.186$ MeV

جـ. معادلة اضمحلال غاما $^{222}_{86}Rn^{*} \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + \gamma$

د . معادلة اضمحلال ألفا الذي ينتج منه طاقة أكبر $^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$

تمرين

أُكمل المعادلات النوويّة الآتية:

1. $^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p +$ ..... $+$ .....
2. $^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n +$ ..... $+$ .....
3. $^{234}_{92}U \rightarrow {}^{230}_{90}Th +$ .....
4. $^{234}_{91}Pa^{*} \rightarrow {}^{234}_{91}Pa +$ .....

قيد الإعداد والمراجعة

التجربة ١

نمذجة الاضمحلال الإشعاعي

الموادُّ والأدواتُ: 50 قطعة نقدية معدنيّة.

إرشاداتُ السلامةِ: عدم اللعب بالقطع، أو رميها باتجاه الزملاء/ الزميلات.

خطواتُ العملِ:

أُنفِّذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

1. أُلقي القطع النقدية معًا على سطح الطاولة، ثم أحصي عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى، وأرمز إليها بالرمز (N)، ثم أُدوِّن ذلك في الجدول.

(تُعَدُّ القطعةُ التي ظهرت فيها الكتابةُ إلى الأعلى نواةً مضمحلة، والقطعة التي ظهرت فيها الصورة إلى الأعلى نواة مشعّة).

2. أجمع القطع النقدية التي ظهرت فيها الصورة للأعلى (المشعّة) ثم أُلقيها مرة أخرى، وأُحصي عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى، ثم أُدوِّن ذلك في الجدول.

3. أكرّر الخطوة السابقة حتى يصبح عدد القطع النقدية التي ظهرت فيها الصورة للأعلى أقلّ من أربع قطع.

ثمّ أدوّن النتائج في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. ما العلاقة بين مقدار النقص في عدد القطع النقدية التي ظهرت فيها الصورة للأعلى (ΔN) وعدد القطع النقدية التي أُلقيت في كلّ محاولة.

2. **أمثّل بيانيًّا** النتائج المرصودة في الجدول بوضع عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى على محور y، وعدد المحاولات على محور x.

3. **أستنتج:** أُقسِّم عدد الصور في كل محاولة على عدد الصور في المحاولة التي تسبقها. هل يُمكن استنتاج نمط رياضي يربط $(\frac{N}{N_0})$ بعدد المحاولات (n)؟

4. **أستنتج:** إنّ احتمال الحصول على صورة أو كتابة في رَمْي القطع النقدية يساوي $(\frac{1}{2})$، وهذا يعني توقُّع الحصول على نصف العدد من الصور في كل محاولة، وهذا يشبه عمر النصف في الاضمحلال الإشعاعي $(t_{1/2})$، أستنتج العلاقة بين عدد المحاولات وعمر النصف وزمن الاضمحلال.

5. **أتوقّع:** إذا بدأت بعدد قطع يساوي (1000)، فما عدد القطع المتبقي لديّ بعد محاولتين؟

قيد الإعداد والمراجعة

عمر النصف Half–life

أظهرت التجارب أن بعض النظائر المشعة يضمحل خلال مدد زمنية قصيرة، وبعضها الآخر يضمحل خلال مدد زمنية طويلة. ويسمى الزمن اللازم لاضمحلال نصف عدد النوى المشعة **عمر النصف Half–life** ($t_{1/2}$). يُبيِّن الجدول (4) بعض النظائر المشعة وعمر النصف لكل منها.

الجدول (4): عمر النصف لبعض النظائر المشعّة.

العنصر	عمر النصف
$^{238}_{92}U$	4.47×10^9 y
$^{235}_{92}U$	7.04×10^8 y
$^{232}_{90}Th$	1.41×10^{10} y
$^{137}_{55}Cs$	30.08 y
$^{60}_{27}Co$	5.27 y
$^{191}_{76}Os$	15.4 days
$^{211}_{83}Bi$	2.14 min
$^{144}_{56}Ba$	11.9 s

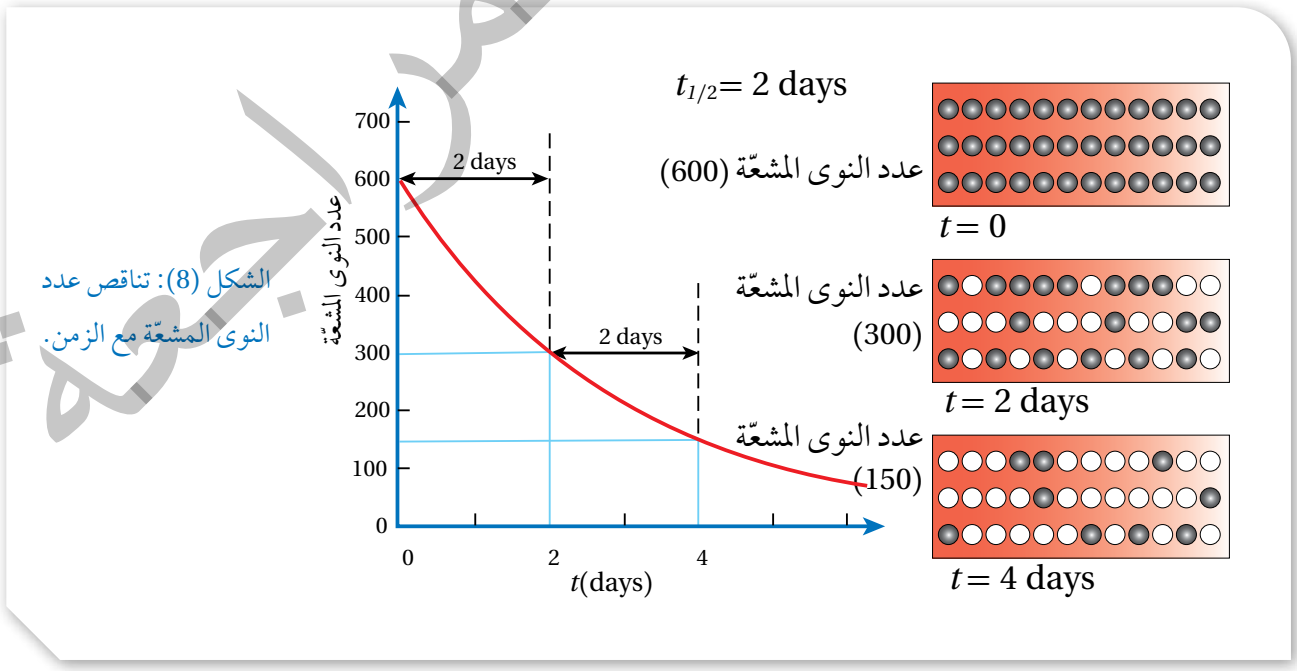
في التجربة (1)، يمكن معاملة المحاولة الواحدة لإلقاء القطع النقدية معاملة عمر نصف واحد، فبعد كل محاولة يقلّ عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى إلى النصف تقريبًا، أي بعد كل عمر نصف، فإنّ عدد النوى المشعة يقلّ إلى النصف. فلو بدأنا بعينة عدد النوى المشعة فيها ($N_0 = 600$)، وعمر النصف لها ($t_{1/2} = 2$ days)، فإنّ عدد النوى المشعة المتبقية بعد مرور يومين يصبح ($N = 300$)، وبعد مرور أربعة أيام، أي بعد مرور عمري نصف ($2t_{1/2}$)، فإنّ عدد النوى المشعة المتبقية يصبح ($N = 150$) نواة، وهكذا كما يوضح الشكل (8).

يمكن ربط عمر النصف بعدد النوى المشعة المتبقية على النحو الآتي:

$$N_0 \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{2} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{4} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{8} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{16} \ldots\ldots$$

وعليه، يمكن التوصل إلى العلاقة الرياضية الآتية:

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$



الشكل (8): تناقص عدد النوى المشعّة مع الزمن.

وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي

حيث ($t_{1/2}$) عمر النصف، (N_0) عدد النوى المشعّة عند لحظة ($t = 0$)، (N) عدد النوى المشعّة بعد مرور زمن (t) ويسهل استخدام هذه العلاقة عندما يكون (t) من مضاعفات عمر النصف ($t_{1/2}$).

النشاطية الإشعاعية Activity

بمرور الزمن، يتناقص عدد النوى المشعّة، فيقلّ عدد النوى التي تضمحل في الثانية الواحدة. وتُعبّر **النشاطيّة الإشعاعيّة Activity** عن عدد الاضمحلالات في الثانية الواحدة، ويرمز إليها بالرمز (A). وتتناسب النشاطية الإشعاعية طرديًّا مع عدد النوى المشعّة عند لحظة زمنية معينة، فعند الزمن (t) تُحسَب النشاطية الإشعاعية من العلاقة:

$$A = \lambda N$$

حيث (λ) : ثابت التناسب، ويسمى ثابت الاضمحلال، و (N) عدد النوى المشعّة عند اللحظة نفسها، وعند الزمن ($t = 0$)، فإنّ ($A_0 = \lambda N_0$)، وهي النشاطية الإشعاعية الابتدائية. تقاس النشاطية الإشعاعيّة بوحدة بيكرل (Bq) وتساوي اضمحلالًا واحدًا في الثانية، أو بوحدة كوري (Ci) حيث ($1\ \text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\ \text{Bq}$).

عند مرور زمن يساوي عمر النصف على العينة المشعة، فإن النشاطية الإشعاعية لها تقلّ إلى النصف. ويمكن الربط بينهما على النحو الآتي:

$$A_0 \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{2} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{4} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{8} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{16} \ldots\ldots$$

وعليه، يمكن التوصل إلى العلاقة الرياضية الآتية:

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

ويرتبط عمر النصف ($t_{1/2}$) بثابت الاضمحلال بالعلاقة الآتية:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

يلاحظ من هذه العلاقة أنّ عمر النصف يتناسب عكسيًّا مع ثابت الاضمحلال؛ فعندما يكون ثابت الاضمحلال كبيرًا، يكون عمر النصف صغيرًا.

✓ **أتحقّق:** أُعرِّف النشاطيّة الإشعاعيّة وعمر النصف.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 9

يُستخدم الغاليوم –67 في التشخيص الطبّي. إذا علمت، أنّ ثابت الاضمحلال له ($2.4 \times 10^{-6}\ s^{-1}$)، وقستُ النشاطيّة الإشعاعيّة لعينة منه فكانت (4680 Bq)، فأجد الزمن اللازم حتى تصبح النشاطيّة الإشعاعيّة (1170 Bq).

المُعطيات: $A_0 = 4680\ Bq,\ \lambda = 2.4 \times 10^{-6}\ s^{-1},\ A = 1170\ Bq$

المطلوب: $t = ?$

الحلّ:

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \quad \Rightarrow \quad \frac{1170}{4680} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

$$\frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{1}{2}\right)^{2} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

وهذا يعني أنّ $\frac{t}{t_{1/2}} = 2 \quad \Rightarrow \quad t = 2t_{1/2} = \frac{2 \times 0.693}{\lambda} = \frac{1.39}{2.4 \times 10^{-6}} = 5.8 \times 10^{5}\ s$

المثال 10

يُستخدّم نظير الكوبالت –60 في تعقيم الأجهزة الطبية وفي علاج مرض السرطان. عمر النصف لنظير الكوبالت ($^{60}_{27}Co$) يساوي (5.27 y)، قِستُ النشاطيّة الإشعاعيّة لعينة منه عند لحظة زمنيّة معينة فوجدتها (0.200 μCi). أجد ما يأتي:

أ . عدد النوى المشعّة في العينة.

ب. النشاطيّة الإشعاعيّة بعد زمن يساوي ثلاثة أضعاف عمر النصف.

المُعطيات: $A_0 = 0.200\ \mu Ci,\ t_{1/2} = 5.27\ y$

المطلوب: $N_0 = ?,\ A(t = 3t_{1/2}) = ?$

الحلّ:

أ . نحوِّل النشاطيّة الإشعاعيّة من وحدة μCi إلى وَحْدة Bq

$$A_0 = 0.200\ \mu Ci = 0.200 \times 3.7 \times 10^{10} \times 10^{-6} = 7.4 \times 10^{3}\ Bq$$

ثم أحوّل عمر النصف إلى وَحْدة (s)

$$t_{1/2} = 5.27\ y = 5.27 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 166 \times 10^{6}\ s$$

قيد الإعداد والمراجعة

وأجد λ من العلاقة

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{166 \times 10^{6}} = 4.18 \times 10^{-9}\ s^{-1}$$

ثم أعوّض في العلاقة

$$A_0 = \lambda\ N_0$$

$$7.4 \times 10^{3} = 4.18 \times 10^{-9}\ N_0$$

$$N_0 = 1.8 \times 10^{12}\ nuclei$$

ب. بعد مرور زمن بمقدار عمر نصف واحد تقلّ النشاطيّة الإشعاعيّة للنصف، وتصبح (0.100 μCi)، وبعد مرور عمر نصف ثانٍ تصبح النشاطيّة الإشعاعيّة (0.050 μCi)، وبعد عمر نصف ثالث تصبح النشاطيّة الإشعاعيّة (0.025 μCi).

تمرين

أستخدم الأرقام: يُستخدم اليود المشعّ في علاج سرطان الغدة الدرقيّة، فإذا كان عمر النصف له (8 days) تقريبًا، أجد الزمن اللازم حتى يضمحلّ (75%) من عينة محدّدة منه.

سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي Natural Radioactive Decay Series

اليورانيوم ($^{238}_{92}U$) عنصر مشعّ يضمحلّ لينتج منه نظير الثوريوم ($^{234}_{90}Th$)، بحَسَب التفاعل الآتي:

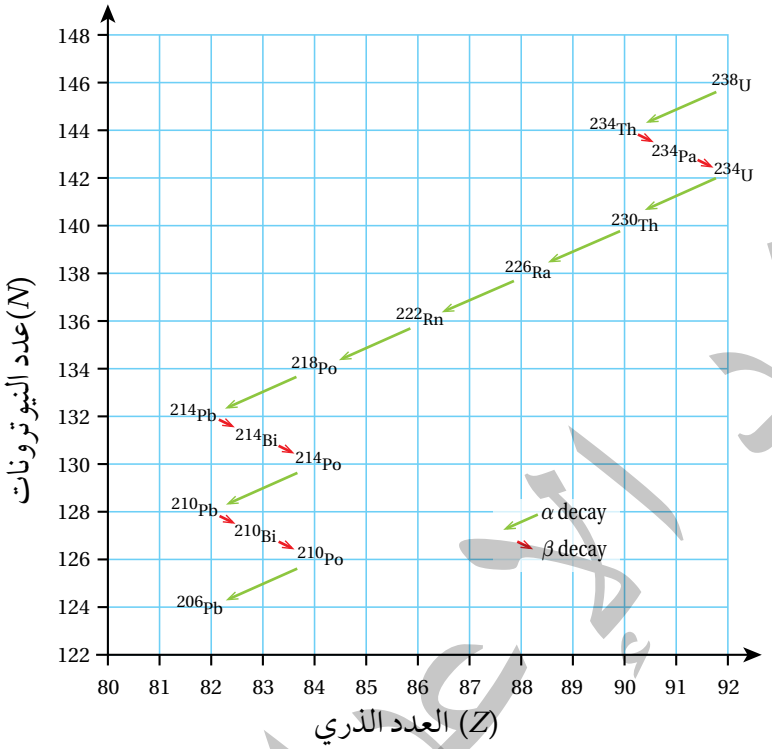
$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

لكن نظير الثوريوم ($^{234}_{90}Th$) مشعّ أيضًا، ويضمحلّ لينتج منه نظير مشعّ جديد $^{234}_{91}Pa$، وتستمر سلسلة الاضمحلالات عن طريق إشعاع جسيمات ألفا أو بيتا حتى تنتهي بعنصر مستقر على النحو الآتي:

$$^{238}_{92}U \xrightarrow{\alpha} {}^{234}_{90}Th \xrightarrow{\beta^-} {}^{234}_{91}Pa \xrightarrow{\beta^-} {}^{234}_{92}U \xrightarrow{\alpha} {}^{230}_{90}Th \xrightarrow{\alpha} {}^{226}_{88}Ra \ldots \longrightarrow {}^{206}_{82}Pb\ (\text{مستقر})$$

تُسمّى مجموعة الاضمحلالات التلقائيّة التي تبدأ بعنصر مشعّ ثقيل (موجود في الطبيعة)، وتنتهي بعنصر مستقر عَبْر اضمحلالات عدة لألفا وبيتا **سلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي Natural radioactive decay series**. وسلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي ثلاث سلاسل، هي: سلسلة اليورانيوم وتبدأ بنظير اليورانيوم $^{238}_{92}U$، وسلسلة الثوريوم وتبدأ بنظير الثوريوم $^{232}_{90}Th$، وسلسلة الأكتينيوم وتبدأ بنظير اليورانيوم $^{235}_{92}U$. وجميع هذه السلاسل تبدأ بنظير ثقيل

قيد الاعداد والمراجعة



الشكل (9): سلسلة اضمحلال اليورانيوم.

مشعّ عمر النصف له كبير، وتنتهي بأحد نظائر الرصاص المستقر. وتُسمّى كل سلسلة باسم النظير المشعّ الذي له أطول عمر نصف فيها.

ونظرًا إلى أنّ اليورانيوم $^{238}_{92}U$ له أكبر عمر نصف $(4.47 \times 10^9\ y)$ بين النظائر المشعّة في سلسلة اليورانيوم، فقد سُمّيت باسمه. ويمكن التعبير عن هذه السلسلة بيانيًّا على منحنى $(N-Z)$ كما في الشكل (9).

ويمكن التعبير عن هذه السلسلة أيضًا بالمعادلة الآتية:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{206}_{82}Pb + 8\,^{4}_{2}He + 6\,^{0}_{-1}e + 6\bar{\nu}$$

أُلاحظ من المعادلة السابقة أنّ العددين الذريّ والكُتْلي محفوظان.

✓ **أتحقّق:** ما المقصود بسلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي؟

الربط بعلوم الأرض

غاز الرادون المشعّ أحد النظائر في سلسلة اليورانيوم. يستقصي الجيولوجيون نسبة الرادون في المياه الجوفية والتربة للتنبؤ بالنشاط الزلزالي. فزيادة تركيزه قد تكون علامة على وقوع زلزال قريب. ويستطيع الجيولوجيون تقدير عمر الصخور من معرفة نسبة الرصاص إلى اليورانيوم –238 في الصخور.

الربط بعلم الآثار

تحتوي أجسام الكائنات الحية على نظير الكربون المشع $(^{14}_{6}C)$، ونسبته لنظير الكربون المستقر $(^{12}_{6}C)$ ثابتة في أجسام الكائنات الحيّة خلال وجودها على قيد الحياة. وبمجرد موت الكائن الحي تقلّ هذه النسبة. وبمعرفة هذه النسبة يستطيع علماء الآثار حساب زمن وفاة الكائن الحيّ.

قيد الإعداد والمراجعة

المثال 11

يمكن التعبير عن سلسلة اضمحلال الثوريوم بالمعادلة:

$$^{232}_{90}Th \rightarrow {}^{208}_{82}Pb + n\,^{4}_{2}He + m\,^{0}_{-1}e + m\,\bar{\nu}$$

أجد عدد جُسيمات بيتا السالبة (m)، وعدد جسيمات ألفا (n) في المعادلة السابقة.

المُعطيات: المعادلة النوويّة.

المطلوب: $n = ?\ ,\ m = ?$

الحلّ:

أُطبّق مبدأ حِفْظ العدد الكُتْلي لحساب (n)

$$\sum A_{before} = \sum A_{after}$$

$$232 = 208 + 4n + 0(m)$$

$$n = \frac{232 - 208}{4} = 6$$

ثمّ أُطبِّق مبدأ حِفْظ العدد الذري لحساب (m)

$$\sum Z_{before} = \sum Z_{after}$$

$$90 = 82 + 2 \times 6 - m$$

$$m = 4$$

تمرين

أستنتج: تمثّل المعادلة الآتية جزءًا من سلسلة اليورانيوم:

$$^{238}_{92}U \xrightarrow{h} {}^{234}_{90}Th \xrightarrow{g} {}^{234}_{91}Pa \ \ldots \rightarrow {}^{A}_{Z}X \ \ldots.$$

أ. ما اسم الجُسيمين (g) و (h)؟

ب. إذا انبعث 6 جُسيمات ألفا وجُسيما بيتا السالبة للوصول إلى النواة $(^{A}_{Z}X)$، أجد Z و A.

توزيع الإعداد والمراجعة

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضِّح المقصود بالاضمحلال الإشعاعي وعمر النصف والنشاطيّة الإشعاعيّة.

2. **أفسر:**

أ . إشعاع النواة لجسيم ألفا أو جسيم بيتا قد يصاحبه انبعاث أشعة غاما.

ب. انبعاث جُسيمات بيتا السالبة من النواة بالرغم من عدم احتواء النواة إلكترونات.

3. **أستخدم الأرقام:** يدرس أسامة نظيرًا مشعًّا في مختبر الإشعاع في جامعته. قاس نشاطيّته الإشعاعيّة فوجدها (400) اضمحلال لكل دقيقة، وبعد ثلاث ساعات أصبحت (100) اضمحلال لكل دقيقة. أجد عمر النصف للنظير المشعّ بالدقيقة.

4. **أستخدم الأرقام:** نظير مشعّ نشاطيّته الإشعاعيّة الآن (800 Bq)، وثابت الاضمحلال له ($4 \ln(2)\ days^{-1}$)، فما المدّة الزمنيّة اللازمة حتى تصبح نشاطيّته الإشعاعيّة (100 Bq)؟

5. **أستخدم الأرقام:** عينة من نظير الثوريوم ($^{228}_{90}Th$) تحتوي على ($2.53 \times 10^{21}\ atoms$)، وثابت الاضمحلال له يساوي ($1.15 \times 10^{-8}\ s^{-1}$)، أجد:

أ . عمر النصف للثوريوم ($^{228}_{90}Th$).

ب. النشاطيّة الإشعاعيّة لهذه العينة.

6. **أستنتج:** الفلور –18 ($^{18}_{9}F$) نظير مشعّ مُعَدّ صناعيًّا، عمر النصف له (110 min)، يُستخدم في التصوير الطبّي حيث يضمحلّ ليعطي أحد نظائر الأكسجين وبوزيترون. أعدّت سارة عينة منه تحتوي ($2.1 \times 10^{16}\ atoms$) لتصوير أحد المرضى.

أ . أكتب معادلة موزونة لاضمحلال الفلور.

ب. أحسب ثابت الاضمحلال له.

جـ. ما عدد النوى المشعّة بعد مضي (220 min)؟

قيد الإعداد والمراجعة

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

1. الاضمحلال النووي الذي يكون فيه العدد الكتلي للنواة الأم لا يساوي العدد الكتلي للنواة الناتجة هو اضمحلال:

أ. ألفا　　ب. بيتا الموجب　　جـ. بيتا السالبة　　د. غاما

2. واحدة من الجمل الآتية ليست صحيحة: الأشعة النووية التي لها قدرة عالية على النفاذ مقارنة بباقي الإشعاعات النووية:

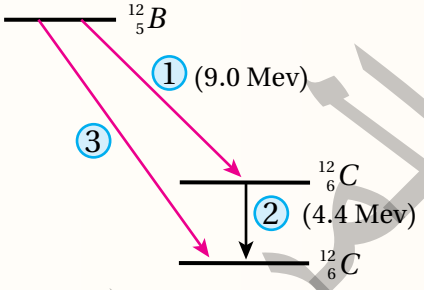
أ. ليس لها شحنة　　ب.تفاعلها مع ذرات الوسط ضعيف

جـ. ذات تردد منخفض　　د. سرعتها تساوي سرعة الضوء

3. نواة مشعة تحتوي على (84) بروتون و (126) نيوترون. النواة بعثت بجسيم ألفا، ونتج من الاضمحلال نواة جديدة هي الرصاص، أي من الآتية يمثل النواة الناتجة:

أ. $^{214}_{86}Pb$　　ب. $^{210}_{84}Pb$　　جـ. $^{208}_{82}Pb$　　د. $^{206}_{82}Pb$

4. يوضح الرسم التخطيطي المجاور اضمحلال نواة بورون إلى نواة كربون بطريقتين مختلفتين، اعتمادا على البيانات المثبتة على الرسم، فإن الجسيم المنبعث في الاضمحلال المشار إليه بالرقم (3) وطاقته بوحدة (MeV):



أ. بيتا موجب وطاقته (4.6).　　ب.بيتا سالب وطاقته (4.6).

جـ. بيتا موجب وطاقته (13.4).　　د. بيتا سالب وطاقته (13.4).

5. إذا كان عمر النصف للنظير (X) مثليّ عمر النصف للنظير (Y)، فإن ثابت الاضمحلال للنظير (X) يساوي:

أ. مثليّ ثابت الاضمحلال للنظير (Y).　　ب.ثابت الاضمحلال للنظير (Y).

جـ. ربع ثابت الاضمحلال للنظير (Y).　　د. نصف ثابت الاضمحلال للنظير (Y).

وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي

الفكرة الرئيسة:

للتفاعلات النوويّة تطبيقات مُهِمّة في الحياة، مثل توليد الطاقة، وإنتاج النظائر المشعّة التي تُستخدَم في تشخيص الأمراض وعلاجها، وفي كثير من التطبيقات الصناعية.

نتاجات التعلّم:

- أُفسِّر إمكانية حدوث الاندماج النووي بين نواتين خفيفتين، وإمكانية حدوث الانشطار للنوى الثقيلة.
- أستخدم رسومًا توضيحية في شَرْح كيفية توليد المفاعل النووي الطاقة الكهربائية.
- أذكر استخدامات النظائر المشعّة في مجالات الحياة المختلفة، وفوائدها ومضارها.
- أُبيّن الآثار الإيجابية والآثار السلبية الناجمة عن استخدام الطاقة النووية.
- أذكر أنّ الطاقة النووية أحد مصادر الطاقة البديلة، ثم أُبيِّن استخداماتها السلميّة.
- أحسب الطاقة الناتجة من تفاعل نووي انشطاري أو اندماجي.

المفاهيم والمصطلحات:

التفاعل النووي	Nuclear Reaction
النواة المركّبة	Compound Nucleus
التفاعل المتسلسل	Chain Reaction
تخصيب اليورانيوم	Uranium Enrichment
الكتلة الحرجة	Critical Mass
الانشطار النووي	Nuclear Fission
الاندماج النووي	Nuclear Fusion

التفاعل النوويّ Nuclear Reaction

يحدث **تفاعلٌ نوويٌّ Nuclear reaction** عند اصطدام نواتي ذرتين، أو اصطدام جُسيم نووي مثل، البروتون أو النيوترون بنواة ذرّة أخرى، وقد ينتج من ذلك نواة جديدة أو أكثر.

ولإحداث تفاعل نووي بين جُسيم ونواة، تقذف النواة بذلك الجسيم وعندما يقترب منها مسافة كافية، يبدأ عندئذٍ تأثير القوة النوويّة. ويمكن التعبير عن التفاعل النووي بالصورة الآتية:

$$a + X \rightarrow b + Y$$

حيث يُسمّى الجسيم (a) **القذيفة** Projectile في حين تُسمى (X) **النواة الهدف** Target، و (b) الجُسيم الناتج من التفاعل النووي، و (Y) النواة الناتجة.

في بعض التفاعلات النووية، تمتصّ النواة الهدف القذيفةَ لتشكّل **نواة مركّبة Compound nucleus (CN)** التي لا تلبث أن تضمحلّ لتعطي نوًى وجسيمات من الممكن أن تختلف عن تلك الداخلة في التفاعل. ومن الأمثلة على ذلك، ما قام به رذرفورد عام 1919 عندما قذف نواة النيتروجين ($^{14}_{7}N$) بجسيمات ألفا (α)، ونتج من ذلك تحرّر بروتون على النحو الآتي:

$$\alpha + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{18}_{9}F^{*} \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}p$$

لقد بدأ هذا التفاعل بنواة النيتروجين ($^{14}_{7}N$) المستقرة مع جسيم ألفا (α) لتكوين نواة مركّبة وهي نظير الفلور ($^{18}_{9}F^{*}$) غير المستقر، التي لا تلبث أن تضمحلّ لينتج منها نواة مستقرة ($^{17}_{8}O$) وبروتون ($^{1}_{1}p$). ومن الأمثلة الأخرى على القذائف النووية، البروتونات ونواة الديتيريوم، والنيوترونات. إنّ شحنة جسيمات ألفا والبروتونات موجبة، لذا تُسرَّع حتى تمتلك طاقة حركيّة كافية تُمكّنها من التغلب على قوة التنافر الكهربائية مع النواة الهدف. أمّا النيوترونات المتعادلة كهربائيًّا، فلا تتأثر بقوة تنافر كهربائية؛ لذا تُعدّ من القذائف المُهِمّة في إنتاج النظائر المشعّة، التي تُستخدم في العديد من مجالات الحياة.

وزارة التربية والتعليم والبحث العلمي

تُحسب الطاقة الممتَصّة أو المتحرّرة من التفاعل (Q) من الفرق في الكتلة بين كتل النوى والجسيمات الداخلة في التفاعل وتلك الناتجة منه باستخدام العلاقة الآتية:

$$Q = [m_a + m_X - (m_b + m_Y)] \times 931.5$$

حيث الكتل بوحدة (amu) و Q بوحدة (MeV).

إذا كانت قيمة (Q) موجبة يكون التفاعل **مُنتِجًا للطاقة** Exoergic وإذا كانت قيمة (Q) سالبة يكون التفاعل **ماصًّا للطاقة** Endoergic.

أُفكّر: في التفاعلات النووية تُسرَّع القذيفة وتُوجَّه نحو النواة الهدف. فما المجالات المستخدَمة في تسريع القذيفة وتوجيهها نحو النواة الهدف؟ وما دَوْر كلٍّ منها؟

✓ **أتحقّق:** أُوضِّح المقصود بالتفاعل النووي.

المثال 12

في التفاعل النووي الآتي: ${}^{1}_{0}n + {}^{10}_{5}B \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He$

أحسب الطاقة الناتجة من التفاعل بوحدة الإلكترون فولت. علمًا أنّ كتل الجُسيمات والنوى مُبيَّنة في الجدول الآتي:

النواة أو الجُسيم	${}^{7}_{3}Li$	${}^{4}_{2}He$	${}^{10}_{5}B$	${}^{1}_{0}n$
الكتلة (amu)	7.0144	4.0015	10.0103	1.0087

المُعطيات: الكتل في الجدول

المطلوب: $Q = ?$

الحل:

$$Q = [m_a + m_X - (m_b + m_Y)] \times 931.5$$

$$= 1.0087 + 10.0103 - (4.0015 + 7.0144)$$

$$= 0.0031 \times 931.5 = 2.88 \text{ MeV}$$

وليد الأعداد والمراجعة

الانشطار النووي Nuclear Fission

الانشطار النووي Nuclear fission هو انقسام نواة ثقيلة لنواتين أو أكثر، أصغر منها في الكتلة. فعند قذف نواة نظير اليورانيوم 235– بنيوترون بطيء تنشطر إلى نوى ذات عدد كتلي أقل إضافة إلى ثلاث نيوترونات (أو اثنين) فمثلًا، عند قَذْف نواة $({}^{235}_{92}U)$ بنيوترون بطيء تنشطر إلى نواتين، هما: $({}^{141}_{56}Ba)$ و $({}^{92}_{36}Kr)$، وينتج 3 نيوترونات سريعة، وتمتلك النوى الناتجة من هذا الانشطار طاقات ربط نووية لكل نيوكليون أكبر منها في النواة المنشطرة، كما في الجدول (5)، ويصاحب ذلك نَقْص في الكتلة يتحوّل إلى طاقة. ويمكن التعبير عن هذا الانشطار بالمعادلة النووية الآتية:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U^{*} \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n $$

حيث نواة $({}^{236}_{92}U^{*})$ المشارة تمثّل النواة المركّبة في هذا التفاعل.

إنّ انشطار كلّ نواة ${}^{235}_{92}U$ ينتج منه طاقة تساوي (200 MeV) تقريبًا، أو ما يعادل $(3.2 \times 10^{-11}\ \text{J})$، أمّا الطاقة الناتجة من انشطار (1 kg)، فتساوي $(82 \times 10^{12}\ \text{J})$. وهذه الطاقة تكفي لتزويد نحو (45) ألف منزل تقريبًا مدة شهر، يستهلك كلٌّ منها طاقة كهربائية بمقدار (500 kWh).

النيوترونات الثلاثة الناتجة قد تسقط على ثلاث نوى يورانيوم $({}^{235}_{92}U)$ ما يؤدي الى انشطارها وانتاج تسع نيوترونات جديدة قد تؤدي إلى اشطار تسع نوى يورانيوم $({}^{235}_{92}U)$ وإنتاج سبع وعشرين نيوترونا، وعندما تستمر هذه العملية بشكل متتابع يسمى هذا النوع من التفاعل **تفاعُلًا مُتسلسِلًا Chain reaction** على نحو ما يظهر في الشكل (10).

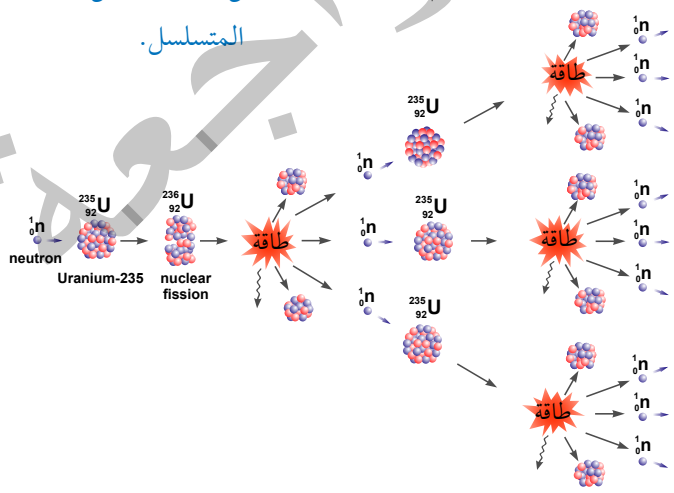
كي يكون التفاعل المتسلسل ممكنًا من الناحية العمليّة يجب تحقّق شروط عدّة، أهمّها توافر **اليورانيوم المخصّب** Enriched uranium. حيث يحتوي اليورانيوم الخام (0.71%) تقريبًا من اليورانيوم $({}^{235}_{92}U)$ المستخدم في التفاعل المتسلسل، ونحو (99.27%) تقريبًا من اليورانيوم $({}^{238}_{92}U)$، ونسبة قليلة جدًّا منظائر أخرى. ونظرًا إلى أنّ نسبة $({}^{235}_{92}U)$ قليلة؛ يجب معالجة اليورانيوم الخام لزيادة نسبة النظير $({}^{235}_{92}U)$ الذي يُستخدم في الوقود النووي. إنّ عمليّة زيادة نسبة اليورانيوم $({}^{235}_{92}U)$ في عينة من اليورانيوم تُسمّى **تخصيب اليورانيوم Uranium Enrichment**. إضافةً إلى ذلك، يجب توفير الحدّ الأدنى من الكتلة التي تضمن استمرار حدوث التفاعل، وتُسمّى **الكتلة الحرجة Critical mass** وهي أقلّ كتلة من الوقود النووي تضمن استمرار حدوث التفاعل المتسلسل. كما يجب إبطاء سرعة النيوترونات المنبعثة لتتمكن من إحداث تفاعلات انشطار جديدة.

الجدول (5): طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

النواة	$\frac{BE}{A}$ (MeV)
${}^{235}_{92}U$	7.5909
${}^{141}_{56}Ba$	8.3261
${}^{92}_{36}Kr$	8.5127

أُفكّر: لماذا يحتاج البروتون إلى طاقة أكبر من النيوترون ليقترب من النواة ويُحدِث تفاعلًا نوويًّا؟

الشكل (10): التفاعل المتسلسل.



الاندماج النوويّ Nuclear Fusion

يُسمّى التفاعل الذي تندمج فيه نواتان خفيفتان لتكوين نواة كتلتها أقلّ من مجموع كتلتي النواتين المندمجتين، ولها طاقة رَبْط نووية لكل نيوكليون أكبر ممّا لهما، بتفاعل **الاندماج النووي Nuclear fusion** يحدث الاندماج النووي للنوى الخفيفة. فمثلًا، قد تندمج نواتا نظيري الهيدروجين؛ الديتيريوم $({}^{2}_{1}H)$ والتريتيوم $({}^{3}_{1}H)$ لتكوين نواة الهيليوم $({}^{4}_{2}He)$ ونيوترون كما في الشكل (11). يوضّح الجدول (6) طاقة الربط النووية لكل نيوكليون لكلٍّ منها. ألاحظ من الجدول أنّ اندماج نواتي الديتيريوم $({}^{2}_{1}H)$ والتريتيوم $({}^{3}_{1}H)$ نتج منه نواة الهيليوم $({}^{4}_{2}He)$ ذات طاقة رَبْط نووية لكل نيوكليون أكبر منها لكل من نواتي الديتيريوم والتريتيوم. ويصاحب عملية الاندماج نَقْص في الكتلة ينتج منه تحرّر طاقة كبيرة. من الأمثلة على تفاعلات الاندماج النوويّ:

الجدول (6): طاقة الربط النوويّة لكل نيوكليون.

النواة	$\frac{BE}{A}$ (MeV)
${}^{2}_{1}H$	1.11
${}^{3}_{1}H$	2.83
${}^{4}_{2}He$	7.07

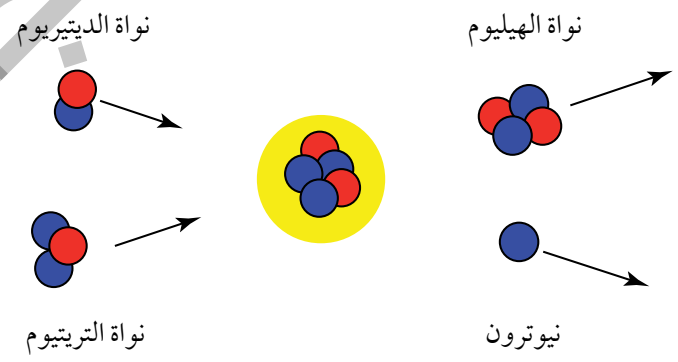
$${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

$${}^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{1}H + {}^{0}_{1}e^{+} + \nu$$

$${}^{1}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma$$

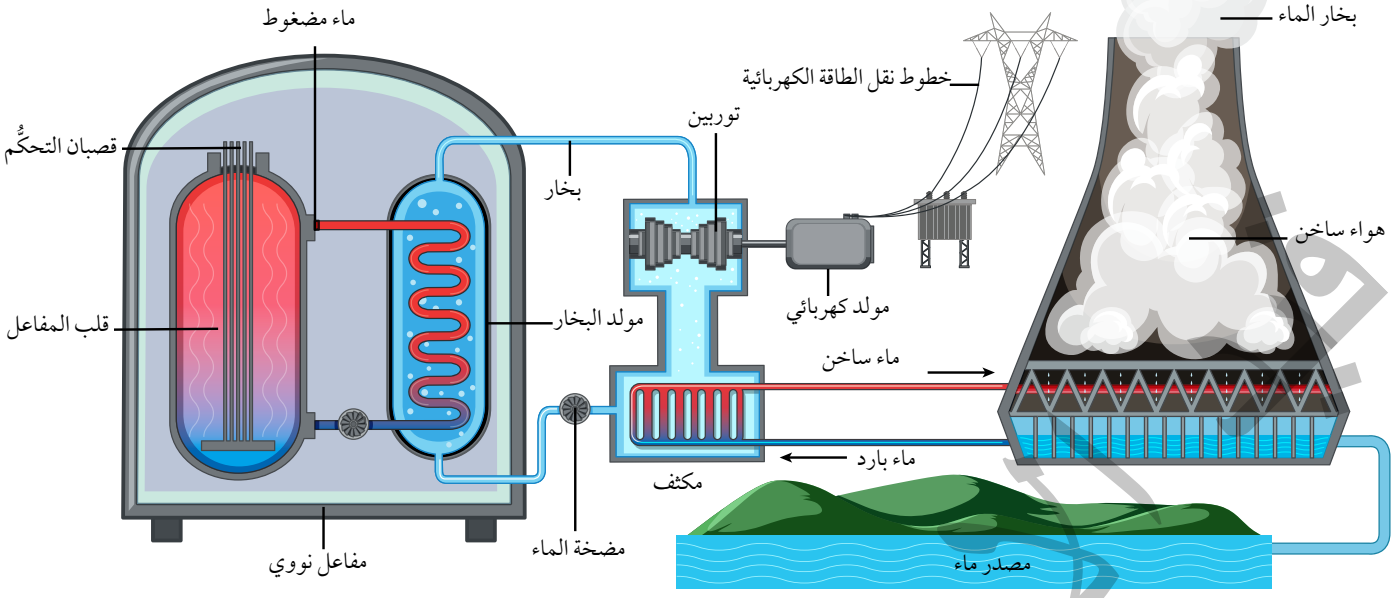
مثل هذه التفاعلات النوويّة هي مصدر الطاقة التي تصلنا من الشمس، حدوثها يحتاج إلى درجات حرارة عالية جدًّا؛ لذا تُسمّى هذه التفاعلات **التفاعلاتِ النوويّةَ الحراريّةَ** Thermonuclear fusion reactions إنّ درجة الحرارة العالية تزوّد النواتين بطاقة حركيّة كافية للتغلّب على قوة التنافر الكهربائيّة بين النواتين عند اقترابهما من بعض لمسافة تبدأ عندها القوة النوويّة بالتأثير.

✓ **أتحقّق:** ما أهميّة درجة الحرارة العالية للتفاعل النووي الاندماجي؟



الشكل (11): اندماج نواتي الديتيريوم والتريتيوم لتشكيل نواة الهيليوم.

قيد الإعداد والمراجعة



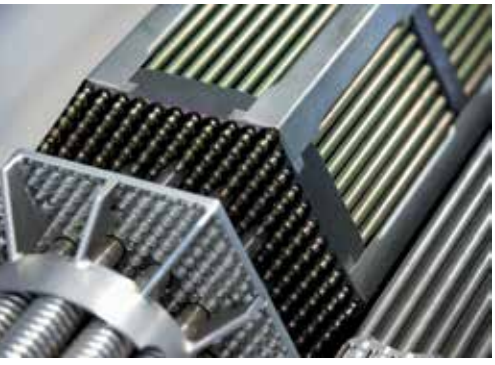
الشكل (12): رسم تخطيطي لمحطّة طاقة نوويّة تستخدم مفاعل الماء المضغوط.

المفاعل النوويّ Nuclear Reactors

يُسمّى النظام الذي يهيّئ الظروف المناسبة لاستمرار حدوث التفاعل المتسلسل والسيطرة عليه المفاعل النووي. الشكل (12) يبيّن الأجزاء الرئيسة لمفاعل نووي يَستخدم الماء في عملية التبريد، يُسمّى مفاعل الماء المضغوط Pressurized water reactor.

ويتكوّن المفاعل النووي الموضَّح في الشكل من الأجزاء الأساسية الآتية:

1. **الوقود النوويّ Nuclear fuel:** تكون مادّة الوقود النوويّ على الغالب من اليورانيوم المخصّب، وهي على هيئة أقراص يوضع بعضها فوق بعض في أنابيب طويلة لتشكيل قضبان الوقود النووي كما في الشكل (13).
2. **قضبان التحكّم Control rods:** تُصنع من موادّ لديها مقدرة عالية على امتصاص النيوترونات، مثل الكادميوم –113 والبورون –10. فعند إدخال عدد مناسب منها بين حزم الوقود النووي تمتصّ بعض النيوترونات وهذا يُبطِئ التفاعل المتسلسل، وبذلك يُتحكَّم في الطاقة الناتجة من المفاعل.
3. **الموادّ المُهدّئة Moderators:** وهي موادّ ذات أعداد كُتْلية صغيرة، مثل: الماء الثقيل، والماء العادي، والغرافيت. وظيفتها ابطاء النيوترونات الناتجة من الانشطار؛ لتتمكّن من إحداث تفاعلات انشطارية جديدة. علمًا أنّ احتماليّة انشطار نواة اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) تزداد كلما كانت الطاقة الحركية للنيوترونات الممتصَّة أقل.



الشكل (13): قضبان الوقود النووي.

الربط بالفضاء

مكّنت التكنولوجيا النووية في إنتاج الطاقة العلماء من استكشاف الفضاء بدقة، إذ تُستخدم الطاقة الناتجة من البلوتونيوم في تزويد المركبات الفضائية بالطاقة الكهربائية، مثل المركبة الفضائية فوياجر 1 التي أُطلقت عام 1977 لدراسة النظام الشمسي الخارجي التي ما تزال ترسل بيانات إلى يومنا هذا.

الشكل (14): أبراج التبريد يتصاعد منها بخار الماء.

4. **نظام التبريد Cooling system:** تُستخدم أبراج تبريد لتزويد المفاعل والمكثّف بالماء البارد باستمرار لتبريد المفاعل النووي، أتأمّل الشكل (14).

5. **مولّد بخار الماء Steam generator:** يُحوِّل الماءَ الساخن والمضغوط القادم من قلب المفاعل إلى بخار ماء يُستخدم في إدارة توربينات متّصلة بمولّدات كهربائية لتوليد الطاقة الكهربائيّة.

✓ **أتحقّق:** أُعدّد أجزاء المفاعل النووي الرئيسة.

الربط بالتكنولوجيا

افتُتح المفاعل النوويّ الأردنيّ للبحوث والتدريب برعاية ملكية سامية عام 2016م في جامعة العلوم والتكنولوجيا في مدينة إربد، حيث يعمل بقدرة (5 MW) قابلة للزيادة إلى (10 MW). ويُستخدم هذا المفاعل في أغراض عدّة، منها:
البحث العلميّ، وإنتاج النظائر المشعّة للاستخدامات الطبية، إضافة إلى التدريب والتأهيل على التكنولوجيا الإشعاعية والنوويّة.

قيد إعداد والمراجعة

تطبيقات على الفيزياء النووية Applications of Nuclear Physics

للفيزياء النووية تطبيقات عدّة في مختلف نواحي الحياة، منها:

التعقُّب Tracing

تتكونُ المُتعقّبات من نظائر مشعّة تُحقن في الجسم للكشف عن خلل وظيفي في أحد أعضائه. ، فمثلًا، يُستخدَم اليود –131 المشعّ في الكشف عن خلل في عمل الغدة الدرقية، حيث يشربُ المريضُ كمية قليلة من محلول يوديد الصوديوم المشعّ، ويُشخَّص الخلل في عمل الغدة الدرقية بمعرفة كمية اليود المشعّ المتبقة فيها مع مرور الزمن. من التطبيقات الطبّية الأخرى حَقْن وريد في القدم بسائل يحتوي الصوديوم المشعّ، وقياس الزمن اللازم حتى يصل السائل المشع إلى عضو معين في الجسم، وذلك باستخدام جهاز للكشف عن الإشعاع. والزمن المقاس يُمكّن من معرفة ما إذا كان هناك تضيُّق أو انسداد في الأوردة أو الشرايين. وفي التطبيقات الطبية يُعرَّض المريض لجرعات إشعاعية متدنيّة ومحسوبة بدقة بحيث لا تؤثر سلبًا فيه.

الربط بالحياة

يمكن استخدام التعقّب الإشعاعيّ في مراقبة تدفُّق السوائل والغازات خلال الأنابيب في تحديد أماكن التسرّب. وتَرصد أدوات التعقّب الزراعيـة تدفُّـق المُغذّيات عَبْـر النباتات.

العلاج بالإشعاع Radiotherapy

يستخدم العلاج الإشعاعي لقتل الخلايا السرطانية. إحدى طرق العلاج الإشعاعي، تعتمد على إدخال مادة مشعة إلى الورم مباشرة، عن طريق حقن الجسم بحبيبات صغيرة تحتوي المادة المشعة، فتطلق هذه الحبيبات الأشعة في مكان الورم لمدة زمنية تعتمد على عمر النصف للمادة المشعة والملائمة للمعالجة الطبية المطلوبة. كما يمكن استخدام العلاج الإشعاعي عن بعد، وذلك بتوجيه حزمة من الأشعة نحو الخلايا السرطانية لقتلها، مع مراعاة حماية الأنسجة الطبيعية المجاورة من الإشعاع.

تحليل الموادّ Materials Analysis

يمكنُ تحديدُ العناصر التي تُكوّن عينة معينة بطرائق كيميائية، وهذا عادة يتطلب استخدام كمية كبيرة نسبيًّا من تلك العينة. يمكن التغلب على ذلك بقذف كمية قليلة من العينة المراد معرفة تركيبها بالنيوترونات، ويترتّب على ذلك تحوُّل العناصر التي امتصت النيوترونات إلى عناصر مشعة، وتُحدَّد هوية تلك العناصر بالكشف عن نوع الإشعاعات الصادرة عن العينة المشعّة وقياس طاقتها.

حِفْظ الموادّ الغذائية Food Preserving

تطبيقات الفيزياء النووية في مجال الأطعمة تشهد اهتمامًا متزايدًا لقدرة الإشـعاعـات النوويـة على تعطيل عمل البكتيريا و قتلها؛ لذلك تُعرَّض الموادّ الغذائية المراد تخزينها مددًا طويلة لأشعة غاما أو حزم من الإلكترونات ذات طاقة مرتفعة لقتل البكتيريا، ومن ثَمَّ، تُحفظ في علب مغلقة؛ مَنْعًا لوصول بكتيريا جديدة إليها.

قيد الإعداد والمراجعة

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضِّح المقصود بتفاعلَي الانشطار النوويّ والاندماج النوويّ.

2. للتفاعلين النوويين الآتيين، أجيب عمّا يأتي:

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n$$

علمًا أنّ كتل النوى بوحدة (*amu*) موضّحة في الجدول الآتي:

$^{235}_{92}U$	$^{144}_{56}Ba$	$^{89}_{36}Kr$	$^{1}_{0}n$	$^{4}_{2}He$	$^{3}_{1}H$	$^{2}_{1}H$
234.9934	143.8922	88.8979	1.0087	4.0015	3.0155	2.0136

أ . أيّ التفاعلين اندماج نووي وأيّهما انشطار نووي؟

ب. **أستخدم الأرقام:** أحسب الطاقة الناتجة من التفاعل لكلا التفاعلين.

جـ. **أستخدم الأرقام:** أحسب الطاقة الناتجة لكل نيوكليون لكلا التفاعلين. أيّهما أكبر؟

3. **أُقارن:** أُعدِّد أوجه التشابه وأوجه الاختلاف بين تفاعلَي الاندماج والانشطار.

4. **أفسّر:** ما أهميّة استخدام كلٍّ ممّا يأتي في المفاعل النووي؟

أ . القضبان التي تحتوي الكادميوم.

ب. مُهدِّئات النيوترونات.

5. **التفكير الناقد:** لماذا يُعدّ استخدام تفاعلات الاندماج النووي، إن أمكن في توليد الطاقة، أقلّ خطرًا على البيئة من استخدام تفاعلات الانشطار النووي؟

قيد الإعداد و المراجعة

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

1. عند قذف نواة النيتروجين المستقرة بجسيم ألفا، تنتج نواة الفلور غير المستقرة، حسب المعادلة: $({}^{14}_{7}N + \alpha \rightarrow {}^{18}_{9}F^{*})$، ولكي تصبح نواة الفلور مستقرة، فإنها تتحول إلى نواة الأكسجين $({}^{17}_{8}N)$ باعثة أحد الجسيمات الآتية:

أ . بوزيترون. ب. نيوترون. جـ. بروتون. د. إلكترون.

2. في التفاعل النووي الآتي: ${}^{1}_{0}n + {}^{10}_{5}B \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He$

إذا علمت أن الطاقة الناتجة من التفاعل (2.888 MeV)، فإن العبارة الصحيحة لإكمال الفراغ في الجملة الآتية: «مجموع كتل النوى والجسيمات الناتجة من التفاعل..... من مجموع كتل النوى والجسيمات الداخلة فيه».

أ . أكبر بمقدار (322.5 amu). ب. أقل بمقدار (322.5 amu).

جـ. أكبر بمقدار (0.0031 amu). د . أقل بمقدار (0.0031 amu).

3. عند اندماج نواتين معًا تتكون نواة جديدة أكثر استقرارًا. إن كتلة النواة الجديدة المتكونة مقارنة بمجموع كتل النواتين المندمجتين، وطاقة الربط لكل نيوكليون لهذه النواة :

أ . كتلة أكبر، وطاقة ربط أقل لكل نيوكليون. ب. كتلة أكبر، وطاقة ربط أكبر لكل نيوكليون.

جـ. كتلة أقل، وطاقة ربط أقل لكل نيوكليون. د . كتلة أقل، وطاقة ربط أكبر لكل نيوكليون.

4. إذا كان مجموع كتل النوى الداخلة في تفاعل نووي (20.00 amu) ومجموع كتل النوى الناتجة من التفاعل (19.85 amu)، فإن طاقة التفاعل (Q) بوحدة (MeV) تساوي:

أ . 139.7 ب. -139.7 جـ. 0.15 د. -0.15

5. تُعرّض بعض المواد الغذائية لإشعاعات نووية لتخزينها لفترات طويلة دون أن تفسد. إحدى هذه الإشعاعات:

أ . نيوترونات منخفضة الطاقة. ب. نيوترونات عالية الطاقة.

جـ. إلكترونات منخفضة الطاقة. د . إلكترونات عالية الطاقة.

قيد الإعداد والمراجعة

المفاعل النوويّ الاندماجي
Nuclear Fusion Reactor

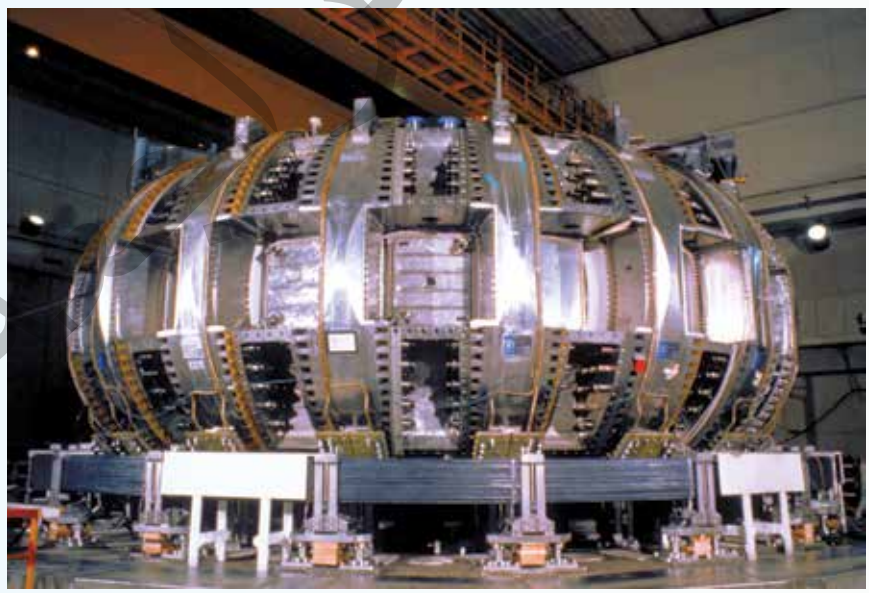
تُعدّ كميّة الطاقة الكبيرة المتولّدة من الاندماج النووي محفِّزًا للعلماء لتسخير هذه الطاقة في أغراض مفيدة، وتُبذَل كثير من الجهود حاليًّا لتطوير مفاعل نووي اندماجي مستدام يمكن التحكّم فيه. ومن مزاياه: توافر الوقود النووي الديتيريوم ($_1^2H$) والتريتيوم ($_1^3H$) ، وإنتاج طاقة كبيرة مقارنة بتفاعلات الانشطار النووي، وتكوين عدد قليل نسبيًّا من المنتجات الثانوية المشعّة مقارنة بمفاعلات الانشطار النووي. فوقود اليورانيوم بعد انشطاره يحتوي نسبة عالية من الموادّ المشعّة التي يجب التخلص منها، وتتطلّب إجراءات صارمة عند نَقْل اليورانيوم المخصّب لا تلزم عند نَقْل الوقود المستخدم في الاندماج النووي.

وتُنتِج النجوم طاقتها من تفاعلات الاندماج النووي بدورة تُسمّى دورة البروتون-بروتون، وتَحدث هذه التفاعلات عند درجة حرارة عالية جدًّا وكثافة عالية جدًّا للبروتونات. ووُجِد أنّ التفاعل الأنسب للاستخدام في مفاعلات الاندماج هو تفاعل الديتيريوم ($_1^2H$) والتريتيوم ($_1^3H$).

$$_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n \quad , \quad Q = 17.6\,MeV$$

ويتوافر الديتيريوم بكميات كبيرة في البحيرات والمحيطات وهو غير مكلف. أمّا التريتيوم، فإنّه مشعّ ($t_{1/2} = 12.3$ y) حيث يخضع لاضمحلال بيتا السالبة لينتج ($_2^3He$). ولهذا السبب لا يوجد التريتيوم طبيعيًّا بكميات كبيرة، ويجب إنتاجه صناعيًّا.

للحصول على الطاقة من الاندماج النووي يجب توافر درجات حرارة عالية (نحو 10^8 K تقريبًا) تؤدي إلى تأيين الذرّات وتكوين نظام من الإلكترونات والأيونات الموجبة يُسمّى بلازما. وبالإضافة إلى درجات الحرارة العالية، يجب التأثير بضغط كبير للحصول على كثافة عالية من الأيونات. إنّ درجات الحرارة المرتفعة تؤدي إلى نقصان في كثافة الأيونات وهذا يسبِّب إحدى المشكلات الرئيسة التي تواجه انتاج الطاقة من تفاعلات الاندماج النووي. وقد استطاع العلماء تحقيق تفاعل اندماج الديتيريوم ($_1^2H$) والتريتيوم ($_1^3H$) مدّة زمنية قصيرة جدًّا باستخدام مفاعل اندماجي، يُعرف باسم توكاماك (tokamak). حيث تُحفظ البلازما داخل مجال مغنا طيسي .



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

1. النيوترينو جُسيم يَنتج من عمليّة:

أ . تحلُّل البروتون إلى نيوترون وبوزيترون. ب. تحلُّل النيوترون إلى بروتون وإلكترون.

جـ. اضمحلال غاما. د . خروج جُسيم ألفا من النواة.

2. النواة غير المستقرة تتحوّل تلقائيًّا إلى نواة كتلتها:

أ . أقلّ وطاقة رَبْط أكبر لكل نيوكليون. ب. أكبر وطاقة رَبْط أقلّ لكل نيوكليون.

جـ. أكبر وطاقة رَبْط أكبر لكل نيوكليون. د . أقلّ وطاقة رَبْط أقلّ لكل نيوكليون.

3. $({}^{A}_{Z}X)$ نواة نظير عنصر غير مستقرّة موجودة ضمن سلسلة اضمحلال. خلال عددٍ من التحولات أُطلِقت أربعة جُسيمات بيتا السالبة وجُسيم ألفا واحدًا، وعليه، فإنّ النواة الناتجة تكون:

أ . ${}^{A-4}_{Z+2}Y$ ب. ${}^{A-2}_{Z-4}Y$ جـ. ${}^{A+2}_{Z+4}Y$ د. ${}^{A+4}_{Z-2}Y$

4. عدد جُسيمات ألفا وعدد جُسيمات بيتا السالبة المنبعِثة من سلسلة تحوّلات تضمحلّ خلالها نواة $({}^{238}_{92}U)$ إلى نواة $({}^{226}_{88}X)$ على الترتيب هي:

أ . 2 ألفا ، 3 بيتا. ب. 3 ألفا ، 4 بيتا. جـ. 2 ألفا ، 2 بيتا. د. 3 ألفا ، 2 بيتا.

5. تحتوي أجهزة إنذار الدخان مصدرا إشعاعيا عادة ما يكون نظير الأمريسيوم – 241، الأشعة النووية التي يطلقها هي:

أ . غاما. ب. بيتا الموجبة. جـ. بيتا السالبة. د. ألفا.

6. إنّ حجم النواة يتناسب:

أ . طرديًّا مع عددها الكُتْلي. ب. عكسيًّا مع عددها الكُتْلي.

جـ. طرديًّا مع مكعب عددها الكُتْلي. د. طرديًّا مع الجذر التكعيبي لعددها الكُتْلي.

7. تهدف عملية تخصيب اليورانيوم إلى إنتاج وقود نووي يحتوي نسبة عالية من:

أ . ${}^{238}_{92}U$ ب. ${}^{234}_{92}U$ جـ. ${}^{232}_{92}U$ د. ${}^{235}_{92}U$

8. نسبة نصف قطر النواة $({}^{27}_{13}Al)$ إلى نصف قُطْر النواة $({}^{64}_{29}Cu)$ تساوي:

أ . $\frac{3}{4}$ ب. $\frac{27}{64}$ جـ. $\frac{8}{3}$ د. $\frac{64}{27}$

9. نسبة حجم النواة $({}^{27}_{13}Al)$ إلى حجم النواة $({}^{64}_{29}Cu)$ تساوي:

أ . $\frac{3}{8}$ ب. $\frac{27}{64}$ جـ. $\frac{8}{3}$ د. $\frac{64}{27}$

10. تُبطِّأ النيوترونات في المفاعل النووي بواحد ممّا يأتي:

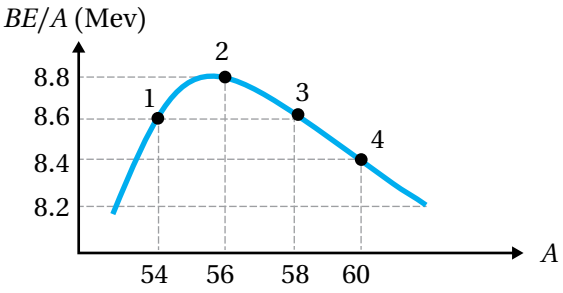
أ . الماء الثقيل. ب. الكادميوم. جـ. اليورانيوم. د. غاز الهيدروجين.

11. إذا كانت كتلة نواة نظير الليثيوم $({}^{7}_{3}Li)$ تَقلّ بمقدار (0.042 amu) عن مجموع كتل مُكوِّناتها، فإنّ متوسط طاقة الربط النووية لكل نيوكليون (MeV) لها تساوي:

أ . 3.910 ب. 5.589 جـ. 1.412 د. 7.120

قيد الإعداد والمراجعة

12. يوضح الشكل المجاور التمثيل البياني للعلاقة بين طاقة الربط لكل نيوكليون والعدد الكتلي لأربع نوى (4، 3، 2، 1). النواة التي لها أكبر طاقة ربط هي:



أ. (1). ب. (2).

جـ. (3). د. (4).

13. نظير مشع نشاطيته عند لحظة ما (800 Bq)، وثابت الاضمحلال له ($2\ln(2)\ \text{min}^{-1}$). حتى تصبح نشاطيته الاشعاعية (50 Bq)، فإن المدة الزمنية بوحدة (s) اللازمة لذلك:

أ. 2 ب. 30 جـ. 60 د. 120

14. تمر النواة (X) في سلسلة من الاضمحلالات الإشعاعية متحولة إلى النواة (Y) على النحو الآتي:

$$({}^{218}_{84}X \xrightarrow{\alpha} \text{B} \xrightarrow{\beta^-} \text{C} \xrightarrow{\gamma} \text{D} \xrightarrow{\alpha} \text{E} \xrightarrow{\beta^+} \text{F} \xrightarrow{\gamma} {}^{A}_{Z}Y)$$

العدد الذري (Z) والعدد الكتلي (A) للنواة (Y) هما:

أ. $A=210, Z=82$ ب. $A=210, Z=80$ جـ. $A=210, Z=84$ د. $A=211, Z=80$

15. تنتج النجوم طاقتها من تفاعلات تسمى دورة البروتون- بروتون، وتحدث عند درجات حرارة:

أ. عالية، وكثافة منخفضة للبروتونات.

ب. منخفضة، وكثافة عالية للبروتونات.

جـ. عالية و كثافة عالية للبروتونات.

د. منخفضة وكثافة منخفضة للبروتونات.

2. أُكمل المعادلات النوويّة الآتية:

${}^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + \cdots + \cdots$

${}^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{7}_{3}Li + \cdots$

${}^{242}_{96}Cm + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{245}_{98}Cf + \cdots$

${}^{1}_{0}n + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{14}_{6}C + \ldots.$

${}^{13}_{7}N \rightarrow {}^{13}_{6}C + \ldots. + \ldots..$

قرار الأعداد والمراجعة

3. **أستخدم الأرقام:** عينة من البولونيوم ($^{210}_{84}Po$) تحتوي (2.80×10^{18} atoms)، وثابت الاضمحلال للبولونيوم ($^{210}_{84}Po$) يساوي ($5.80 \times 10^{-8}\ s^{-1}$)، أجد ما يأتي:

أ . عمر النصف للبولونيوم ($^{210}_{84}Po$).

ب. النشاطيّة الإشعاعيّة.

جـ. عدد النوى المتبقيّة من البولونيوم ($^{210}_{84}Po$) بعد مرور مدة زمنية مقدارها أربعة أمثال عمر النصف.

4. **أستخدم الأرقام:** عينة من الأمريسيوم ($^{241}_{95}Am$) تحتوي (1.25×10^{15} atoms) ونشاطيّتها الإشعاعيّة (1.70 μCi)، أجد ثابت الاضمحلال للأمريسيوم ($^{241}_{95}Am$).

5. **أستخدم الأرقام:** يمثّل الشكل المجاور عينة من الكوبالت ($^{60}_{27}Co$) تُستخدم في المختبرات لدراسة طبيعة إشعاع غاما، بالاستعانة بالمعلومات المثبَتة على الشكل، أجد:

أ . عمر النصف.

ب. النشاطيّة الإشعاعيّة للعينة.

جـ. تاريخ تصنيع العينة.

د . النشاطيّة الإشعاعيّة عام 2025، بعد مرور زمن يساوي ثلاثة أمثال عمر النصف.

6. **أستنتج:** إذا كانت طاقة الربط النووية لنواة ($^{23}_{11}Na$) تساوي (186.66 MeV)، ولنواة ($^{23}_{12}Mg$) تساوي (181.82 MeV)، أيّ النواتين أكثر استقرارًا؟ أُفسّر إجابتي.

7. **أستخدم الأرقام:** إذا كانت طاقة الربط النوويّة لكل نيوكليون لنواة الفوسفور $^{30}_{15}P$ تساوي (8.35 MeV)، أجد ما يأتي:

أ . طاقة الربط النوويّة لنواة الفسفور $^{30}_{15}P$.

ب. كتلة نواة الفسفور $^{30}_{15}P$.

8. **أستخدم الأرقام:** قُذِفت نواة ($^{9}_{4}Be$) بجُسيم ألفا، وفقًا للتفاعل النووي الآتي:

$$^{4}_{2}He + {}^{9}_{4}Be \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n$$

فإذا علمت أنّ كتل النوى الداخلة في التفاعل تزيد بمقدار (0.00612 *amu*) على كتل الموادّ الناتجة من التفاعل. واعتمادًا على كتل النوى والجُسيمات في الجدول الآتي أجيب عمّا يأتي:

النواة أو الجُسيم	$^{12}_{6}C$	$^{4}_{2}He$	$^{1}_{1}P$	$^{1}_{0}n$
الكتلة (*amu*)	11.9967	4.0015	1.0073	1.0087

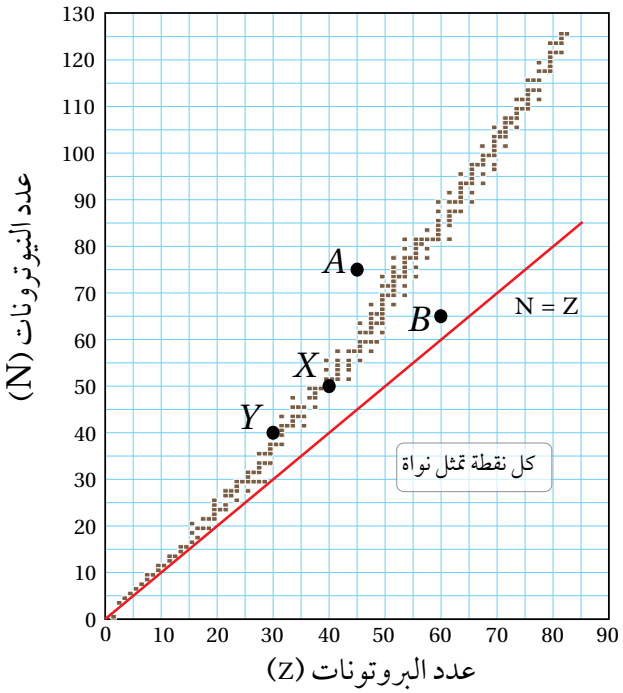
أ . هل التفاعل النووي منتِج للطاقة أم ماصّ لها؟

ب. أحسب كتلة نواة ($^{9}_{4}Be$).

جـ. أحسب طاقة الربط النووية لكل نيوكليون لنواة ($^{12}_{6}C$) بوحدة (MeV).

قيد الإعداد والمراجعة

9. **أستنتج:** يمثّل الرسم البياني المبيَّن في الشكل منحنى الاستقرار النوويّ.



أ . أحسب نصف قُطْر النواة (X).

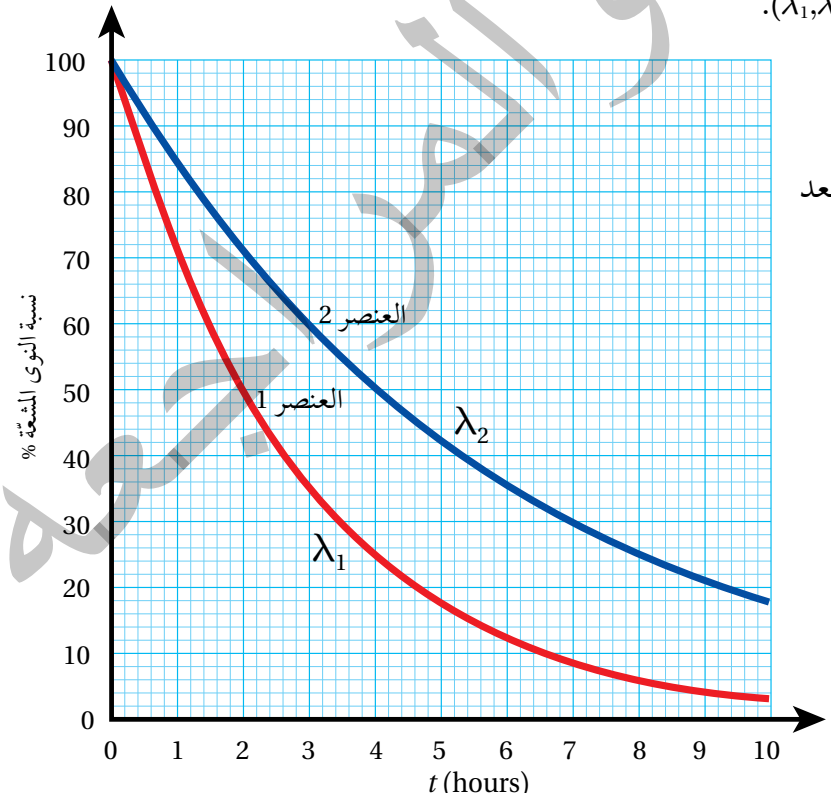
ب. أحسب طاقة الربط النووية للنواة (Y)، علما أنّ كتلتها تساوي $(70.0012\ amu)$.

جـ. أيُّهما يملك طاقة ربط نوويّة لكل نيوكليون أعلى (X) أم (Y)؟ ولماذا؟

د . كيف أُفسِّر أنّ عدد النيوترونات أكبر من عدد البروتونات للنواة (X).

هـ. أسمّي من الشكل نواتين مستقرتين ونواتين غير مستقرتين.

10. **أُحلِّل رسمًا بيانيًّا:** يمثّل الشكل رسمًا بيانيًّا يوضّح العلاقة بين النسبة $\frac{N}{N_0} \times 100\%$ مع الزمن لنظيري عنصرين مشعّين، ثابتُ الاضمحلال لكلٍّ منهما (λ_1, λ_2).



أ . ما عمر النصف لكلٍّ منهما؟

ب. ما نسبة عدد النوى المشعّة المتبقيّة بعد مرور 10 ساعات لكلٍّ من النظيرين؟

جـ. أيّهما أكبر (λ_1) أم (λ_2)؟

قيد الإعداد والمراجعة

مسرد المصطلحات

- **إشابة Doping:** زيادة الموصليّة الكهربائيّة لأشباه الموصلات، بإضافة بعض الموادّ إليها تُسمّى شوائب impurities.
- **اقتران الشغل للفلزّ Work Function:** أقلّ طاقة للأشعة الكهرمغناطيسية تكفي لتحرير إلكترونات من سطح الفلز دون إكسابها طاقة حركية.
- **اضمحلال إشعاعي Radioactive Decay:** التحول التلقائي لنوًى غير مستقرة إلى نوًى أكثر استقرارًا عن طريق انبعاث جسيمات مثل جُسيم ألفا أو جسيم بيتا، وغالبًا ما يصاحب ذلك انبعاث أشعة غاما.
- **إلكترونات التكافؤ Valance Electrons:** الإلكترونات الموجودة في آخر مستوى طاقة للذّرّة، وهي المسؤولة عن تحديد كثيرٍ من خصائص المادّة، مثل التوصيل الكهربائي والتوصيل الحراري.
- **إلكترونات ضوئية Photoelectrons:** الإلكترونات المنبعثة من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردّد مناسب عليه.
- **اندماج نووي Nuclear Fusion:** التفاعل الذي تندمج فيه نواتان خفيفتان لتكوين نواة كتلتها أقل من مجموع كتلتيهما.
- **انشطار نووي Nuclear Fission:** التفاعل الذي تنقسم فيه نواة ثقيلة إلى نواتين أو أكثر، أصغر منها في الكتلة.
- **تخصيب اليورانيوم Enrichment:** عمليّة رَفْع نسبة نظير اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) مقارنة مع نِسَب نظائر اليورانيوم الأخرى.
- **تدفق مغناطيسي Magnetic Flux:** يُعبَّر عنه رياضيًّا بأنّه ناتج الضرب القياسي لمتَّجه المجال المغناطيسي ومتَّجه المساحة.
- **تردُّد طبيعي لدارة Natural frequency (*RCL*):** تردُّد خاصّ بالدارة تعتمد قيمته على كلٍّ من مواسعة المواسع ومحاثّة المحثّ، عندما يتساوى تردُّد مصدر فَرْق الجهد في الدارة معه تحدث حالة الرنين، وتكون عندئذٍ قيمة التيار الفعّال أكبر ما يمكن.

قيد الإعداد والمراجعة

- **تردُّد العتبة Threshold Frequency:** أقلّ تردُّد للأشعة الساقطة يتطلّبه تحرير إلكترونات ضوئية من سطح فلزّ دون إكسابها طاقة حركية.
- **تفاعُل متسلسل Chain Reaction:** تنبعث نيوترونات نتيجة انشطار النواة في تفاعل الانشطار النووي، وهذه النيوترونات تمتصّها نوًى أخرى التي بدورها تنشطر، وتُنتج نيوترونات جديدة تؤدي إلى انشطار مزيد من النوى ، وعليه، يستمرّ التفاعل.
- **تفاعُل نووي Nuclear Reaction:** اصطدام نواتي ذرتين، أو اصطدام جُسيم نووي، مثل البروتون أو النيوترون بنواة ذَرّة أخرى، وقد ينتج من ذلك نواة جديدة أو أكثر.
- **تيار متردّد Alternating Current:** تيار يسري في دارة كهربائيّة مغلقة يتغيّر مقداره واتجاهه بالنسبة إلى الزمن وفقًا لعلاقة جيبيّة.
- **جسم أسود Black Body:** جسم مثالي يمتصّ الأطوال الموجيّة للأشعة الكهرمغناطيسية جميعها ويشعّها، ويعتمد انبعاث الأشعة منه على درجة حرارته فقط.
- **جهد الإيقاف Stopping Potential:** فَرْق الجهد الذي تكون عنده قراءة التيار الكهرضوئي صفرًا.
- **حثّ ذاتيّ Self Induction:** يُعرَّف بأنّه تولُّد قوّة دافعة كهربائيّة حثّية ذاتيّة في دارة مغلقة نتيجة تغيّر التدفّق المغناطيسي، بسبب تغيّر مقدار تيار الدارة نفسها.
- **سلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي Natural Radioactive Decay Series:** مجموعة الاضمحلالات التلقائية التي تبدأ بعنصر مشعّ ثقيل، وتنتهي بعنصر مستقرّ باضمحلال ألفا أو بيتا .
- **طاقة تأيُّن Ionization Energy:** أقلّ طاقة يتطلّبها تحرير إلكترون من الذّرّة دون إكسابه طاقة حركية.
- **طاقة ربط نوويّة Nuclear Binding Energy:** الطاقة التي يجب تزويدها للنواة لفصل مكوّناتها (النيوكليونات) بعضها عن بعض نهائيًّا.
- **طيف امتصاص خطّي Absorption Line Spectrum:** ظهور خطوط معتمة منفصلة على خلفية مضيئة بعد إمرار ضوء الشمس خلال غاز عنصر معيّن.
- **طيف انبعاث خطّي Emission Line Spectrum:** ظهور خطوط مضيئة على خلفية معتمة بعد تحليل الضوء المنبعث من ذرات العناصر المثارة.

قيد الإعداد والمراجعة

- **ظاهرة كهرضوئية Photoelectric Effect:** ظاهرة انبعاث إلكترونات من سطح فلز عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردّد مناسب عليه.
- **عدد ذريّ Atomic Number:** عدد البروتونات في النواة ويساوي عدد الإلكترونات في الذّرّة المتعادلة.
- **عدد كُتْلي Mass Number:** عدد البروتونات والنيوترونات في النواة.
- **عمر النصف Half-Life:** الزمن اللازم لاضمحلال نصف عدد النوى المشعّة.
- **فَرْق جهد متردّد Alternating Potential Difference:** فَرْق جهد يتغيّر في المقدار والاتجاه بالنسبة إلى الزمن وفقًا لعلاقة جيبيّة.
- **قانون فارادي في الحثّ Faraday's Law of Induction:** ينصّ على أنّ: "مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتولّدة في دارة كهربائيّة يتناسب طرديًّا مع المعدل الزمني لتغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يخترقها".
- **قانون لنز Lenz's Law:** ينصّ على أنْ: «يكون اتجاه التيار الحثي المتولد في دارة مغلقة بحيث يولّد مجالًا مغناطيسيا يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له.
- **قوّة دافعة كهربائية حثيّة Induced Electromotive Force:** فَرْق الجهد الكهربائي المتولّد بين طرفي سلك يقطع خطوط مجال مغناطيسي أو في مِلفّ عند تغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يخترقه.
- **قوّة نوويّة قويّة Strong Nuclear Force:** هي قوّة التجاذب بين النيوكليونات في النواة.
- **قيمة فعّالة لفرق الجهد المتردّد Effective Potential Value:** ناتج قسمة القيمة العظمى لفرق الجهد على $(\sqrt{2})$.
- **قيمة فعّالة للتيار المتردّد Effective Current Value:** ناتج قسمة القيمة العظمى للتيار المتردّد على $(\sqrt{2})$.
- **كتلة حرجة Critical Mass:** أقلّ كتلة من الوقود النووي تضمن استمرار حدوث التفاعل المتسلسل، وتضمن عدم تسرّب النيوترونات خارجه.
- **مجال مغناطيسي Magnetic Field** عند نقطة: القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة، عندما تتحرك بسرعة $(1m/s)$ باتجاه عمودي على اتجاه المجال المغناطيسي لحظة مرورها في تلك النقطة.

قيد الإعداد والمراجعة

- **معامل الحثّ الذاتي Coefficient of Self Induction:** (محاثّة Inductane المحثّ): نسبة القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة الذاتيّة المتولِّدة بين طرفي محثّ إلى المعدل الزمني للتغيّر في مقدار التيار الكهربائي المارّ فيه، وهو مقياس لممانعة المحثّ لتغيّر مقدار التيار الكهربائي المارّ فيه، ووَحْدة قياسه هي (V.s/A)، وتُسمّى هنري H بحسب النظام الدوليّ للوَحْدات.
- **معاوقة محثيّة Inductive Reactance:** الممانعة التي يبديها المحثّ لمرور التيار المتردّد في الدارة، وتساوي حاصل ضرب محاثّة المحثّ في التردّد الزاويّ لفرق الجهد.
- **معاوقة مواسعيّة Capacitive Reactance:** الممانعة التي يبديها المواسع لمرور التيار المتردّد في الدارة، وتساوي مقلوب حاصل ضرب المواسعة في التردّد الزاويّ لفرق الجهد.
- **موادّ عازلة Insulators:** موادّ لا توصِل التيار الكهربائي، حيث ترتبط إلكترونات التكافؤ لها بالذرات بقوة كبيرة، لذلك لديها عدد قليل من الإلكترونات الحرّة، وهذا يجعلها مادّة عازلة للكهرباء.
- **موادّ موصلة Conductors:** موادّ توصِل التيار الكهربائي، ولا ترتبط إلكترونات التكافؤ بذراتها بقوة كبيرة؛ وبذلك تحوي الموادّ الموصِلة كثيرًا من الإلكترونات الحرّة، وهذا يجعلها موصِلات جيدة للتيار الكهربائي.
- **موادّ شبه موصلة Semiconductors:** موادّ تقع بين الموادّ الموصِلة للكهرباء والموادّ العازلة من حيثُ قدرتُها على توصيل الكهرباء.
- **نشاطية إشعاعية Activity:** عدد الاضمحلالات في الثانية الواحدة لعينة مشعّة.
- **نطاق الاستقرار Stability Valley:** النطاق الذي توجد ضمنه النوى المستقرة في منحنى (N-Z).
- **نظائر Isotpes:** نوًى تتساوى في عددها الذري، وتختلف في عددها الكُتْلي بسبب اختلاف عدد النيوترونات، وهي ذرات للعنصر نفسه تختلف أنويتها في عددها الكُتْلي.
- **نواة مركّبة Compound Nucleus:** النواة التي تتشكل من امتصاص النواة الهدف للقذيفة في التفاعلات النووية، التي وما تلبث أن تضمحل لتعطي نواة أو أكثر.
- **نيوكليون Nucleon:** تسمية تُطلق على كلٍّ من البروتون أو النيوترون.
- **وَحْدة كتلة ذرية Atomic Mass Unit:** تساوي $\frac{1}{12}$ من كتلة نظير الكربون - 12 ($^{12}_{6}C$).

قيد الإعداد والمراجعة