



# الفيزياء

الصف الثاني عشر - المسار الأكاديمي

الفصل الدراسي الثاني

كتاب الطالب

12

فريق التأليف

د. موسى عطا الله الطراونة (رئيساً)

خلدون سليمان المصارو

موسى محمود جرادات

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب

د. إبراهيم ناجي غبار

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

يسير 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

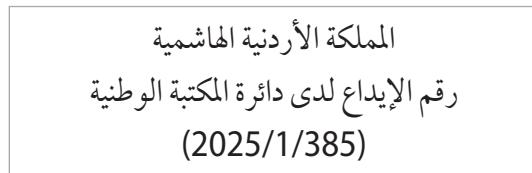
قررَت وزارة التربية والتعليم تدريس هذا الكتاب في مدارس المملكة الأردنية الهاشمية جميعها، بناءً على قرار المجلس الأعلى للمركز الوطني لتطوير المناهج في جلسته رقم (2025/7)، تاريخ 15/9/2025 م، وقرار مجلس التربية والتعليم رقم (2025/165)، تاريخ 15/10/2025 م، بدءاً من العام الدراسي 2025 / 2026 م.

© 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**



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/
الطبعة	الطبعة الأولى

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

#### المراجعة والتعديل

ميمي محمد التكروري

موسى محمود جرادات

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب

#### المراجعة التربوية

أ.د. راجي عوض الصرابية

#### التصميم والإخراج

نايف محمد أمين مرادشة

#### 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.

2025 هـ / 1447 م

الطبعة الأولى (التجريبية)

## قائمة المحتويات

### الصفحة

### الموضوع

5 ..... المقدمة

7 ..... **الوحدة الخامسة: المغناطيسية**

9 ..... تجربة استهلالية: استقصاء تأثير المجال المغناطيسي في شحنة كهربائية متحركة فيه

10 ..... الدرس الأول: القوة المغناطيسية

28 ..... الدرس الثاني: المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي

41 ..... الدرس الثالث: الحث الكهرمغناطيسي

63 ..... **الوحدة السادسة: التيار المتردد والدارات الإلكترونية**

65 ..... تجربة استهلالية: اختبار الثنائي البلوري وقياس مقاومته

66 ..... الدرس الأول: دارات التيار الكهربائي المتردد

82 ..... الدرس الثاني: الدارات الإلكترونية

99 ..... **الوحدة السابعة: الفيزياء الحديثة**

101 ..... تجربة استهلالية: العلاقة بين درجة حرارة الجسم والإشعاع الصادر عنه

102 ..... الدرس الأول: الطبيعة الجسيمية للضوء

119 ..... الدرس الثاني: التركيب الذري

139	تجربة استهلاكية: نمذجة التفاعل المتسلسل
140	الدرس الأول: تركيب النواة وخصائصها
152	الدرس الثاني: الإشعاع النووي
167	الدرس الثالث: التفاعلات النووية
181	مسرد المصطلحات

## المقدمة

الحمد لله رب العالمين، والصلوة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين. انطلاقاً 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 معيناً للطلبة على الارتقاء بمستواهم المعرفي، ومجاراة أقرانهم في الدول المتقدمة.

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

وقد روّي في تأليفه تقديم المعلومة العلمية الدقيقة وفق منهجية تقوم على السلامة في العرض، والوضوح في التعبير، إضافة إلى الربط بين الموضوعات المطروحة في المراحل الدراسية السابقة واللاحقة، واعتماد منهجية التدرج في عرض موضوعات المادة، واستهلال وحداتها بأسئلة تُظهر علاقة علم الفيزياء بالظواهر حولنا؛ ما يحفّز الطالب إلى الإفادة مما يتعلّمه في غرفة الصف في تفسير مشاهدات يومية وظواهر طبيعية قد تحدث أمامه، أو يشاهدها في التلفاز، أو يسمع عنها. وقد تضمنَت كل وحدة إثراً 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 والedarات الإلكترونية، والفيزياء الحديثة، والفيزياء النووية. وقد أُلّحق به كتاب للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي التجارب والأنشطة جميعها الواردة في كتاب الطالب؛ ليساعده على تفريغها بسهولة، بإشراف المعلم، ومشاركة زملائه فيها، بما في ذلك رصد القراءات، وتحليلها، ثم مناقشتها، وصولاً إلى استنتاجات مبنية على أسس علمية سليمة. ويتضمن أيضاً أسئلة تفكير؛ بهدف تعزيز فهم الطالب موضوعات المادة، وتنمية التفكير الناقد لديه.

ونحن إذ نقدم هذه الطبعة من الكتاب، فإننا نأمل أن يُسهم في تحقيق الأهداف والغايات النهائية المنشودة لبناء شخصية المتعلم، وتنمية اتجاهات حبّ التعلم ومهارات التعلم المستمر، إضافة إلى تحسين الكتاب بإضافة الجديد إلى محتواه، وإثراء أنشطته المتنوعة، والأخذ بـ ملاحظات المعلمين.

والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

# الوحدة

## المغناطيسية

Magnetism

5



### أتأمل الصورة

أنشئ مركز السينكروترون (SESAME) في الأردن لُيُستخدم في البحث العلمي والتدريب، وبدأ تشغيله سنة 2017م بطاقة قُصوى تساوي  $2.5 \text{ GeV}$ . تُستخدم المجالات الكهربائية والمغناطيسية في مسارع السينكروترون في تسريع الجسيمات المُشحونة، مثل الإلكترونات والبروتونات، والتحكم في مسارها داخل مسار حلقي مغلق، فينتج من هذه الجسيمات المُسرعة أباعاث ضوء شديد السطوع وأشعة كهرمغناطيسية غير مرئية، هي؛ أشعة تحت حمراء وأشعة فوق بنفسجية وأشعة سينية؛ تُستخدم جميعها في دراسة التركيب الذري للمادة على مستوى قياسات ( $\text{nm}$ )، ما يُفيد في تطبيقاتٍ واسعةٍ في مجالات الطب والصناعة والزراعة والبيئة.

كيف يجري تسريع الجسيمات المُشحونة وإكسابها طاقة حركية كبيرة؟ وكيف يجري التحكم في مسارها؟

## الفكرة العامة:

للمجال المغناطيسي تطبيقاتٌ حيّاتيّةٌ وعلميّةٌ مهمّةٌ. ينشأ المجال المغناطيسيّ مهما كانت مصادره نتيجةً لحركة الشحنات الكهربائيّة؛ على شكل تيار كهربائيّ أو حركة إلكترون حول النواة.

### الدرس الأول: القوة المغناطيسية

#### Magnetic Force

**الفكرة الرئيسيّة:** يولّد المغناطيسُ حوله مجالاً مغناطيسياً يؤثّر بقوّةٍ في المواد المغناطيسية وفي الشحنات الكهربائيّة المتحرّكة فيه. للقوة المغناطيسية تطبيقات علميّة وحياتيّة مختلّفة، منها السينكروترون، ومطياف الكتلة، والمحرك الكهربائي.

### الدرس الثاني: المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائيّ

#### Magnetic Field of an Electric Current

**الفكرة الرئيسيّة:** يمكن توليد مجال مغناطيسياً بتمرير تيار كهربائي في موصل، ويُحسب المجال المغناطيسياً الذي يولّد موصل يحمل تياراً كهربائياً باستخدام علاقات رياضيّة تعتمد على عوامل، منها شكل الموصل الذي يحمل التيار.

### الدرس الثالث: الحث الكهرومغناطيسي

#### Electromagnetic Induction

**الفكرة الرئيسيّة:** يرتبط تولّد قوّة دافعة كهربائيّة حثّية وتيار كهربائي حثّي في دارة مغلقة بتغيير التدفق المغناطيسياً الذي يخترقها، تُحسب القوّة الدافعة الحثّية بقانون فارادي، ويُحدّد اتجاه التيار الكهربائي بقانون لتر.

# تجربة استهلاك الله

## استقصاءُ تأثيرِ المجالِ المغناطيسيِّ في شحنةِ كهربائيةِ مُتحرّكةٍ فيهِ



**المواد والأدوات:** أنبوبٌ أشعّةٌ مهبطيةٌ، مصدرٌ طاقةٌ عاليٌ الجهد (DC)، أسلاكٌ توصيل، مغناطيسٌ قويٌّ، قاعدةٌ عازلة.

**إرشادات السلامة:** الحذرُ عند التعامل مع مصدر الطاقة عالي الجهد.

### خطوات العمل:

بالتعاون مع أفرادٍ مجموعتي؛ أنفذُ الخطوات الآتية:

- 1 أثبّتُ أنبوبَ الأشعّةِ المهبطةِ على القاعدةِ العازلةِ وأصلُّ قطبيهِ مع قطبي مصدر الطاقة.
- 2 **الاحظُّ**: اختارُ جهد (500 V) تقريرًا، وأشغّلُ مصدر الطاقة، ثم أرفعُ الجهد حتى يبدأ الوميض بالظهور في الأنبوب.
- 3 **الاحظُّ** شكلَ مسارِ الأشعّةِ المهبطةِ في الأنبوب وأدّونُ ملاحظاتي.
- 4 **أجربُّ**: أقربُ المغناطيس بالتدريج من مسارِ الأشعّةِ المهبطةِ في الأنبوب؛ مع الحذر من الاقتراب من قطبي الأنبوب، ثم ألاحظُ ما يحدثُ لمسارِ الأشعّةِ، وأدّونُ ملاحظاتي.
- 5 أعكسُ قطبي المغناطيس وأكررُ الخطوة (4)، وألاحظُ ما يحدثُ لمسارِ الأشعّةِ، وأدّونُ ملاحظاتي.

### التحليل والاستنتاج:

1. **أصفُّ** مسارِ الأشعّةِ المهبطةِ في المرحلة الأولى من التجربة، وأوضح سبب ظهوره.
2. **أفسّرُ** أهميّةَ أن يكونَ ضغطُ الهواء منخفضًا داخلَ أنبوبِ الأشعّةِ المهبطةِ.
3. **أستنتاجُ**: أيّن ما حدثَ لمسارِ الأشعّةِ المهبطةِ عند تقريرِ المغناطيس منها، وأفسّرُ سببَ ذلك، ثم أقارنُ النتيجة بما يحدثُ عند تغييرِ قطبِ المغناطيس.

المجال المغناطيسي Magnetic Field

تعرفَ الإنسان المغناطيسية في الطبيعة، فمعدن المغنتيت مادة ممعنطة طبيعية، لديها القدرة على جذب قطع من مواد قابلة للتمغنت مثل الحديد. بالإضافة إلى جذب الحديد، فإن المغناطيس يجذب كذلك النيكل والكوبالت والنيوديميوم، وتسمى المواد المغناطيسية، وهي مواد قابلة للتمغنت وتُصنَع منها المغناط الدائمة بأشكال مختلفة.

لكل مغناطيس قطبان: قطب شمالي وقطب جنوب، وتوجد أقطاب المغناطيس دائمًا على هيئة أزواج: شمالي وجنوب، ولا يوجد قطب مغناطيسي مفرد، على خلاف الشحنات الكهربائية، حيث يمكن أن توجد شحنة مفردة موجبة أو سالبة.

يولّد المغناطيس مجالًا مغناطيسياً في الحيز المحيط به، ويمثل المجال المغناطيسي بخطوط وهمية تعبّر عن مقداره واتجاهه كما سبق تمثيل المجال الكهربائي، وتُستخدم بُرادة الحديد في رسم خطوط المجال المغناطيسي كما يبيّن الشكل (1)، ويمكن تحديد اتجاه المجال عند نقطة معينة بوضع بوصلة عند تلك النقطة، فتشير إبرتها إلى اتجاه المجال.

الشكل (1): تُستخدم بُرادة الحديد في رسم خطوط المجال، ويُحدّد اتجاه المجال عند نقطة باستخدام البوصلة.



الفكرة الرئيسية:

يولّد المغناطيسُ حوله مجالًا مغناطيسياً يؤثّر بقوّة في المواد المغناطيسية وفي الشحنات الكهربائية المتحركة فيه. للقوة المغناطيسية تطبيقات علمية وحياتية مختلفة، منها السينكروترون، ومطياف الكتلة، والمحرك الكهربائي.

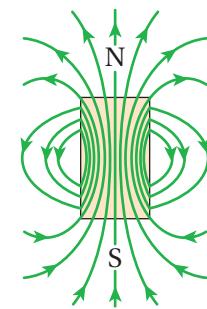
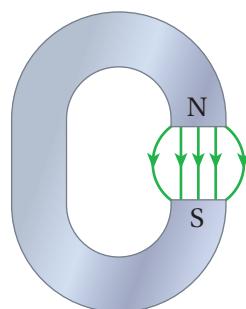
نماذج التعلم:

- 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.
- أستنتج من التجربة أن المجال المغناطيسي يؤثر بقوة مغناطيسية في موصل داخل المجال ويحمل تيارًا كهربائياً.
- أحسب القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في الموصل الذي يحمل تياراً كهربائياً، وأحدد اتجاهها.
- أصف العزم المؤثر في حلقة موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم وأحدد اتجاه الدوران.
- أصف مبدأ عمل المحرك الكهربائي.

اللّفاظين والصّطّارات:

Magnetic Field	مجال مغناطيسي
tesla	تسلا
Mass Spectrometer	مطياف الكتلة
Synchrotron	سينكروترون

الشكل (2): خطوط المجال المغناطيسي.



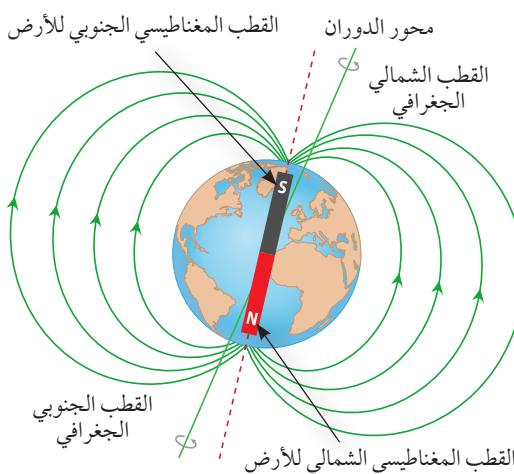
(أ): خطوط المجال المغناطيسي لمغناطيس مستقيم.  
(ب): خطوط المجال بين قطبي مغناطيس على شكل حرف (C).

**أفخر:** مستعيناً بالشكل (2)، أقدم دليلاً 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.

تشابه 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 مقلفة تخرج من القطب الشمالي وتدخل القطب الجنوبي، وتُكمل مسارها داخل المغناطيس من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي، ويبين الشكل (2/أ) خطوط المجال المغناطيسي لمغناطيس مستقيم، ويبين الشكل (2/ب) خطوط المجال المغناطيسي في الحيز بين قطبي مغناطيس على شكل حرف C.

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

### الربط بعلوم الأرض



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

## القوّة المؤثرة في شحنة متحرّكة في مجال مغناطيسي

### Force on Moving Charge in a Magnetic Field

لاحظت في التجربة الاستهلالية كيف أدى المجال المغناطيسي إلى انحناء الأشعة المهبطية (حزمة الإلكترونات) عن مسارها، وهذا يدل على أن المجال قد أثر بقوة في هذه الشحنات المتحرّكة. وقد بيّنت التجارب العلمية الخصائص الآتية للقوّة المغناطيسية التي تؤثّر في جسم مشحون يتحرّك في مجال مغناطيسي:

- لا يؤثّر المجال المغناطيسي في الجسم المشحون إذا كان ساكناً أو متّحراً بسرعة موازية لاتّجاه المجال المغناطيسي.
  - يتناسب مقدار القوّة المغناطيسية طردياً مع كل من؛ شحنة الجسم ( $q$ )، ومقدار سرعته ( $v$ ) ومقدار المجال المغناطيسي ( $B$ )، وجيب الزاوية بين متّجهي السرعة والمجال.
  - يعتمد اتّجاه القوّة المغناطيسية على اتّجاه سرعة الجسم واتّجاه المجال المغناطيسي، وعلى نوع شحنة الجسم. وتكون القوّة المغناطيسية عمودية على اتّجاه كل من المجال المغناطيسي والسرعة.
- يمكن تمثيل النتائج التجريبية السابقة باستخدام الضرب المتجهي حسب العلاقة الرياضية الآتية:

$$F_B = qv \times B$$

حيث يشير الرمز ( $F_B$ ) إلى متجه القوّة المغناطيسية الذي يكون دائماً عمودياً على كل من؛ متجه المجال المغناطيسي ( $B$ ) ومتّجاه السرعة ( $v$ ). ويعطى مقدار القوّة المغناطيسية المؤثّرة في الشحنة المتحرّكة بالعلاقة الآتية:

$$F_B = qvB \sin \theta$$

حيث  $\theta$  الزاوية المحصورة بين متّجهي السرعة والمجال المغناطيسي.

باستخدام العلاقة السابقة يمكن تعريف المجال المغناطيسي Magnetic Field عند نقطة بأّنه: القوّة المغناطيسية المؤثّرة في وحدة الشحنات الموجبة، عندما تتحرّك الشحنة بسرعة ( $1 \text{ m/s}$ ) باتّجاه عمودي على اتّجاه المجال المغناطيسي لحظة مرورها في تلك النقطة، ويقاس المجال المغناطيسي بوحدة ( $\text{N.s/C.m}$ )، وفقاً للنظام الدولي للوحدات وتُعرّف بالتسلا tesla ورمزها (T).

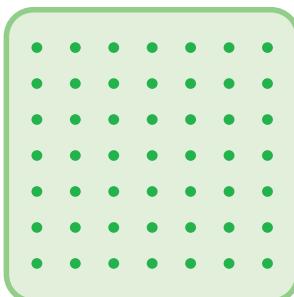
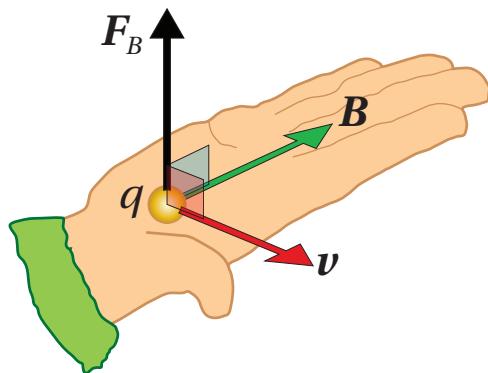
✓ أتحقق:

أ. ما الزاوية بين متّجهي المجال والسرعة للحصول على قيمة عظمى للقوّة المغناطيسية المؤثّرة في جسم مشحون يتحرّك في مجال مغناطيسي؟

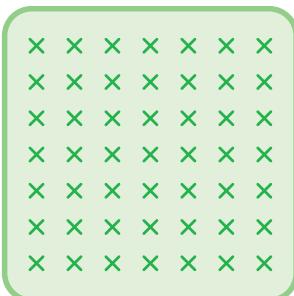
ب. هل يمكن لمجال مغناطيسي أن يجعل إلكتروناً يبدأ حركته من السكون؟

ج. هل ينحرف النيوترون عندما يتحرّك داخل مجال مغناطيسي باتّجاه عمودي عليه؟

الشكل (3): تحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة، باستخدام قاعدة اليد اليمنى.



(أ)

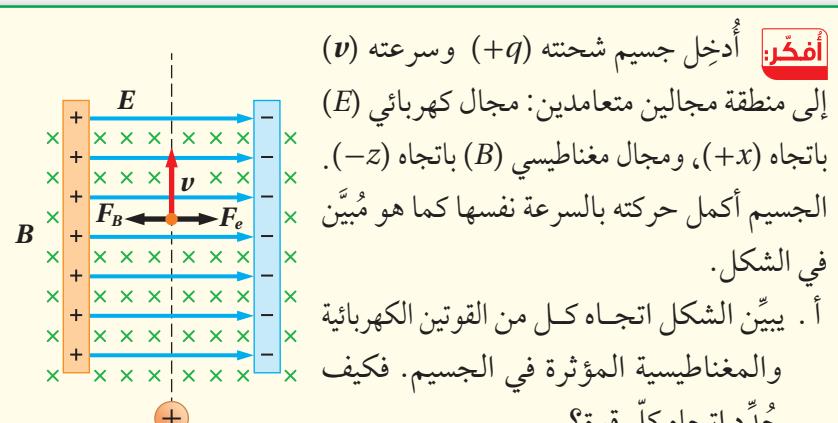


(ب)

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

تُستخدم قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة موجبة عندما تتحرك داخل مجال مغناطيسي، حيث تُبسط اليد اليمنى؛ بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه السرعة كما في الشكل (3)، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسي، عندها يحدد اتجاه القوة بسهم يخرج من باطن الكف ويكون عمودياً عليه. في حين ينعكس اتجاه القوة عندما تكون الشحنة سالبة.

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



**أفخر:** أدخل جسيم شحنته ( $q^+$ ) وسرعته ( $v$ )

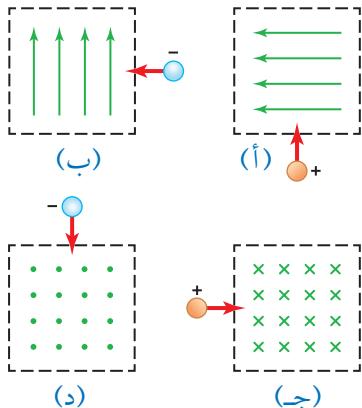
إلى منطقة مجالين متوازدين: مجال كهربائي ( $E$ ) باتجاه ( $x^+$ )، ومجال مغناطيسي ( $B$ ) باتجاه ( $z^-$ ). الجسيم أكمل حركته بالسرعة نفسها كما هو مبيّن في الشكل.

أ. يبيّن الشكل اتجاه كل من القوتين الكهربائية والمغناطيسية المؤثرة في الجسيم. فكيف حُدد اتجاه كل قوة؟

ب. ماذا أستنتج عن العلاقة بين مقدارى القوتين؟ أبّرر إجابتي.

ج. لو أدخل جسيم شحنته ( $q^-$ ) وسرعته ( $v$ ) إلى منطقة المجالين، فهل سيكمل حركته بالاتجاه نفسه؟ أبّرر إجابتي.

## المثال 1



أُدخلت أربع شحنات إلى مجالات مغناطيسية متتظمة كما يبيّن الشكل (5).  
أُحدّد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في كلّ شحنة لحظة دخول كلّ منها منطقة المجال المغناطيسي.

المعطيات: اتجاه المجال، اتجاه السرعة، نوع الشحنة.

المطلوب: اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في كلّ شحنة.

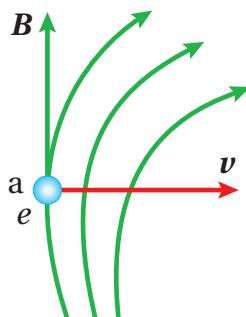
الحلّ:

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

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

الشكل (أ): القوة باتجاه (z+), الشكل (ب): القوة باتجاه (z+), الشكل (ج): القوة باتجاه (y+),  
الشكل (د): القوة باتجاه (x+).

## المثال 2



يتحرّك إلكترون بسرعة  $(5 \times 10^6 \text{ m/s})$  باتجاه محور (x+); أحسب مقدار القوة المغناطيسية التي تؤثّر فيه لحظة مروره بالنقطة (a) وأحدّد اتجاهها، علمًا بأنّ المجال المغناطيسيّ عندها  $(2 \times 10^{-4} \text{ T})$ . كما في الشكل (6).

المعطيات:

$$v = 5 \times 10^6 \text{ m/s}, B = 2 \times 10^{-4} \text{ T}, \theta = 90^\circ, e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

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

المطلوب:  $F_B = ?$

الحلّ:

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

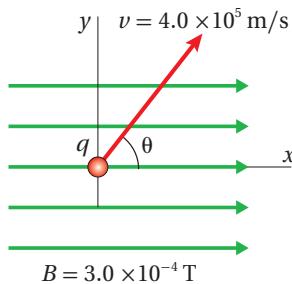
$$F_B = qvB \sin \theta$$

$$F_B = 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^6 \times 2 \times 10^{-4}$$

$$F_B = 1.6 \times 10^{-16} \text{ N}$$

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى؛ فإنّ اتجاه القوة التي تؤثّر في الإلكترون تكون داخلة في الصفحة، باتجاه (z-). تكون القوة بهذا المقدار والاتجاه عند النقطة (a) فقط؛ لأنّ المجال متغير في مقداره واتجاهه عند النقاط الأخرى. الاحظ أنّ إشارة الشحنة تستخدم لتحديد اتجاه القوة، وليس في حساب مقدار القوة.

### المثال 3



يتَّحِرِّكُ جُسْمٌ شَحْنَتُه  $(5.0 \times 10^{-6} \text{ C})$  فِي الْمَسْتَوِي  $(x, y)$  دَاخِلِ مَجَالٍ مَغَناطِيسِيٍّ مُنْتَظَمٍ، بِسُرْعَةٍ  $(v)$  بِاتِّجَاهٍ يَصْنُعُ زَوْاِيَّةً  $(\theta = 53^\circ)$  مَعَ مَحَور  $(+x)$ ، كَمَا فِي الشَّكْل  $(7)$ . بِالْاعْتِمَادِ عَلَى بِيَانَاتِ الشَّكْلِ، أَحْسِبْ مَقْدَارَ الْقُوَّةِ الْمَغَناطِيسِيَّةِ الَّتِي تَؤَثِّرُ فِي الْجُسْمِ، وَأُحْدِدْ اِتِّجَاهَهَا.

المُعْطَياتِ:

$$v = 4.0 \times 10^5 \text{ m/s}, B = 3.0 \times 10^{-4} \text{ T}, \theta = 53^\circ,$$

$$q = 5.0 \times 10^{-6} \text{ C}$$

المطلوب:

الحلّ:

$$F_B = qvB \sin \theta$$

$$F_B = 5.0 \times 10^{-6} \times 4.0 \times 10^5 \times 3.0 \times 10^{-4} \times \sin 53^\circ$$

$$F_B = 4.8 \times 10^{-4} \text{ N}$$

بِتَطْبِيقِ قَاعِدَةِ الْيَدِ الْيُمْنِيٍّ؛ بِوْضَعِ الإِبْهَامِ بِاتِّجَاهِ السُّرْعَةِ  $(v)$ ، وَبِاقِيِّ الْأَصْبَاعِ بِاتِّجَاهِ الْمَجَالِ  $(+x)$ . فَإِنَّ اِتِّجَاهَ الْقُوَّةِ الْمَغَناطِيسِيَّةِ يَكُونُ عَمُودِيًّا عَلَى الصَّفَّةِ نَحْوَ الدَّاخِلِ، بِاتِّجَاهِ  $(-z)$ .

### لَمْرَدَه

**أَسْتَنْج:** يَبِينُ الْجَدُولُ الْأَتَيِّ مَعْطَياتَ عَنْ شَحْنَاتِ كَهْرَبَائِيَّةِ تَأْثَرُتْ بِقُوَّى مَغَناطِيسِيَّةٍ لِحَظَّةٍ دَخُولَهَا مَجَالَاتِ مَغَناطِيسِيَّةٍ مُنْتَظَمَة. بِاسْتِخْدَامِ قَاعِدَةِ الْيَدِ الْيُمْنِيِّ، أَكْمِلِ الْفَرَاغَاتِ فِي الْجَدُولِ بِمَا هُوَ مَنْاسِبٌ.

اتِّجَاهُ الْقُوَّةِ الْمَغَناطِيسِيَّةِ	اتِّجَاهُ الْمَجَالِ الْمَغَناطِيسِيِّ	اتِّجَاهُ سُرْعَةِ الشَّحْنَةِ	نُوْعُ الشَّحْنَةِ
.....	$-y$	$+z$	مَوْجَبَةٌ
$-x$	$-z$	.....	مَوْجَبَةٌ
$+y$	.....	$-x$	سَالِبَةٌ
$+x$	$+z$	$-y$	.....

## حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم

## Motion of a Charged Particle in a Uniform Magnetic Field

تنحرف الجسيمات المشحونة عن مسارها عند تأثيرها بقوّي مغناطيسية. ولو صفت حركة جسيم مشحون داخل مجال مغناطيسي، سندرس الحالة التي يدخل فيها الجسيم بسرعة ابتدائية عمودية على مجال مغناطيسي منتظم. يبيّن الشكل (8) جسيم كتلته ( $m$ ) وشحنته ( $q$ )، يتحرك بسرعة ابتدائية ( $v$ ) باتجاه ( $+x$ ) لحظة دخوله مجالاً مغناطيسياً منتظمًا يتجه داخلاً في الصفحة ( $-z$ ). يتأثر الجسيم بقوة مغناطيسية باتجاه ( $+y$ )، فعمل القوة على تغيير مسار الجسيم، فيتغير اتجاه سرعته، ويتغير تبعاً لذلك اتجاه القوة المغناطيسية، بحيث تبقى القوة عمودية على اتجاهي السرعة والمجال، ونتيجة لذلك، يتحرك الجسيم بسرعة ثابتة مقداراً في مسار دائري يقع في مستوى متعامد مع المجال المغناطيسي.

يُعبر عن مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسم بالعلاقة الآتية:

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

يكون اتجاه القوة المغناطيسية نحو مركز المسار الدائري؛ لذا فإنَّ القوة المغناطيسية في هذه الحالة تُعدّ قوة مركزية؛ تُكسب الجسم تسارُعاً مركزيًّا مقداره  $(a_c = \frac{v^2}{r})$ . وباستخدام القانون الثاني لنيوتون، يمكن التوصل إلى علاقة لحساب نصف قُطْر المسار الدائري للجسم باتياع الخطوات الآتية:

- باستخدام القانون الثاني لنيوتون ( $F = ma$ ), فإنَّ القوة المركزية المؤثرة في

الجسم يمكنه التعب عنها بالعلاقة الآتية:

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

- بمساواة القوة المركبة بالقوة المعنافية:

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

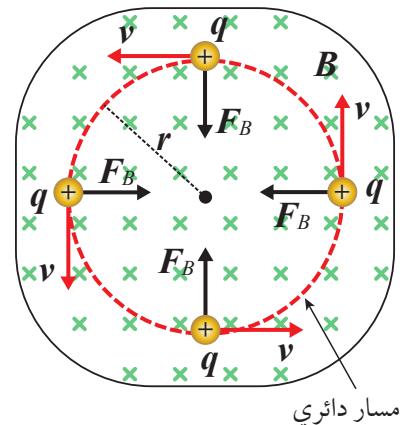
- ٠ باختصار (٧) وإعادة ترتيب الرموز في العلاقة، نتوصل إلى أنه يعبر عن نصف قُطْر المسار الدائري للجسيم المشحون بالعلاقة الآتية:

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

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

للجسيم المشحون:

- نقصان سرعة الجسم إلى النصف.
  - مضاعفة المجال.
  - مضاعفة كل من سرعة الجسم وال المجال.

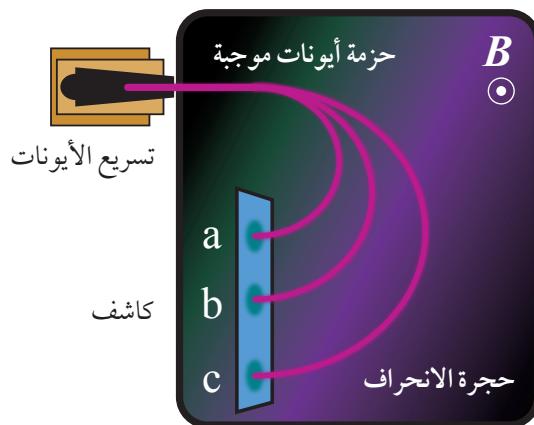


الشكل (8): حركة جسيم شحنته موجبة في مجال مغناطيسي منتظم.

لماذا لا تبذل القوة  
المغناطيسية شغلاً على جسمٍ  
مشحونٍ يتحرك داخل مجالٍ  
مغناطيسيٍّ مُتظمٍ؟

الشكل (9): تحليل عينة مجهولة  
باستخدام جهاز مطياف الكتلة.

كيف سيكون مسار أيون سالب عند  
دخوله هذا المجال بسرعة باتجاه  
اليمين؟



### تطبيقات تكنولوجية:

تُستخدم القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيمات المشحونة في تطبيقات عملية  
عده، منها مطياف الكتلة ومسارع السينكروترون.

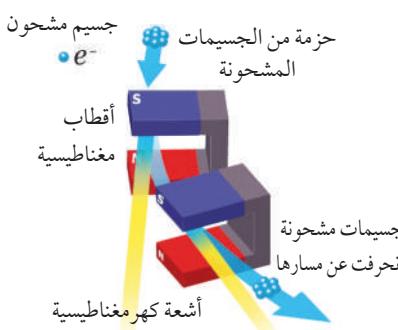
**1. مطياف الكتلة Mass Spectrometer:** جهاز يستخدم لفصل الأيونات بحسب  
نسبة كتلة تلك الأيونات إلى شحتها، حيث تُعد النسبة  $\frac{m}{q}$  صفة فيزيائية للمادة،  
يستخدمها العلماء في التعرف على أنواع الجسيمات المكونة لعينة من مادة معينة.  
تدخل الأيونات بالسرعة نفسها مجالاً مغناطيسياً منتظمًا عمودياً على اتجاه  
السرعة، فيتحرك كل أيون في مسار دائري نتيجة للقوة المغناطيسية المؤثرة فيه،  
ويبيّن الشكل (9) المسارات التي تسلكها أيونات موجبة عند دخولها مجالاً  
مغناطيسياً منتظمًا باتجاه  $(+z)$ .

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

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

**2. مسار السينكروترون Synchrotron:** يستخدم لإنتاج أشعة (موجات)  
كهرومغناطيسية، وتعتمد فكرة عمله على أن الجسيمات المشحونة ذات  
السرعات العالية تبعث إشعاعات كهرومغناطيسية عندما تنحرف عن  
مسارها بتأثير مجال مغناطيسي. يستخدم في السينكروترون مجال كهربائي  
لتسريع الجسيمات المشحونة مثل الإلكترونات والبروتونات، وإكسابها  
سرعات عالية جدًا تقترب من سرعة الضوء، ثم تدخل الجسيمات المسرعة  
إلى مسار حلقي محاط بأقطاب مغناطيسية.

الأقطاب المغناطيسية تحرف الجسيمات المشحونة عن مسارها كما يبيّن الشكل (10)؛ ما  
يؤدي إلى انبعاث إشعاعات كهرومغناطيسية. وعن طريق التحكم في المجالات



الشكل (10): إنتاج أشعة كهرومغناطيسية  
في مسار السينكروترون.



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

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

✓ **أتحقق:** ما استخدامات كُلٌّ من جهازي مطياف الكتلة والسينكروترون؟ وما وظيفة المجال المغناطيسي في كُلٌّ منهما؟

## المثال 4

استُخدم مطياف الكتلة لفصل ذرات نظيري اليورانيوم (235) واليورانيوم (238)؛ تم تأين الذرات فأصبحت شحنة كُلٌّ أيون منها ( $C^{1.602 \times 10^{-19}}$  C)، ثم قُذفت جميعها داخل مجال مغناطيسيٍّ منتظم (1.200 T) بسرعة ( $400.0 \times 10^2$  m/s)، عموديًّا عليه. إذا كان نصف قطر مسار أحدهما (8.177 cm)، ونصف قطر مسار الثاني (8.281 cm)، أحسب كتلة كُلٌّ أيون.

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

المطلوب:  $m_1 = ?$ ,  $m_2 = ?$

الحل:

تُحسب كتلة كُلٌّ 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 مساراً نصف قطره أكبر يمتلك الكتلة الأكبر، وهو أيون ذرة اليورانيوم (238)، في حين يسلك أيون ذرة اليورانيوم (235) المسار الآخر الذي نصف قطره أصغر.

مجال مغناطيسي منتظم مقداره (4.00 mT) عمودي على الصفحة إلى الخارج. قُدِّم جسيم مشحون داخل المجال عموديًّا عليه، فتأثر بقوة مغناطيسية مقدارها ( $3.20 \times 10^{-15} \text{ N}$ ). فسلَّك مساراً دائريًّا كما يبيِّن الشكل (12/أ). الجسيم إما

أنه إلكترون أو بروتون، أجب عن أيٍ منهما مستعيناً بالشكل:

أ. هل الجسيم إلكترون أم بروتون؟ أفسر إجابتي.

ب. أحسب سرعة الجسيم.

ج. أحسب نصف قطر المسار الدائري.

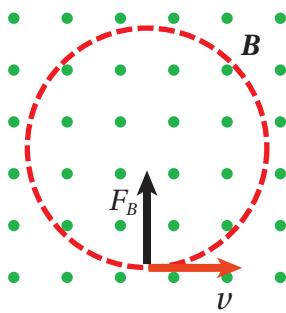
المعطيات:  $B = 4.00 \text{ mT}$ ,  $+z$ ,  $F_B = 3.20 \times 10^{-15} \text{ N}$ ,  $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

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

المطلوب: نوع الشحنة،  $v = ?$ ,  $r = ?$

الحل:

أ. باستخدام اتجاه الدوران المُبيَّن في الشكل (12/أ)، نختار أيّ نقطة على المسار الدائري، ونرسم مماً عند تلك النقطة يدلّ على اتجاه السرعة، ثم نرسم عند النقطة نفسها سهماً 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 لتعريف 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 وخارجاً منه، وعليه، فإنَّ الجسيم شحنته سالبة (إلكترون).

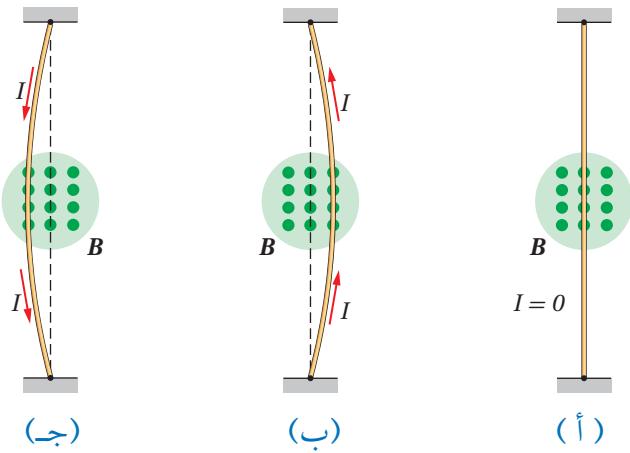
ب. أحسب سرعة الجسيم بالعلاقة الآتية:

$$F_B = qvB \sin 90^\circ$$

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

ج. لأنَّ الجسيم إلكترون، فإنَّ كتلته ( $m = 9.10 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ), ثم يُحسب نصف القطر بالعلاقة الآتية:

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



الشكل (13): القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تياراً كهربائياً موضوع في مجال مغناطيسي منتظم.

### القوة المؤثرة في موصل يحمل تياراً في مجال مغناطيسي

#### Force on a Current-Carrying Conductor in a Magnetic Field

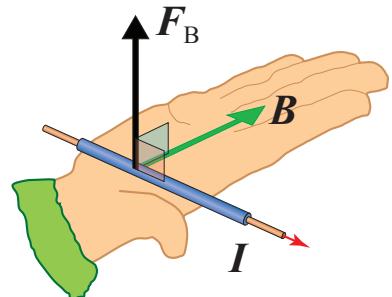
تعلّمتُ أنَّ المجال المغناطيسي يؤثّر في الشحنات المتحرّكة بقوّة مغناطيسية، ويؤثّر المجال المغناطيسي أيضًا في الموصل الفلزي الذي يسري فيه تيار عند وضعه داخل مجال مغناطيسي. فالتيار الكهربائي يتكوّن من شحناتٍ متحرّكة، وكل شحنة ستتأثّر بقوّة مغناطيسية. والقوّة المغناطيسية المؤثّرة في الموصل تساوي محصلة القوى المغناطيسية المؤثّرة في الشحنات التي تنقل التيار الكهربائي.

يمكن ملاحظة أثر القوة المغناطيسية المؤثّرة في موصل موضوع داخل مجال مغناطيسي منتظم كما يبيّن الشكل (13). في الشكل (13/أ)، لا يسري في الموصل تيار كهربائي، فيظل مستقيمًا بشكل رأسي، وعندما يسري فيه تيار كهربائي باتجاه (+)، ينحرف الموصل بالاتجاه المُبيّن في الشكل (13/ب) بسبب تأثيره بقوّة مغناطيسية، وعند عكُس اتجاه التيار، ينحرف بالاتجاه المعاكس كما في الشكل (13/ج)؛ ما يعني انعكاس اتجاه القوة المغناطيسية المؤثّرة فيه.

لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثّرة في الموصل؛ تُستخدم قاعدة اليد اليمني، حيث يشير الإبهام إلى اتجاه سريان التيار الكهربائي في الموصل، وتشير أصابع اليد الأربع إلى اتجاه المجال المغناطيسي، عندها يُحدّد اتجاه القوة المؤثّرة في الموصل بسهولة يخرج من باطن الكف عموديًّا عليه، كما في الشكل (14). بتطبيق القاعدة على السلك المُبيّن في الشكل (13/ب)، فإنَّ القوة المغناطيسية تكون باتجاه (+)، وينعكس اتجاه القوة ليصبح باتجاه (-) عند عكُس اتجاه التيار كما يبيّن الشكل (13/ج).

✓ **أتحقق:** عند وضع موصل يحمل تياراً كهربائياً في مجال مغناطيسي، يتأثر الموصل بقوّة. فكيف أفسّر ذلك؟

للتحقّق عمليًّا من تأثير المجال المغناطيسي في موصل يسري فيه تيار كهربائي وتحديد اتجاه القوة المغناطيسية عمليًّا؛ أُنفّذ التجربة الآتية:



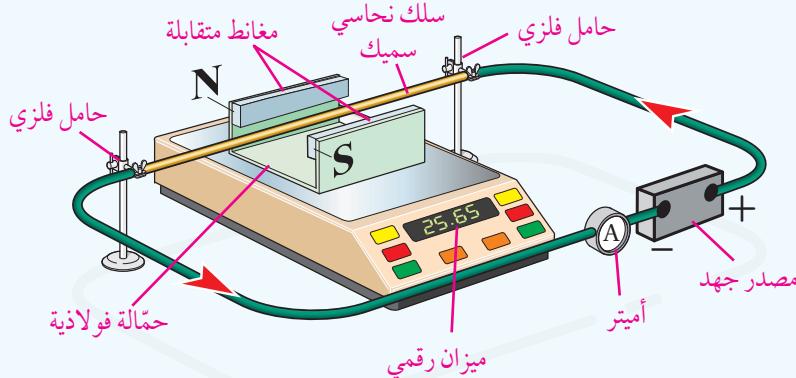
الشكل (14): تحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثّرة في موصل يسري فيه تيار كهربائي باستخدام قاعدة اليد اليمني.

# التجربة ١

## استقصاء القوة المغناطيسية المؤثرة في موصِل يحمل تياراً كهربائياً

**المواد والأدوات:** مغناطيسان، حمالة فولاذية للمغناط، سلكٌ نحاسيٌ سميكٌ قطره (3 mm) وطوله (35 cm) تقريباً، حاملان فلزيان، أميتر، مصدر منخفض الجهد، أسلاك توصيل، ميزان رقميٌّ.

**إرشادات السلامة:** الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائيٍّ.



### خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفَّذُ الخطوات الآتية:

- أثبَّتَ المغناطيسين على الحمالة الفولاذية كما يبيّن الشكل.
- أضيَّطَ الميزان الرقميٌّ بوضعٍ أفقِيٍّ؛ ثم أضعَّ الحمالة الفولاذية فوقَ المغناط، وأضبطَ قراءته على الصفر.
- أثبَّتَ السلك النحاسيَّ السميكَ على الحاملين الفلزيين جيداً، لمنع أيِّ حرَّكةٍ له، وأجعله يمتدُّ فوقَ الميزان داخل المجال المغناطيسيِّ باتِّجاهِ عموديٍّ عليه دون أن يلامس الميزان.

**الاحظُّ:** أصلُ الدارة الكهربائية كما في الشكل؛ ثم أرفعُ جهد المصدر وأراقبُ السلك النحاسيٍّ.

**5. أقيِّسُ** التيار الكهربائيٌّ عند قيمةٍ مُحدَّدة؛ عندما يظهر تغييرٌ على قراءة الميزان الرقميٌّ.

**6. الاحظُّ:** أُكَرِّرُ الخطوة (5) برفع قيمة جهد المصدر ثلاث مراتٍ أخرى، وألاحظُ قراءة الأميتر والميزان في كُلٍّ مرة. ثم أدوّنُ القراءات في جدولٍ مناسبٍ.

### التحليل والاستنتاج:

**1. أستنتِجُ** اتجاه القوة المغناطيسية التي أثَّرَ بها المجال في السلك النحاسيٍّ، واتِّجاه قوَّة رد الفعل التي أثَّرَ بها السلك في المغناط والقاعدة الفولاذية، معتمداً على التغيير في قراءة الميزان.

**2. أقارِنُ** اتجاه القوة الذي استنجدتُه مع الاتِّجاه الذي يمكن التوصلُ إليه بتطبيق قاعدة اليد اليمينيٍّ.

**3. أمِّلِ البيانات** المدونة في الجدول؛ التيار على المحور (x) والقوة المغناطيسية على المحور (y).

**4. أستنتِجُ** العلاقةَ بين التيار والقوَّة، ثم أجدُ ميل المُنْحنَى، وأحدَدُ ما يمثِّله الميل مستعيناً بالعلاقة الآتية:

$$F_B = IBL$$

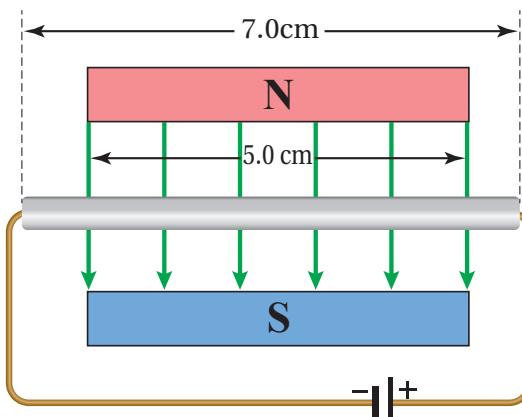
لاحظت في التجربة أنَّ القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصى تتناسب طردياً مع التيار المارّ فيه، وقد أثبتت التجارب العملية أنَّ القوة المغناطيسية تتناسب طردياً مع كُلّ من: مقدار المجال المغناطيسيي، وطول الموصى الموضع فيه، والتيار الكهربائي؛ إضافةً إلى جيب الزاوية بين مُتجه طول الموصى والمجال المغناطيسيي، (علمًا أنَّ متجه طول الموصى هو متجه مقداره يساوي طول الموصى واتجاهه باتجاه سريان التيار الكهربائي فيه). وتمثل هذه العوامل في العلاقة الرياضية الآتية:

$$F_B = IBL \sin \theta$$

يكون للقوة المغناطيسية قيمة عظمى عندما تكون الزاوية بين متجهى المجال والطول ( $\theta = 90^\circ$ )، وإذا نقصَت الزاوية عن ( $90^\circ$ ) أو زادت عنها؛ فإنَّ مقدار القوة المغناطيسية يقلُّ حتى يصبح صفرًا عندما تصبح الزاوية ( $\theta$ ) صفرًا أو ( $180^\circ$ ).

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

## المثال 6



يُبيَّنُ الشكل (15) سلك الألمنيوم يحمل تيارًا (5.2 A)؛ جزءٌ منه داخل مجال مغناطيسي (250 mT) عموديًّا عليه. معتمدًا على بيانات الشكل؛ أجد القوة المغناطيسية المؤثرة في السلك.

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

المطلوب:  $F_B = ?$

الشكل (15): سلك الألمنيوم يسري فيه تيار كهربائي موجود داخل مجال مغناطيسيٍّ منتظم.

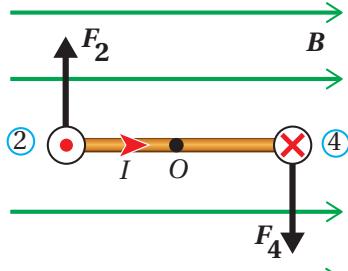
الحل:

يُحسب مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الجزء من السلك الموضع داخل المجال المغناطيسيي، باستخدام العلاقة الآتية:

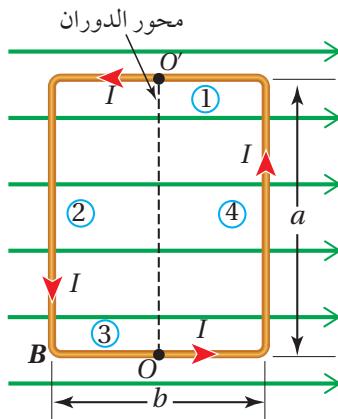
$$F_B = IBL \sin \theta$$

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

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

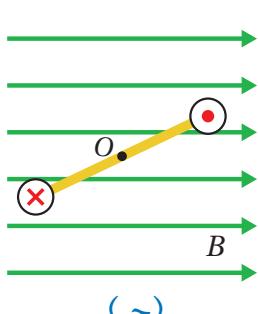
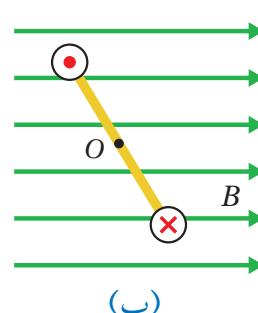
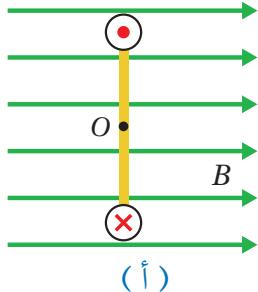


(ب): منظر جانبي للحلقة يُبيّن القوى المغناطيسية المؤثرة في الأضلعين (2,4).



(أ): منظر علويٌ للحلقة، يُبيّن أضلاعها الأربع وخطوط المجال.

الشكل (16): حلقةٌ مستطيلةٌ تحمل تياراً كهربائياً، قابلةٌ للدوران في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم.



الشكل (17): ثلاثة مشاهد جانبيةٍ لحلقةٍ يسري فيها تياراً كهربائياً، داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم.

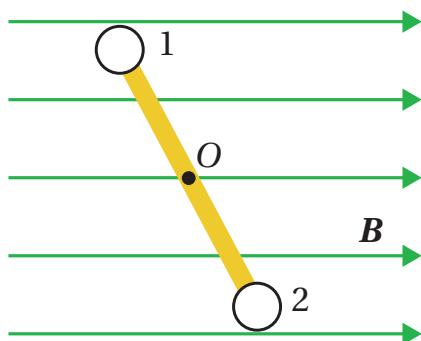
### العزم المؤثر في حلقةٍ تحمل تياراً في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم

#### Torque on a Current Loop in a Uniform Magnetic Field

يوضح الشكل (16/أ) منظراً علويًّاً لحلقةٍ موصولةٍ مستطيلةً طولها  $a$  وعرضها  $b$ ؛ تحمل تياراً كهربائياً ( $I$ )، موضوعةً أفقياً في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظم، خطوطه توازي مستوى الحلقة. باستخدام العلاقة ( $F_B = IBL \sin \theta$ ) يمكن التوصل إلى ما يأتي:

- لا يتأثر الأضلعان (1, 3) بُقوىٍ مغناطيسيةٍ؛ لأنَّ متجه طول الموصل يوازي خطوط المجال.
  - يتأثر الأضلعان (2, 4) بقوتين مغناطيسيتين ( $F_2, F_4$ ) مقدار كلٍّ منها ( $F = Iab$ )؛ لأنَّ متجه طول الموصل يتعامد مع خطوط المجال ( $\theta = 90^\circ$ ). والشكل (16/ب) يبيّن منظراً جانبيًّاً للحلقة يظهر فيه اتجاه هاتين القوتين.
  - القوّتان ( $F_2, F_4$ ) تؤثران باتجاهين متعاكسيين، وخطاً عملهما غير منطبقين، فتشكلان ازدواجاً يدورُ الحلقة مع اتجاه دوران عقارب الساعة حَوْل محور ثابت يقع في مستوى الحلقة.
- يُستخدم العزم المؤثر في حلقةٍ في تطبيقات عدّة، من أهمها المحرك الكهربائي.

**أتحقق:** يبيّن الشكل (17) مشاهد لقطعٍ جانبيٍّ تظهرُ في الحافة القريبة من الناظر لحلقةٍ تحمل تياراً كهربائياً، موضوعةٍ في مجالٍ مغناطيسيٍّ أفقىٍّ. أحدُ اتجاه الدوران حول محور عموديٍّ على مستوى الصفحة يمر بالنقطة ( $O$ ) في كلّ حالة (إن وجد).



حلقة مستطيلة الشكل يسري فيها تيار كهربائي موضوعة داخل مجال مغناطيسيًّا منتظم ويبيّن الشكل (18) مقطعاً جانبياً للحلقة يظهر فيه ضلعين من أضلاعها؛ (1) و (2). إذا علمت أنَّ الحلقة تدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة حول محور عمودي على مستوى الصفحة ويمر بالنقطة (O)، فأُحدِّد اتجاه التيار في كُلٍّ من الضلعين 1 و 2.

المعطيات: الشكل واتجاه دوران الحلقة.

الشكل (18): منظر جانبي لحلقة تحمل تياراً كهربائياً في مجال مغناطيسيًّا منتظم.

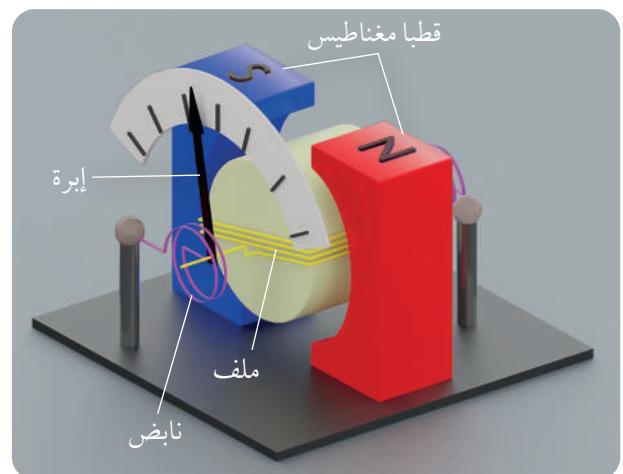
المطلوب: اتجاه التيار في كُلٍّ من الضلعين 1 و 2.

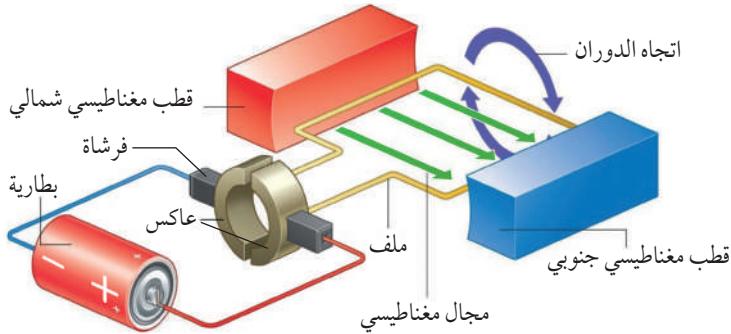
الحل:

بما أنَّ الحلقة تدور بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة؛ فإنَّ الضلع (1) في الحلقة يتَأثَّر بقوة مغناطيسية باتجاه (y-) بينما القوة المغناطيسية المؤثرة في الضلع (2) تكون باتجاه (y+). وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى يكون التيار في الضلع (1) باتجاه (z-) وفي الضلع (2) باتجاه (z+).

### الربط بالเทคโนโลยيا

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





## الشكل (19): الأجزاء الرئيسية للمحرك الكهربائي.

## الربط مع الفضاء

تحتاج الأقمار الصناعية لضبط توجيهها من حين إلى آخر؛ لذا تُزود بملفاتٍ يجري إصدالها بالتيار الكهربائي عند الحاجة؛ فيؤثر المجال المغناطيسي الأرضي فيها بعزم يعمل على تدوير القمر الصناعي لضبط اتجاهه. علمًا بأنّ مصدر التيار الكهربائي هو الخلايا الشمسية المثبتة على القمر الصناعي.



## الشكل (20): وظيفة العاكس

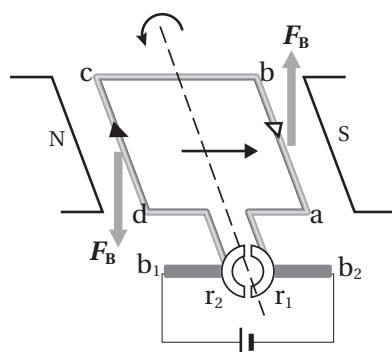
## المحرك الكهربائي Electric Motor

جهاز يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية، يستخدم في كثير من الأجهزة المنزلية مثل المروحة والغسالة، ويستخدم في السيارات. يبين الشكل (19) نموذجًا لمحرك كهربائي، تظهر فيه الأجزاء الرئيسة الآتية:

1. قطب مغناطيس متقابلان يولدان مجالاً مغناطيسياً.
  2. ملفٌ من سلكٍ نحاسيٍ معزولٍ يوضع بين قطبي المغناطيس، وقابل للدوران حول محور ثابت يقع في مستوى الملف.
  3. العاكس؛ وهو نصفاً أسطوانةً موصلة، يتصل كُلُّ نصفٍ بأحد طرفي الملف.
  4. فرشاتان من الكربون تلامسان العاكس وتشكلان بمصدر التيار.

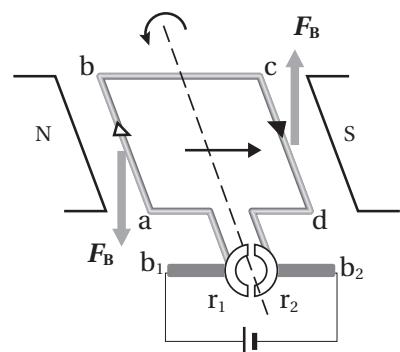
تنقل الفرشاتان ( $b_1$ ,  $b_2$ ) التيار الكهربائي من مصدر التيار (البطارية) إلى العاكس الذي يوصل التيار الكهربائي إلى الملف، فيتأثر الملف بعزم ازدجاج يدوره حول محور دوران ثابت يقع في مستوى الملف. عند دوران الملف، يحدث تبديل في تلامس إحدى الفرشاتين مع أحد نصفي العاكس ( $r_1$ ,  $r_2$ ) كل نصف دورة كما يبين الشكل (20). فينعكس اتجاه التيار الكهربائي في أضلاع الملف وتنعكس القوى المغناطيسية المؤثرة في كل ضلع، ويبقى العزم المؤثر فيه بالاتجاه نفسه فيواصل دورانه باتجاه واحد.

الملف بعد نصف دورة



تجاه التيار في الملف  $(a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d)$ : يتأثر الضلوع  $(dc)$  بقوة للأسفل والضلوع  $(ab)$  بقوة للأعلى، في versa، الملف دورانه يعكس، اتجاه حركة عقارب الساعة.

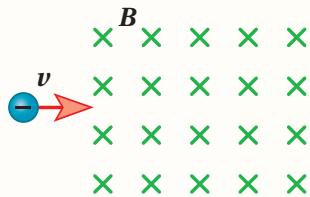
## الوضع الابتدائي للملف



اتجاه التيار في الميلف (a): يتأثر الضلع (ab) بقوة للأسفل والضلع (dc) بقوة للأعلى، فيدور الميلف بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة.

# مراجعة الدرس

1. الفكرةُ الرئيسيَّة: أعرَّفُ المجال المغناطيسيَّ عند نقطة، وأذكُر وحدة قياسه في النظام الدوليِّ للوحدات.



2. **أستنتجُ**: يتحرَّك الإلكترونُ باتجاه محور  $(x+)$ ، فيدخل مجالاً مغناطيسيًّا مُنظامًا اتجاهه مع محور  $(z-)$ ؛ كما في الشكل. أجب عن السؤالين الآتيين:

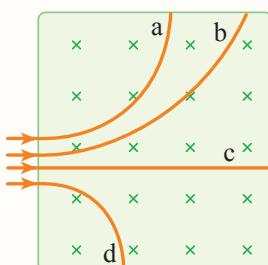
أ. ما اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون لحظة دخوله منطقة المجال؟

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

3. **أقارنُ**: تؤثُّ المجالات الكهربائية والمغناطيسية في الجسيمات المشحونة بقوَّى. أقارن بين القوتين الكهربائية والمغناطيسية المؤثرين في الجسيمات المشحونة كما هو مُبيَّن في الجدول الآتي:

القوة المغناطيسية	القوة الكهربائية	وَجْه المقارنة
		هل تتأثُّر الشحنة الساكنة بالقوة؟
		اتجاه القوة.
		بَذْلُ شُغْلٍ على الشحنة.

4. **أتوّقعُ**: ثلَاث جُسيمات مشحونة: إلكترون، بروتون، وأيون صوديوم  $(Na^+)$ ؛ دخلت منطقة مجال مغناطيسيًّا مُنظام في جهاز مطياف الكتلة بالسرعة نفسها. كيفُ أُميِّز كل جُسيم منها عن طريق اتجاه الانحراف ونصف قُطر المسار؟ أوضِّح إجابتي بالرسم.

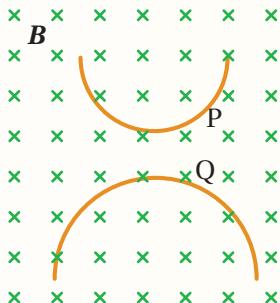


5. **أستنتجُ**: دخلت أربعة جُسيمات  $(a, b, c, d)$  منطقة مجال مغناطيسيًّا مُنظام بسرعاتٍ متساويةٍ وباتجاهٍ عموديٍّ على خطوطه كما في الشكل. أحدَد أيًّا من هذه الجسيمات يحمل شحنةً موجبةً وأيًّا يحمل شحنةً سالبةً وأيًّا لا يحمل شحنةً، ثم أرتُّب الجسيمات  $a, b, d$  تصاعديًّا حسب كتلتها. علمًا بأنَّها متساوية في مقدار الشحنة.

6. **استخدم الأرقام**: يتحرَّك بروتون بسرعة  $(4.0 \times 10^6 \text{ m/s})$  في مجال مغناطيسيٍّ مُنظامٍ مقداره  $(1.7 \text{ T})$ ؛ فيتَأثُّر بقوَّةٍ مغناطيسية  $(8.2 \times 10^{-13} \text{ N})$ . أجدُّ قياس الزاوية بين مُتجهي سرعة البروتون وخطوط المجال المغناطيسي.

7. أضْعِ دَائِرَةَ حَوْلَ رَمْزِ الإِجَابَةِ الصَّحِيحةِ لِكُلِّ جَمْلَةٍ مَمَّا يَأْتِي:

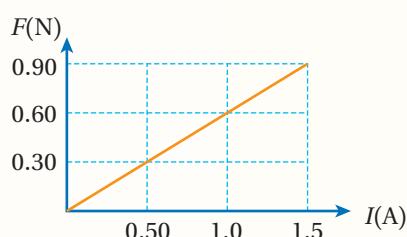
1. يَبْيَّنُ الشَّكْلُ مَسَارَيِ حَرْكَةِ جَسَمَيْنِ (P, Q): أَحَدُهُمَا لِلْكَلْتُرُونِ وَالْآخَرُ لِبِرُوتُونِ، أَدْخِلَا مَجَالًا مَغَناطِيسِيًّا مَنْتَظِمًا



بِالسُّرْعَةِ نَفْسَهَا. يَتَحَرَّكُ الْكَلْتُرُونُ عَبْرَ الْمَسَارِ الَّذِي رَمَزَهُ:

- أ. (P) بِاتِّجَاهِ حَرْكَةِ عَقَارَبِ السَّاعَةِ.
- ب. (P) عَكْسِ حَرْكَةِ عَقَارَبِ السَّاعَةِ.
- ج. (Q) بِاتِّجَاهِ حَرْكَةِ عَقَارَبِ السَّاعَةِ.
- د. (Q) عَكْسِ حَرْكَةِ عَقَارَبِ السَّاعَةِ.

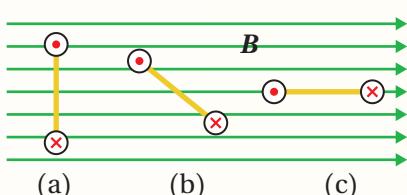
2. يَبْيَّنُ الشَّكْلُ تَمْثِيلًا لِلْعَلَاقَةِ بَيْنَ الْقُوَّةِ الْمَغَناطِيسِيَّةِ الْمُؤَثَّرَةِ فِي مَوْصِلٍ مُسْتَقِيمٍ دَاخِلٍ مَجَالًا مَغَناطِيسِيًّا مَنْتَظِمًا وَالْتِيَارِ الْمَارِ فِيهِ. إِذَا كَانَ طَوْلُ الْمَوْصِلِ (40 cm) وَيَتَعَامِدُ طَوْلُهُ مَعَ الْمَجَالِ، فَإِنَّ مَقْدَارَ الْمَجَالِ الْمَغَناطِيسِيِّ الْمُؤَثَّرِ فِي الْمَوْصِلِ بُوَحْدَةً (T) يَسَاوِي:



- ب. 0.67
- د. 1.3
- ج. 2.4
- أ. 1.5

3. عَنْدَمَا يَتَحَرَّكُ جَسَيْمٌ مَشْحُونٌ دَاخِلُ مَجَالًا مَغَناطِيسِيًّا فِي مَسَارٍ دَائِرِيٍّ فَإِنَّ الْمَجَالَ الْمَغَناطِيسِيِّ يُكَسِّبُ الْجَسَيْمَ تَسَارُعًا مَرْكَزِيًّا يَعْمَلُ عَلَيْهِ:

- أ. تَغْيِيرٌ مَقْدَارِ السَّرْعَةِ دُونَ تَغْيِيرٍ لِاتِّجَاهِهَا.
- ب. تَغْيِيرٌ لِاتِّجَاهِ السَّرْعَةِ مَعَ بَقَاءِ مَقْدَارِهَا ثَابِتًا.
- ج. تَغْيِيرٌ لِاتِّجَاهِ السَّرْعَةِ مَقْدَارًا وَاتِّجَاهًا.
- د. الْمُحَافَظَةُ عَلَى السَّرْعَةِ ثَابِتَةٍ مَقْدَارًا وَاتِّجَاهًا.



\* يَبْيَّنُ الشَّكْلُ مُنْظَرًا جَانِبِيًّا لِلْمَلَفَاتِ الْمُتَمَاثِلَاتِ فِي الشَّكْلِ وَالْمَسَاحَةِ، وَيَمْرُّ فِيهَا تِيَارًا مُتَسَاوِيًّا تَقْعُدُ فِي مَجَالٍ مَغَناطِيسِيٍّ مَنْتَظِمٍ. أَجِيبُ عَنِ الْفَقْرَتَيْنِ الْأَتَيْتَيْنِ مُعَتمِدًا عَلَى الشَّكْلِ:

4. التَّرْتِيبُ التَّنَازُلِيُّ لِعَزْمِ الْاِزْدَوَاجِ الْمُؤَثَّرِ فِي الْمِلَفَاتِ الْمُتَمَاثِلَاتِ الْمُتَقَعِّدَاتِ عَنِ الْلَّهُوَذَةِ الْمُبَيَّنَةِ فِي الشَّكْلِ:

- أ.  $\tau_c = \tau_b > \tau_a$ .
- ب.  $\tau_a > \tau_b > \tau_c$ .
- ج.  $\tau_c > \tau_b > \tau_a$ .
- د.  $\tau_b > \tau_a > \tau_c$ .

5. الْمِلَفُ (أو الْمِلَفَاتُ) الَّذِي تَكُونُ الْقُوَّةُ الْمُحَصَّلَةُ الْمُؤَثَّرَةُ فِيهِ تَسَاوِي صَفَرًا:

- أ. الْمِلَفُ (a) فَقْطًا.
- ب. الْمِلَفَانِ (a) وَ (c) فَقْطًا.
- ج. الْمِلَفُ (c) فَقْطًا.
- د. الْمِلَفَاتُ الْمُتَمَاثِلَاتُ (a) وَ (b) وَ (c).

### قانون بيو - سافار The Biot-Savart Law

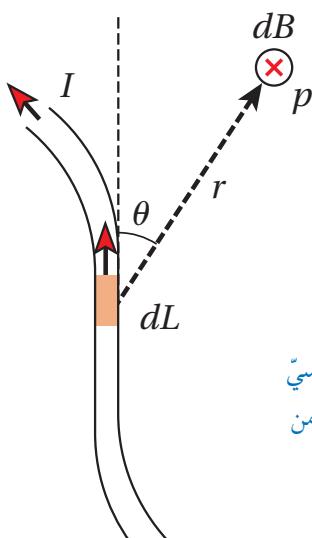
تعلّمتُ أنَّ المغناطيس يولد حُولَه مجالاً مغناطيسياً، لكنَّ الاستخدام العملي والتطبيقات التكنولوجية في الغالب تعتمد على المغناطيس الكهربائي؛ إذ يمكن توليد مجال مغناطيسي بتمرير تيار كهربائي في موصل. هذا ما توصل إليه العالم الدنماركي أورستد، عندما لاحظ انحراف إبرة بوصلة وضعت أسفل سلك يمر فيه تيار كهربائي، وفسر ذلك بـ توليد مجال مغناطيسي حول السلك أدى إلى انحراف إبرة البوصلة.

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

جان بيو J. Biot و فيليكس سافار F. Savart؛ عالمان فرنسيان تابعاً لبحوثهما في الموضوع نفسه، إلى أن توصلتا تجريبياً إلى علاقة رياضية لحساب المجال المغناطيسي الناتج عن قطعة من موصل يحمل تياراً كهربائياً، كما في الشكل (21)، عُرفت العلاقة بـ قانون بيو - سافار، وهو:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{IdL \sin\theta}{r^2}$$

حيث ( $dB$ ) مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة ( $P$ ) الناشئ عن قطعة صغيرة ( $dL$ ) من موصل يسري فيه تيار كهربائي ( $I$ ). والمسافة؛ ( $r$ ) هي مقدار المُتجه الذي يمتد من ( $dL$ ) إلى النقطة ( $P$ ) ويصنّع زاوية ( $\theta$ ) مع مُتجه الطول للقطعة ( $dL$ ).



الشكل (21): المجال المغناطيسي الجزيئي الناتج عن قطعة صغيرة من موصل يحمل تياراً كهربائياً.

الكلمة الرئيسية:

يمكن توليد مجال مغناطيسي بتمرير تيار كهربائي في موصل، ويُحسب المجال المغناطيسي الذي يولده موصل يحمل تياراً كهربائياً باستخدام علاقات رياضية تعتمد على عوامل، منها شكل الموصل الذي يحمل التيار.

نتائج التعلم:

- أستنتج معمداً على قانون بيو و سافار 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 الناتج عن مرور تيار كهربائي في موصل مستقيم وطويل، وملف دائري، وملف لولبي.

المفاهيم والمصطلحات:

النفاذية المغناطيسية

Magnetic Permeability

ملف لولبي

Solenoid

مناطق مغناطيسية

Magnetic Domains

يرمز ( $\mu$ ) إلى ثابت النفاذية المغناطيسية للفراغ (أو الهواء)، وقيمه  $10^{-7} \times 4\pi T \cdot m/A$ ، ويعبر مقدار النفاذية المغناطيسية Magnetic permeability عن قابلية الوسط لتدفق خطوط المجال المغناطيسي خلاله. حيث تكون أقل نفاذيةً للفراغ وأكبرها للحديد والمواد المغناطيسية الأخرى.

### المجال المغناطيسي الناشئ عن موصل يحمل تياراً كهربائياً

#### Magnetic Field of a Current Carrying Conductor

يمثل المقدار ( $dB$ ) في قانون بيو-سافار المجال الجزيئي الناتج من قطعة صغيرة من موصل يحمل تياراً كهربائياً، لحساب المجال المغناطيسي بالقرب من موصل مستقيم لنهائي الطول يسري فيه تيار كهربائي ( $I$ )، عند نقطة على مسافة عمودية ( $r$ ) منه؛ نستخدم حساب التكامل في الرياضيات، فنجمع المجالات المغناطيسية الجزئية ( $dB$ ) الناتجة عن جميع مقاطع الموصل، ونحصل على العلاقة الرياضية الآتية:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

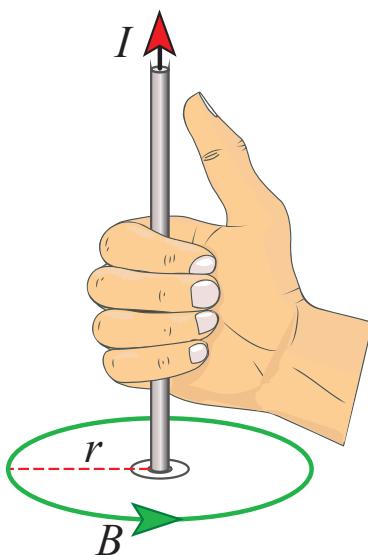
تعطي هذه العلاقة مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة جميعها الواقعة على محيط دائري نصف قطرها ( $r$ )، ويمر الموصل في مركزها ويكون عمودياً على مستواها، كما في الشكل (22/أ). ويكون مقدار المجال المغناطيسي ثابتاً عند كل نقطة على محيط الدائرة. وتبين العلاقة السابقة أن مقدار المجال المغناطيسي عند نقطة معينة يتضاعف طردياً مع التيار المار في الموصل ويعكسياً مع بعد النقطة عن الموصل.

لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي حول موصل مستقيم، تُستخدم قاعدة اليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التيار، وتلتف الأصابع حول الموصل، فيشير اتجاه دورانها إلى اتجاه المجال المغناطيسي حول الموصل كما يبيّن الشكل (22/أ).

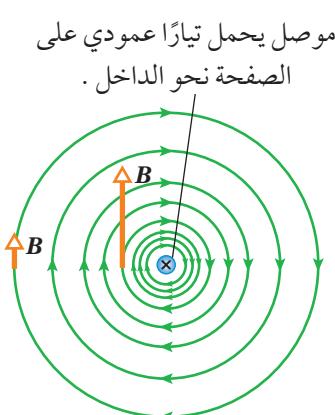
الشكل (22/ب) يبيّن خطوط المجال المغناطيسي حول موصل مستقيم لنهائي الطول يحمل تياراً باتجاه محور ( $-z$ )، حيث تشكل الخطوط دوائر متحدة المركز مع الموصل، ويمثل التباعد بين الخطوط العلاقة العكسية بين مقدار المجال ( $B$ ) والبعد عن الموصل ( $r$ ). ولتحديد اتجاه المجال عند أي نقطة بالقرب من الموصل، يُرسّم مماس على خط المجال عند تلك النقطة كما هو مبيّن في الشكل.

تجدر الإشارة إلى أن المجال المغناطيسي يساوي صفرًا عند أي نقطة تقع على امتداد موصل مستقيم ورفعه يحمل تياراً كهربائياً؛ حيث تكون الزاوية ( $\theta$ ) بين متجه موقع النقطة ومتجه طول الموصل (الواردة في قانون بيو-سافار)، تساوي صفرًا أو ( $180^\circ$ )، ويكون ( $\sin \theta = 0$ ).

**أتحقق:** أصف شكل خطوط المجال المغناطيسي حول موصل مستقيم لنهائي الطول يحمل تياراً كهربائياً، وأبيّن كيف أحدد اتجاهه عند نقطة.



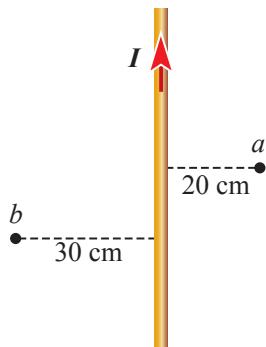
(أ) تحديد اتجاه المجال المغناطيسي حول موصل مستقيم لنهائي الطول باستخدام قاعدة اليد اليمنى.



(ب) تحديد اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة.

الشكل (22): المجال المغناطيسي حول موصل مستقيم لنهائي الطول يحمل تياراً كهربائياً.

## المثال 8



الشكل (23/أ): جزء من سلك مستقيم لا نهائي الطول يحمل تياراً كهربائياً مقداره (3 A)، بالاعتماد على الشكل (23/أ)؛ أجد:

- أ. المجال المغناطيسي عند النقطة (a).
- ب. المجال المغناطيسي عند النقطة (b).

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

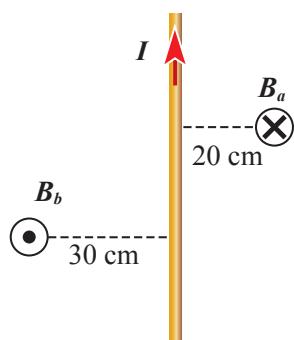
المطلوب:  $B_a = ?$ ,  $B_b = ?$

الحل:

أ. مقدار المجال عند النقطة (a).

$$B_a = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_a} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3}{2\pi \times 0.2} = 3 \times 10^{-6} \text{ T}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى؛ برسم مماس على خط المجال عند النقطة، فإنَّ اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة (a) يكون داخلاً في الصفحة وعمودياً عليها. كما في الشكل (23/ب).

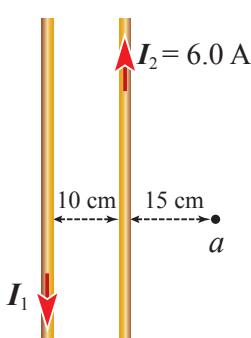


الشكل (23/ب): اتجاه المجال المغناطيسي على جانبي سلك مستقيم لا نهائي الطول يحمل تياراً كهربائياً.

ب. مقدار المجال عند النقطة (b)

$$B_b = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_b} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 3}{2\pi \times 0.3} = 2 \times 10^{-6} \text{ T}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى فإنَّ اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة (b) يكون خارجاً من الصفحة وعمودياً عليها، كما في الشكل (23/ب).



الشكل (24): نقطة في مجال سلكين متوازيين لا نهائي الطول يحملان تيارين كهربائيين متعاكسين كما في الشكل (24). أجد مقدار التيار ( $I_1$ ) الذي يجعل المجال المغناطيسي المُحصل عند النقطة (a) يساوي صفرًا.

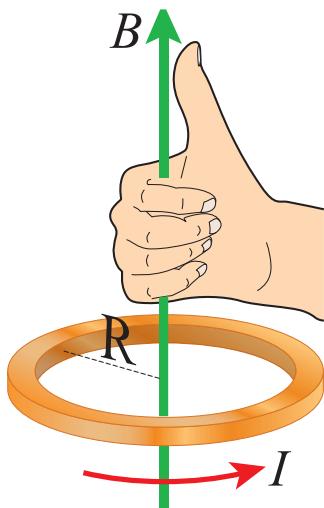
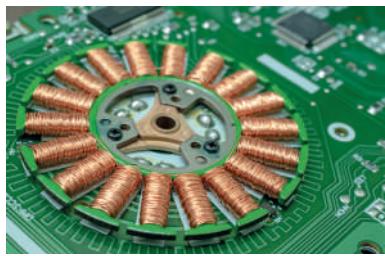
المعطيات:  $B = 0$ ,  $I_2 = 6.0 \text{ A}$ ,  $r_2 = 0.15 \text{ m}$ ,  $r_1 = 0.25 \text{ m}$

المطلوب:  $I_1 = ?$

## المثال 9

سلكان مستقيمان لا نهائي الطول ومتوازيان، يحملان تيارين كهربائيين متعاكسين كما في الشكل (24). أجد مقدار التيار ( $I_1$ ) الذي يجعل المجال المغناطيسي المُحصل عند النقطة (a) يساوي صفرًا.

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



الشكل (25): استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي في مركز ملف دائري.

بتطبيق قاعدة اليد اليمنى، فإن المجالين ( $B_1$ ) و ( $B_2$ ) عند النقطة (a) متعاكسان في الاتجاه، وتكون محاصلهما صفرًا، عندما يتساوا في المقدار:

$$B_1 = B_2$$

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

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

### للمزيد

**أستخدم الأرقام:** موصلان مستقيمان متوازيان لانهائيان الطول؛ المسافة بينهما (30 cm)، يحمل أحدهما تياراً كهربائياً يساوي ثلاثة أمثال التيار الذي يحمله الموصل الثاني. أُحدّد نقطةً على الخط العمودي الواصل بينهما؛ ينعدم عندها المجال المغناطيسي عندما يكون التياران بالاتجاه نفسه.

### المجال المغناطيسي الناشئ عن ملف دائري

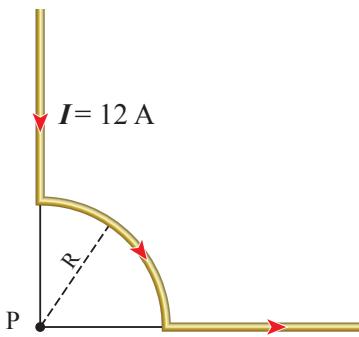
#### Magnetic Field of a Circular Coil

عند تشكيل سلك على صورة ملف دائري نصف قطره ( $R$ ) يتكون من عدد ( $N$ ) لفة؛ وسريان تيار كهربائي ( $I$ ) فيه، يتولّد داخل الملف مجال مغناطيسي، وباستخدام حساب التكامل على قانون بيو-سافار، يمكن التوصل إلى أن المجال المغناطيسي في مركز الملف يُعبر عنه بالعلاقة الآتية:

$$B = \frac{\mu_0 I N}{2R}$$

لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي في مركز ملف دائري؛ تُستخدم قاعدة اليد اليمنى، فعندما تشير أصابع اليد الأربع إلى اتجاه التيار في الملف، كما في الشكل (25)؛ فإن الإبهام يشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي عند مركز الملف.

## المثال 10



يتكون سلكٌ من جزءٍ يشكلُ ربع دائرةٍ نصفُ قطرها  $R = 0.50\text{ m}$ ، وجزأين مستقيمين لا نهائِيَّ الطول، كما في الشكل (26). أحسبُ مقدار المجال المغناطيسيّ عند النقطة (P) وأحدُّ اتجاهه.

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

المطلوب:  $B = ?$

الحلّ:

الشكل (26): سلكٌ يتكون من ثلاثة أجزاءٍ يشكلُ أحدهُ ربع حلقةٍ دائريَّةٍ تقعُ النقطة P في مركزِها.

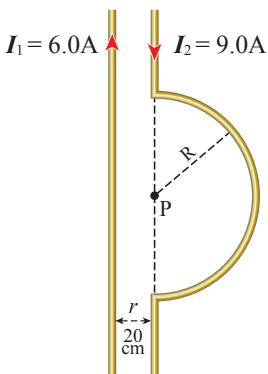
بالنسبة للجزء الذي يشكل ربع دائرة؛ يمكن تطبيق العلاقة المستخدمة في حساب المجال المغناطيسي الناشئ عن ملفٍ دائريٍ على أنَّ عدد اللفات:  $N = \frac{1}{4}$ .

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 12 \times 0.25}{2 \times 0.50} = 3.8 \times 10^{-6}\text{ T}$$

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

بالنسبة للجزأين المستقيمين؛ فإنَّ النقطة (P) تقع على امتدادِهما، لذلك يكون المجال المغناطيسي الناتج عنِّهما عند النقطة (P) يساوي صفرًا.

## المثال 11



سلكَان مستقيمان لا نهائِيَّ الطول؛ يحتوي أحدهُما على نصف حلقةٍ مركُّزاً (P)، ونصف قطرها ( $0.2\pi\text{ m}$ )، كما في الشكل (27). أحسبُ مقدار المجال المغناطيسي المُحَصَّل عند النقطة (P) وأحدُّ اتجاهه.

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

المطلوب:  $B = ?$

الحلّ:

الشكل (27): المجال المغناطيسي المُحَصَّل لسلكين متجلَّرين.

المجال الناتج عن السلك المستقيم لا نهائِيَّ الطول:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 6.0}{2\pi \times 0.20} = 6.0 \times 10^{-6}\text{ T}$$

المجال الناتج عن الملف الدائري:

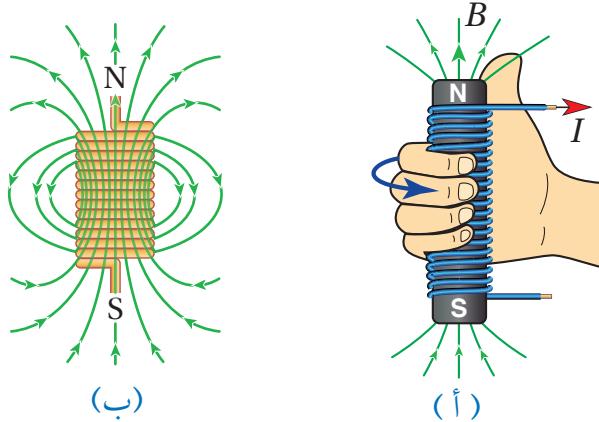
$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2 N}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 9.0 \times 0.50}{2 \times 0.2\pi} = 4.5 \times 10^{-6}\text{ T}$$

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

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

الشكل (28) :

- (أ) استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي داخل ملفٍ لولبيٍ على امتداد محوره.
- (ب) المجال المغناطيسي لملف لولبيٍ حلقاته مترادفة.



### المجال الناشئ عن ملفٍ لولبيٍ يحمل تياراً كهربائياً

#### Magnetic Field of a Solenoid Carrying a Current

**الملف اللولبي** Solenoid سلكٌ موصّل ملفوفٌ في حلقاتٍ دائريّةٍ مترادفةٍ معزولةٍ عن بعضها بعضاً، ويأخذ الملف شكلاً أسطوانيّاً، كما في الشكل (28/أ). عندما يسري في الملف تيارٌ كهربائيٌّ فإنه يولّد مجالاً مغناطيسيّاً يمكن حسابُ مقداره على امتداد المحور داخل الملف وبعيداً عن طرفيه باستخدام العلاقة الآتية:

$$B = \frac{\mu_0 I N}{l}$$

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

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

وونتها يمكن كتابة العلاقة السابقة على الصورة الآتية:

$$B = \mu_0 I n$$

باستخدام قاعدة اليد اليمنى؛ يمكن تحديد اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي؛ فعندما تُشير الأصابع الأربع إلى اتجاه التيار في حلقات الملف، يشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي داخله، كما في الشكل (28/أ). ويحدد اتجاه خطوط المجال المغناطيسي القطب الشمالي للملف؛ فيكون شماليّاً في جهة خروج خطوط المجال وجنوبيّاً في جهة دخولها. ويبين الشكل (28/ب) خطوط المجال المغناطيسي الناشئ عن ملف حلقاته مترادفة، وعندما تكون حلقات الملف اللولبي مترادفةً وطوله أكبر بكثيرٍ من قطره؛ فإنّ المجال المغناطيسي داخله وبعيداً عن طرفيه يكون منتظمًا.

**أتحقق:** ما صفات الملف اللولبي التي تجعل المجال المغناطيسي داخله منتظمًا؟

## المثال 12

ملف لوليبي يتكون من عدد لفّات بمعدل (1400) في كيل متر من طوله. إذا نشاء داخله مجال مغناطيسيي مقداره ( $T = 1.3 \times 10^{-2} T$ )؛ فما مقدار التيار الكهربائي المار فيه؟

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

المطلوب:  $I = ?$

الحل:

$$B = \mu_0 I n$$

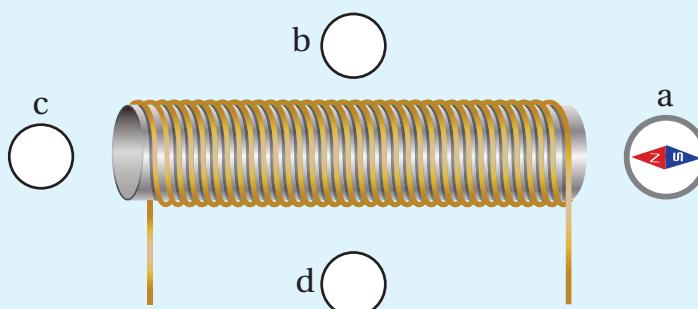
$$I = \frac{B}{\mu_0 n} = \frac{1.3 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1400} = 7.4 \text{ A}$$

### لتمرين

**أستنتاج:** أربع بوصلات وضعت بالقرب من ملف لوليبي يحمل تياراً 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، موضحاً كيف توصلت إلى الإجابة.

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



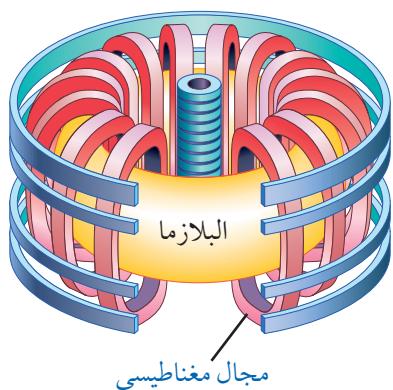
الشكل (29): المجال المغناطيسيي حول ملف لوليبي يحمل تياراً.

### 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 جداً تتجاوز قيمتها عدة ملايين درجة سلسليوس.

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

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



## الجولة 2

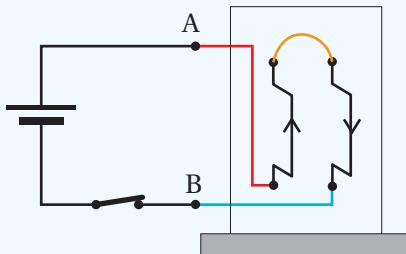
### القوة المغناطيسية بين موصلين متوازيين

**المواد والأدوات:** مصدر طاقة كهربائية (DC) منخفض القدرة، أسلاك توصيل، مقاومة متغيرة، ورق الألミニوم، أسلاك نحاسية سميكية، قطعة خشب، جهاز أميتر، مثقب.

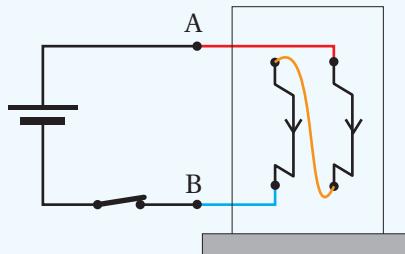
**إرشادات السلامة:** الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائية والتوصيلات، وعن استخدام المثقب.

#### خطوات العمل:

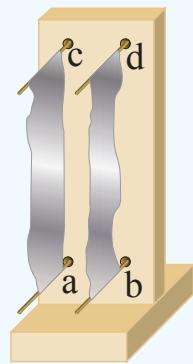
بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أُنفَّذ الخطوات الآتية:



الشكل (3)



الشكل (2)



الشكل (1)

- أثقب قطعة الخشب أربعة ثقوب رفيعة، وأثبتت في الثقوب أربعة أسلاك نحاسية سميكية، ثم أقص شريطين من ورق الألミニوم بطول (4 cm) وعرض (18 cm)، وأثبتت طرفيهما على الأسلاك النحاسية، كما في الشكل (1).
- أركب الدارة الكهربائية مستعينا بالشكل (2)، في هذه الحالة فإن الموصلين (شريطي الألミニوم) المتوازيين يحملان تيارين بالاتجاه نفسه.

**الاحظ:** أشغّل مصدر الطاقة على تيار منخفض مدة زمنية قصيرة، وأراقب ما يحدث لشريطي الألミニوم.

- أجّرب: أعيد توصيل الدارة كما في الشكل (3)، في هذه الحالة فإن الموصلين المتوازيين يحملان تيارين باتجاهين متعاكسين، ثم أكرر الخطوة السابقة.

#### التحليل والاستنتاج:

- أحدّد اتجاه التيار في كل شريط ألミニوم بناءً على طريقة التوصيل.
- استنتج اتجاه القوة المغناطيسية التي أثّر بها كل من الشريطين في الشريط الآخر.
- أقارب اتجاه القوة الذي استنتاجته من التجربة مع اتجاه الذي أتوصل إليه بتطبيق قاعدة اليد اليمنى.
- استنتاج علاقة بين اتجاه التيار في كل من الشريطين ونوع القوة المتبادلة بينهما؛ تجاذب أم تنافر.

## القوة المغناطيسية بين موصلين متوازيين

### Magnetic Force Between Two Parallel Conductors

درست سابقاً أنَّ الموصل الذي يحمل تياراً يتأثر بقوة مغناطيسية عند وضعه في مجال مغناطيسي خارجي، ودرست أيضاً أنَّ الموصل الذي يحمل تياراً يولّد حَوله مجالاً مغناطيسياً، فإذا وَضَعْنا موصلين متوازيين لا نهائين الطول يحملان تيارين ( $I_1$ ) و ( $I_2$ ) على بُعد ( $r$ ) من بعضهما، فإنَّ كُلَّ موصل سيتأثر بقوة مغناطيسية نتيجة وجوده في المجال المغناطيسي الذي يولّد الموصل الآخر.

يُبيّن الشكل (30/أ) موصلين متوازيين يحملان تيارين بالاتجاه نفسه، يولّد الموصل الأول مجالاً ( $B_1$ ) يُعبر عن مقداره بالعلاقة الآتية:

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

وحيث إنَّ الموصل الثاني يقع في هذا المجال ويتعادل معه، ويُمْرُّ فيه تيار كهربائيٍّ ( $I_2$ )؛ فإنَّ جزءاً منه طوله ( $L$ ) يتتأثر بقوَّة مغناطيسية مقدارُها:

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

بتَعْوِيْض قيمة ( $B_1$ )؛ أَحْصِلْ على القوَّة:

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

بالمثل، يمكن التوصل إلى أنَّ المجال ( $B_2$ ) الذي يولّد الموصل الثاني، يؤثُّ في الموصل الأول بقوَّة ( $F_{21}$ ) كما يُبيّن الشكل (30/ب) مساوية لقوَّة ( $F_{12}$ ):

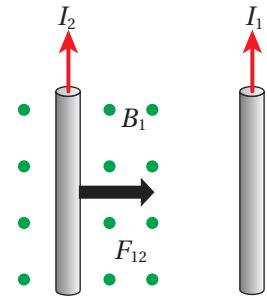
$$F_{21} = \frac{\mu_o I_1 I_2 L}{2\pi r}$$

بِتَطْبِيقِ قاعدة اليد اليمنى على كُلَّ موصل، نحدِّد اتجاه ( $F_{12}$ ) و ( $F_{21}$ ) كما يُبيّن الشكل (31/أ)، الذي يُمثِّل مقطعاً عرضياً للسلكين، أما إذا انعكس اتجاه التيار في أحد الموصلين، فسيُنعكس اتجاه القوتين ليُصْبِحَ كما في الشكل (31/ب)، ويُحَسَّبُ القانون الثالث لنيوتون، فإنَّ القوتين ( $F_{12}$ ) و ( $F_{21}$ ) تشكِّلان زوجاً فِعْلٍ ورَدَّ فِعْلٍ.

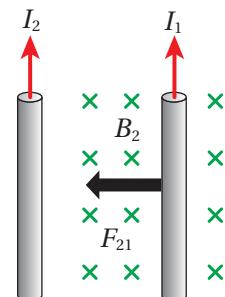
يتَبَيَّن ممَّا سبق أنَّ قوَّة مغناطيسية ( $F_B$ ) متبادلة تنشأ بين موصلين متوازيين لا نهائين الطول يحملان تيارين كهربائيين، ويُحَسَّب مقدار هذه القوَّة المتبادلة بين وَحْدة الأطوال من الموصلين بالعلاقة الآتية:

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

تكون القوَّة المتبادلة بين الموصلين قوَّة تجاذب عندما يكون التياران بالاتجاه نفسه، وتكون القوَّة المتبادلة بينهما قوَّة تناُفْر عندما يكون التياران باتجاهين متعاكسيْن.

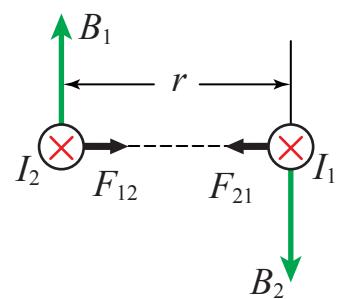


(أ): يتأثر الموصل الثاني بقوَّة مغناطيسية ( $F_{12}$ ) نتيجة وجوده في المجال المغناطيسي ( $B_1$ ) الناشئ من الموصل الأول.

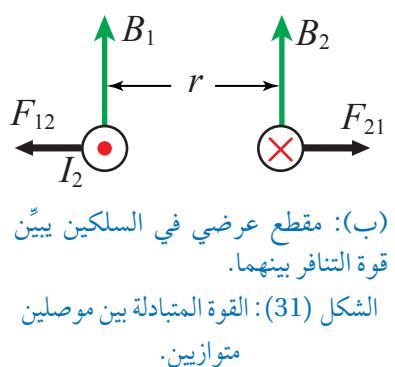


(ب): يتأثر الموصل الأول بقوَّة مغناطيسية ( $F_{21}$ ) نتيجة وجوده في المجال المغناطيسي ( $B_2$ ) الناشئ من الموصل الثاني.

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

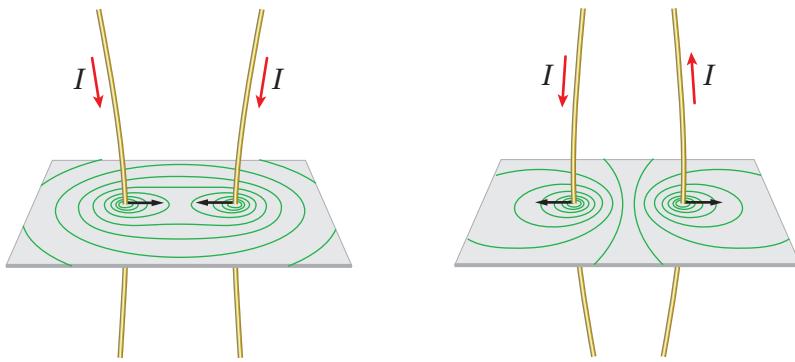


(أ): مقطع عرضي في السلكين يُبيّن قوَّة التجاذب المغناطيسية بينهما.



(ب): مقطع عرضي في السلكين يُبيّن قوَّة التناُفْر بينهما.

الشكل (31): القوَّة المتبادلة بين موصلين متوازيين.

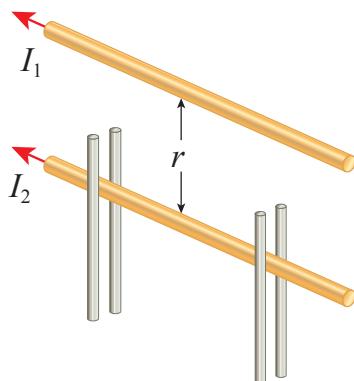


الشكل (32): خطوط المجال المغناطيسي المحصل لموصلين متوازيين يحملان تيارين متساوين.

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

يمكن التتحقق من القوة المتبادلة بين الموصلين برسم خطوط المجال المغناطيسي المحصل الناشئ عن الموصلين كما في الشكل (32). فعندما يكون التياران الماران في الموصلين باتجاهين متعاكسين كما في الشكل (32/أ)، تكون خطوط المجال في المنطقة بين الموصلين متقاربة، في حين تكون متباude في المنطقة الخارجية، فيتأثر كل موصل بقوة تُنْقله من منطقة المجال المغناطيسي القوي إلى منطقة المجال المغناطيسي الضعيف؛ لذا يتبع الموصلان عن بعضهما (قوة تنافر)، أما الشكل (32/ب)، فيُبيّن خطوط المجال المغناطيسي المحصل عندما يكون التياران بالاتجاه نفسه، وبملاحظة مناطق المجالين القوي والضعيف، أستنتاج أنَّ القوة المغناطيسية في هذه الحالة تجعل الموصلين يقتربان من بعضهما (قوة تجاذب).

### المثال 13



الشكل (33): موصلان مستقيمان لا نهائيا الطول يحمل كلّ منهما تياراً كهربائياً (200 A)؛ الموصل العلويُّ مثبت، والسفليُّ قابل للحركة رأسياً، كما في الشكل (33). إذا علمت أنَّ وزن وحدة الأطوال من الموصل السفلي (0.2 N/m)؛ أجد المسافة (r) التي تجعله مُتنزاً.

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

المطلوب:  $r = ?$

عندما يتّزن الموصّل السفليُّ، فإنَّ وزن وحدة الأطوال منه يساوي القوّة المغناطيسية المؤثّرة لِكُلّ وحدة طول.

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

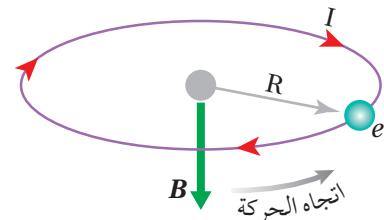
$$0.2 = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi r}$$

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

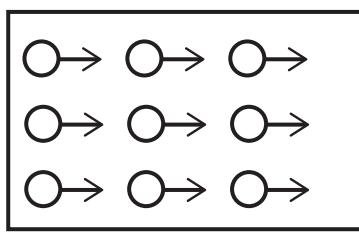
### المغناطيسية الطبيعية Natural magnetism

لاحظتُ فيما سبق أن سريان تيار كهربائي في موصّل يولّد مجالاً مغناطيسياً. فكيف لمغناطيس دائم لا يسري فيه تيار كهربائي أن يولّد مجالاً مغناطيسياً؟ تتكون المادة من ذرات تتحرّك فيها الإلكترونات حول النواة في مسارات مغلقة كما يبيّن الشكل (34)، على شكل حلقات صغيرة جدّاً؛ تشكّل كل حلقة منها تياراً كهربائياً يؤدّي إلى نشوء مجال مغناطيسي له قطبان شمالي وجنوبي، بحيث يمكن اعتبار المادة وكأنّها تتكون من عدد كبير من المغناطسات الذريّة الصغيرة.

يستخدم مفهوم العزم الشاقطبّي المغناطيسي لوصف مقدار واتجاه المجال المغناطيسي الناشئ عن المغناطس الذري، أتأمل الشكل (35)، فعندما توزّع العزوم المغناطيسي في الاتجاهات كافة بشكل عشوائي فإن المجالات المغناطيسية الذريّة تلغى بعضها (محصلة تساوي صفر). أما عندما تترتب العزوم المغناطيسي في الاتجاه نفسه، كما في المغناطيس الدائم، فإن محصلة المجالات المغناطيسية تؤدّي إلى نشوء مجال مغناطيسي في الحيز المحيط بالمغناطيس.

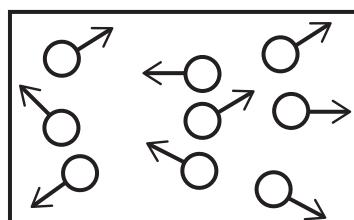


الشكل (34): حركة الإلكترون حول النواة في مسار مغلق، تؤدي إلى نشوء مجال مغناطيسي.



(ب)

ب. عندما تترتب العزوم المغناطيسي في الاتجاه نفسه، فإن محصلة المجالات المغناطيسية الذريّة تؤدّي إلى نشوء مجال مغناطيسي.



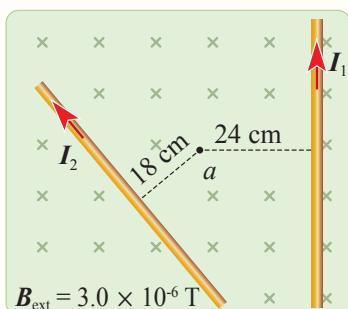
(أ)

أ. عندما توزّع العزوم المغناطيسي في الاتجاهات كافة بشكل عشوائي فإن المجالات المغناطيسية الذريّة تلغى بعضها.

الشكل (35): يمكن اعتبار المادة وكأنّها تتكون من عدد كبير من المغناطسات الذريّة الصغيرة.

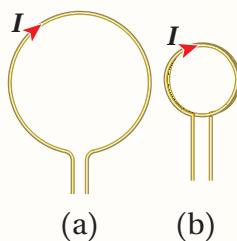
# مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسية:** أذكر العوامل التي يعتمد عليها مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن مقطعٍ صغيرٍ من موصلٍ يحمل تياراً كهربائياً، عند نقطةٍ بالقرب من هذا الموصل.

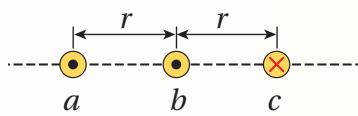


2. **استنتاج:** يتحرّك الكترونٌ في الفراغ في خطٍّ مستقيم؛ ما المجالات الناشئة عنه؟

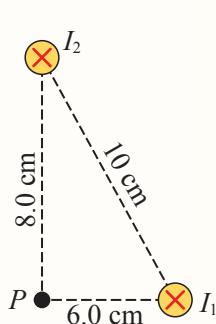
3. **استخدم الأرقام:** بالاعتماد على الشكل، إذا كان ( $I_1 = I_2 = 6.0 \text{ A}$ )؛ أجد مقدار المجال المغناطيسي المُمحَّصِل عند النقطة (a)، وأحدّد اتجاهه.



4. **استنتاج:** يبيّن الشكل سلكًا يحمل تياراً (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. **استنتاج:** ثلاثة أسلاك مستقيمة لـنهاية الطول، يسري فيها تيارات كهربائية متساوية بالاتجاهات المبينة في الشكل، وبعد بين الأسلاك متساوي. أرتّب الأسلاك تنازلياً حسب مقدار القوة المغناطيسية المُمحَّصِلة لكل وحدة طول المؤثرة في كل سلك.



6. **استخدم الأرقام:** موصلان مستقيمان متوازيان؛ يحمل كلُّ منهما تياراً كهربائياً باتجاهِ داخل الصفيحة، كما في الشكل. إذا كان تيار الأول (12 A)، وتيار الثاني (40 A). أحسب كلاً من:

أ. القوة التي يؤثّر بها الموصل الثاني في وحدة الأطوال من الموصل الأول مقداراً واتجاهًا.

ب. المجال المغناطيسي المُمحَّصِل عند النقطة (P) مقداراً واتجاهًا.

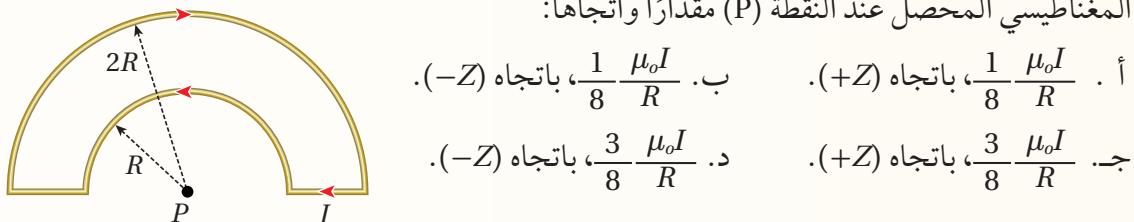
7. أضْعَدْ دائرة حَوْلَ رَمْزِ الإِجَابَةِ الصَّحِيحةِ لِكُلِّ جَمْلَةِ مَمَّا يَأْتِي:

1. موصلان مستقيمان لا نهائيا الطول متوازيان والبعد بينهما (4.0 cm)، يمر فيهما تياران كهربائيان متعاكسان مقداريهما (I<sub>1</sub> = 6.4 A, I<sub>2</sub> = 3.2 A). مقدار المجال المغناطيسي المحصل عند نقطة في منتصف المسافة بينهما بوحدة (T) يساوي:

د.  $3.2 \times 10^{-7}$  ج.  $9.6 \times 10^{-7}$  ب.  $2.0 \times 10^{-5}$  أ.  $9.6 \times 10^{-5}$

2. يَبْيَنُ الشَّكْلُ موصلان متوازيان لا نهائيا الطول يمر فيهما تياران متساويان، إِذَا كَانَ (B) يُمْثِلُ مقدار المجال المغناطيسي الناشئ عن الموصل (1) عَنْ النَّقْطَةِ (2) عَنْ النَّقْطَةِ (a) فَإِنَّ المجال المغناطيسي المحصل عَنْ النَّقْطَةِ (2) نَفْسَهَا بِدَلَالَةِ (B) يَسَاوِي:
- ب.  $\frac{3}{2} B$  ج.  $\frac{2}{3} B$  د.  $\frac{4}{3} B$  أ.

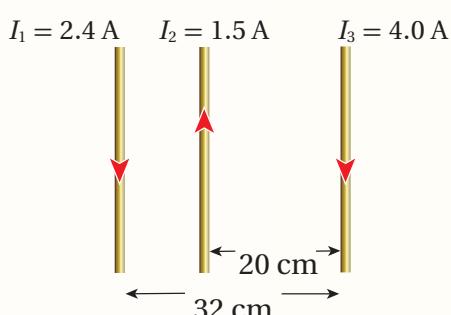
3. يَبْيَنُ الشَّكْلُ سُلْكًا يَسْرِيَّ فِيهِ تِيَارٌ كَهْرَبَائِيٌّ (I). مَعْتَمِدًا عَلَى الْبَيَانَاتِ الْمُثَبَّتَةِ فِي الشَّكْلِ فَإِنَّ المجال المغناطيسي المحصل عَنْ النَّقْطَةِ (P) مَقْدَارًا وَاتِّجَاهًا:



أ.  $\frac{1}{8} \frac{\mu_0 I}{R}$ , باتجاه (+Z).  
ب.  $\frac{3}{8} \frac{\mu_0 I}{R}$ , باتجاه (-Z).  
ج.  $\frac{3}{8} \frac{\mu_0 I}{R}$ , باتجاه (+Z).  
د.  $\frac{1}{8} \frac{\mu_0 I}{R}$ , باتجاه (-Z).

4. دَارَةٌ تَتَكَوَّنُ مِنْ مِلْفَّ لَوْلِيٍّ وَبَطَارِيَّةٍ وَمَقاوِمَةٍ. فِي أَثْنَاءِ مَرْوُرِ التِّيَارِ الْكَهْرَبَائِيِّ فِي الدَّارَةِ يَتَوَلَّ دَاخِلُ الْمِلْفَّ مَجَالٌ مَغَناطِيسِيٌّ (B)، فَإِنَّ طَرْفَ الْمِلْفَ الَّذِي يَصْبُحُ قَطْبًا مَغَناطِيسِيًّا شَمَالِيًّا، وَاتِّجَاهُ التِّيَارِ الْكَهْرَبَائِيِّ الْمَارِ فِي المَقاوِمَةِ عَلَى التَّرِيَبِ:
- أ. (X)، من (b) إلى (a).  
ب. (Y)، من (b) إلى (a).  
ج. (X)، من (a) إلى (b).  
د. (Y)، من (a) إلى (b).

5. يَبْيَنُ الشَّكْلُ ثَلَاثَةَ أَسْلَاكٍ مَتَوَازِيَّةٍ لَا نَهَائِيَّةُ الطَّوْلِ، مَعْتَمِدًا عَلَى الْبَيَانَاتِ الْمُثَبَّتَةِ فِي الشَّكْلِ فَإِنَّ الْفُوَّةَ الْمَحَصَّلَةَ الْمُؤَثِّرَةَ فِي وَحدَةِ (N) أَطْوَالَ الْمَوْسَلِ الَّذِي يَسْرِيَ فِيهِ التِّيَارِ (I<sub>1</sub>) بَوْحَدَةِ (N) يَسَاوِي:
- أ.  $10^{-6} \times 12$  ، باتجاه محور (+x).  
ب.  $10^{-6} \times 6$  ، باتجاه محور (+x).  
ج.  $10^{-6} \times 6$  ، باتجاه محور (-x).  
د. 0



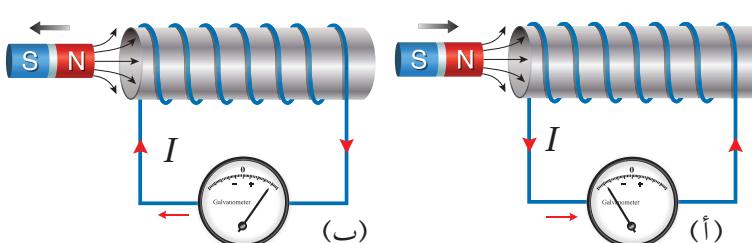
### التيار الكهربائي الحثي Induced Current

تعلمتُ في الدرس السابق أنَّ التيار الكهربائي يولد مجالاً مغناطيسياً. سنتعرَّف في هذا الدرس الأثر العكسي؛ أي توليد تيار كهربائي باستخدام مجال مغناطيسي.

يوضّح الشكل (36) مغناطيساً مستقيماً، وملفًّا موصولاً بغلفانوميتر. عند تحريك المغناطيس نحو الملف، ينحرف مؤشر الغلفانوميتر في اتجاه معين، دالاً على سريان تيار كهربائي في الملف كما يبيّن الشكل (36/أ). وعند إبعاد المغناطيس عن الملف، ينحرف مؤشر الغلفانوميتر في اتجاه معاكس، دالاً على سريان تيار كهربائي في الملف باتجاه معاكس للحالة السابقة كما يبيّن الشكل (36/ب)، ويمكن الحصول على النتائج نفسها عند ثبيت المغناطيس وتحريك الملف.

هذه التجربة واحدة من تجاريَّاتُهُ العالَّمان جوزيف هنري ومايكل فارادي عام (1831م) بشكل مستقل، توصلَّاً عَبْرَهَا أَنَّهُ يمكن توليد قوة دافعة كهربائية وتيار كهربائي في دارة باستخدام المجال المغناطيسي.

تسمى هذه العملية الحث الكهرومغناطيسي، وتسمى القوة الدافعة المترددة في الملف القوة الدافعة الكهربائية الحثية، ويسمى التيار الكهربائي المترددة في هذه الحالة **التيار الكهربائي الحثي** **Induced current**. ولتعرُّف طرائق توليد تيار كهربائي حثي، أُنْقَذ التجربة الآتية:



(أ) : يتولَّد تيار كهربائي حثي في الملف في أثناء حركة المغناطيس مُقترباً من الملف.  
(ب) : يتولَّد تيار كهربائي حثي في الملف في أثناء حركة المغناطيس مُبعِداً عن الملف، ويكون اتجاه التيار مُعاكساً للحالة (أ).

الشكل (36) : توليد تيار كهربائي حثي في ملف.

#### الفكرة الرئيسية:

يرتبط تولَّد قوة دافعة كهربائية حثية وتيار كهربائي حثي في دارة مغلقة بتغيير التدفق المغناطيسي الذي يخترقها، يُحسب مقدار القوة الدافعة الكهربائية بقانون فارادي، ويُحدَّد اتجاه التيار بقانون لنز.

#### نتائجُ التعلم:

- أستكشف طرائق توليد قوة دافعة كهربائية حثية في دارة كهربائية باستخدام مجال مغناطيسي.
- أُوْظِف قانون فارادي في حساب مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثية في دارة كهربائية.
- أحسب القوة الدافعة الحثية المترددة في موصل مستقيم متحرك في مجال مغناطيسي عموديًّا عليه.
- أستخدم قانون لنز في الحث، مُحدَّداً اتجاه التيار الحثي في دارة كهربائية.
- أتوصل إلى علاقة رياضية تحدد العوامل التي يعتمد عليها معامل الحث الذاتي لملف لوليبي.

#### المفاهيم والمصطلحات:

القوة الدافعة الكهربائية الحثية

Induced Electromotive Force

قانون فارادي في الحث

Faraday's Law of Induction

Lenz's Law

قانون لنز

Self Induction

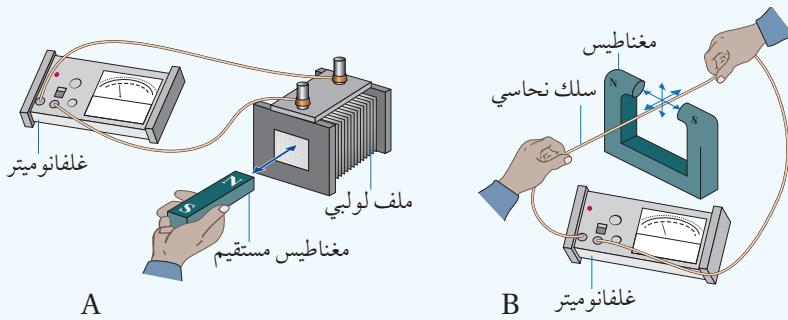
الحث الذاتي

معامل الحث الذاتي

Coefficient of Self Induction

#### طائق توليد تيار كهربائي حتى

**المواد والأدوات:** سلك نحاسي طوله (30 cm)، مغناطيس على شكل حرف C، ملفّ لوليبي، مغناطيس مستقيم، أسلاك توصيل.



**إرشادات السلامة:** الحذر من طرفي السلك الحادين، ومن سقوط الأدوات على أرضية المختبر.

#### خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أنفذ الخطوات الآتية:

1. أصل طرفي الملف بالغلفانوميتر، كما في الشكل (A).
2. **اللحوظ:** أحرّك القطب الشمالي للمغناطيس نحو طرف الملف، وأضعه داخل الملف، ثم أحرّكه مبتعداً عن الملف، وألاحظ قراءة الغلفانوميتر وجهاً انحراف مؤشره في كل حالة، وأدون ملاحظاتي.
3. أكرّر الخطوة السابقة، بتحريك القطب الجنوبي للمغناطيس بدلاً من القطب الشمالي، وأدون ملاحظاتي.
4. أصل طرفي السلك بطرف الغلفانوميتر، وأمسك بجزء من السلك مشدوداً بين قطبي المغناطيس دون تحريكه، كما في الشكل (B).
5. **اللحوظ:** أحرّك السلك المشدود بين قطبي المغناطيس في كل اتجاه من الاتجاهات الستة الموضحة في الشكل، وألاحظ قراءة الغلفانوميتر وجهاً انحراف مؤشره في كل حالة، وأدون ملاحظاتي.

#### التحليل والاستنتاج:

1. **استنتاج:** استناداً إلى ملاحظاتي في الخطوتين 2 ، 1، متى يتولّد تيار كهربائي في الملف؟ وهل يعتمد اتجاهه على اتجاه حركة المغناطيس؟ أفسّر إجابتي.
2. **استنتاج:** في أي الحالات يتولّد تيار كهربائي في السلك عند تحريكه بين قطبي المغناطيس؟ وفي أيها لم يتولّد تيار كهربائي؟ ماذا أستنتج؟
3. **أتوقع:** هل يتولّد تيار كهربائي إذا ثبّت السلك أو الملف، وحرّكت المغناطيس؟

## القوة الدافعة الكهربائية الحثية Induced Electromotive Force

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

عند اقتراب المغناطيس من الملف، يزداد عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق الملف، وفي أثناء ابعاده، يقل عدد الخطوط التي تخترق الملف. ولما كان التدفق عبر الملف يتاسب طردياً مع عدد الخطوط التي تخترق مساحة الملف، فهذا يعني أن تولد القوة الدافعة الحثية والتيار الحثي مرتبطة بالتغيير في التدفق المغناطيسي الذي يخترق الملف.

يُعرف التدفق المغناطيسي بطريقة مماثلة لتلك المستخدمة في تعريف التدفق الكهربائي، حيث يمكن التعبير عن التدفق المغناطيسي ( $\Phi_B$ ) رياضياً بأنه ناتج الضرب القياسي لمتجه المجال المغناطيسي ( $B$ ) ومتوجه المساحة ( $A$ )، ويعبر عن مقداره بالعلاقة الآتية:

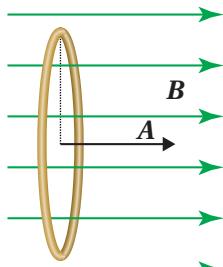
$$\Phi_B = B A \cos \theta$$

حيث ( $\theta$ ) الزاوية بين متجهي المجال والمساحة، لاحظ الشكل (37). ويقاس التدفق المغناطيسي بوحدة ( $T \cdot m^2$ ) وتسمى الوير (Wb) بحسب النظام الدولي للوحدات.

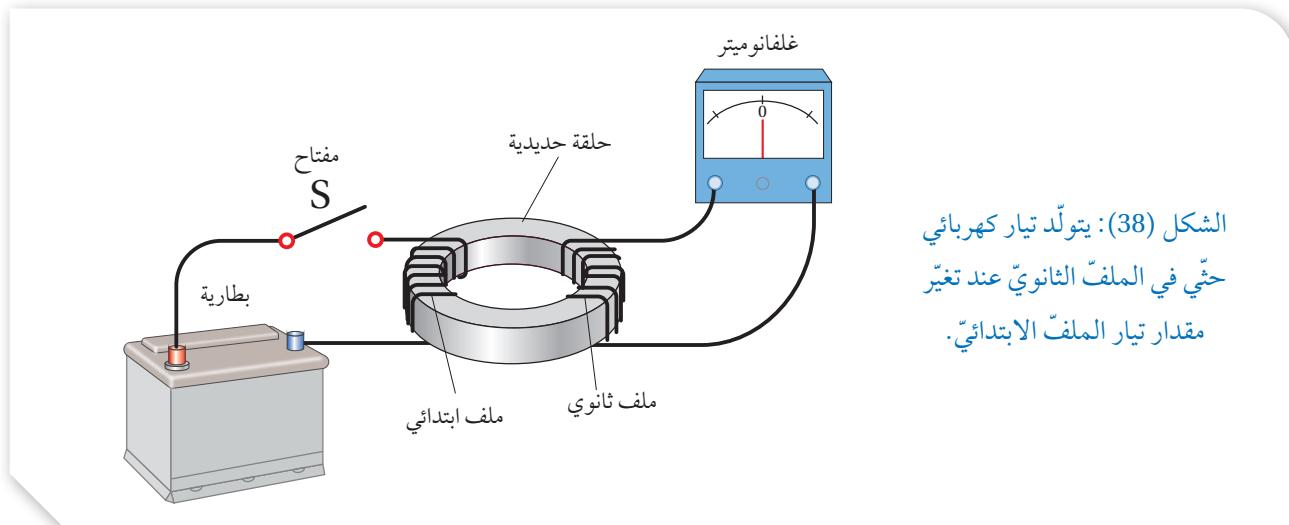
كذلك يمكن توليد قوة دافعة حثية في سلك موصل عند تحريكه إلى الأعلى وإلى الأسفل داخل مجال مغناطيسي، كما في الجزء الثاني من التجربة. إن حركة الموصل بهذه الطريقة تؤدي إلى تغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق الدارة التي يُعد السلك جزءاً منها.

أستنتج أن القوة الدافعة الحثية تتولد عند تغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق الدارة؛ وهذا التغير يمكن أن ينبع عن التغير في مقدار المجال المغناطيسي، أو المساحة التي يخترقها المجال المغناطيسي، أو الزاوية المحسوبة بين اتجاهي المجال المغناطيسي والمساحة.

**تحقق:** ما طرائق توليد قوة دافعة كهربائية حثية في ملف من سلك موصل؟ ✓



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

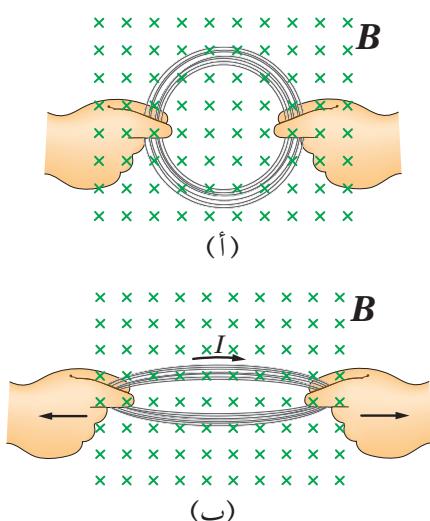


الشكل (38): يتولّد تيار كهربائي حّي في الملف الثانوي عند تغيير مقدار تيار الملف الابتدائي.

يمكن أيضاً توليد قوة دافعة حّية وتيار حّي بتنفيذ تجربة مماثلة لتجربة العالم فارادي الموضحة في الشكل (38). في هذه التجربة استُخدم ملفان ملفوفان حول حلقة حديدية، الملف الابتدائي يتصل بطارية 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 مولداً مجالاً مغناطيسياً، هذا المجال يتنتقل إلى الملف الثانوي، فيزداد التدفق المغناطيسي الذي يخترقه، فيتولّد فيه قوة دافعة حّية وتياراً حّيّاً.

- أفخر:** في الشكل (38)، أفسر ما يأتي:
- ينحرف مؤشر الغلفانوميتر لحظة فتح المفتاح، لكن انحراف المؤشر يكون باتجاه معاكس لانحرافه عند إغلاق المفتاح.
  - لا ينحرف مؤشر الغلفانوميتر عند ثبات التيار المار في الملف الابتدائي.

## المثال 14



الشكل (39):

- تحريك الملف مع بقائه داخل منطقة المجال.
- إنقاص مساحة الملف.

يوضّح الشكل (39/أ) ملفاً دائرياً موضوع في مجال مغناطيسيًّا منتظم عموديًّا على سطح الملف. هل يتولّد تيار كهربائي حّيّ:

- عند تحريك الملف نحو اليسار أو نحو اليمين مع بقائه داخل منطقة المجال كما في الشكل (39/أ)؟
  - في أثناء تغيير شكل الملف بحيث تقل مساحته كما في الشكل (39/ب)؟
- المعطيات: الشكل (39).

المطلوب: تفسير تولّد تيار كهربائي حّيّ.

**الحل:**

- لا يتولّد تيار كهربائي حّيّ عند تحريك الملف داخل المجال نحو اليسار أو اليمين بسبب ثبات التدفق المغناطيسي.
- عند شد الملف يتغيّر شكله بحيث تقل مساحة سطحة، فيقلّ التدفق المغناطيسي الذي يخترقه، ما يؤدّي إلى تولّد قوة دافعة كهربائية حّية، وتيار كهربائي حّيّ.

## قانون فارادي في الحث

توصل العالم فارادي اعتماداً على الاستقصاءات السابقة إلى قانون سُمي قانون فارادي في الحث الذي ينص على أنَّ:

«القوة الدافعة الكهربائية الحثّية المتولدة في دارة كهربائية تتناسب طردياً مع المعدل الزمني لتغيير التدفق المغناطيسي الذي يخترقها». ويُعبّر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\hat{\mathcal{E}} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt} (BA \cos \theta)$$

وعندما يحدث تغيير في التدفق ( $\Delta\Phi$ ) الذي يخترق دارة مكونة من (N) لفة في مدة زمنية ( $\Delta t$ ), فإنَّه يُمكن كتابة قانون فارادي في الحث على النحو الآتي لحساب القوة الدافعة الكهربائية الحثّية المتوسطة:

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

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

$$I = \frac{|\mathcal{E}|}{R}$$

### المثال 15

ملف دائري عدد لفاته (100) لفة، ومساحة مقطعيه العرضي ( $1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ), موضوع في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (1.0 T). بداية، مستوى الملف موازٍ لخطوط المجال المغناطيسي، ثم دار الملف بزاوية مقدارها (90°) حول محور يمر بمركزه بحيث أصبح مستواه عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي خلال (0.50 s). أحسب ما يأتي:

- التغيير في التدفق المغناطيسي عبر مقطع الملف.
- القوة الدافعة الكهربائية الحثّية المتوسطة المتولدة في الملف.
- التيار الكهربائي الحثّي المتوسط المار في الملف، إذا علمت أنَّ المقاومة الكهربائية للملف (4.0 Ω).

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

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

أ. يُحسب التغّير في التدفق 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 الحثّيّة المتوسطة المتولّدة في الملف على النحو الآتي:

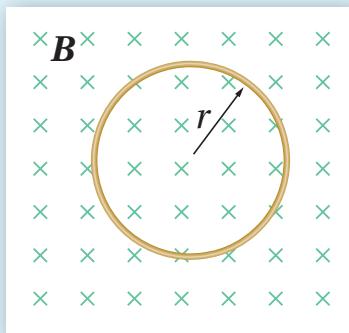
$$\bar{\varepsilon} = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -100 \times \frac{1.2 \times 10^{-4}}{0.50}$$

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

ج. يُحسب التيار الكهربائيّ الحثّيّ المتوسط المارّ في الملف على النحو الآتي:

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

### لندري



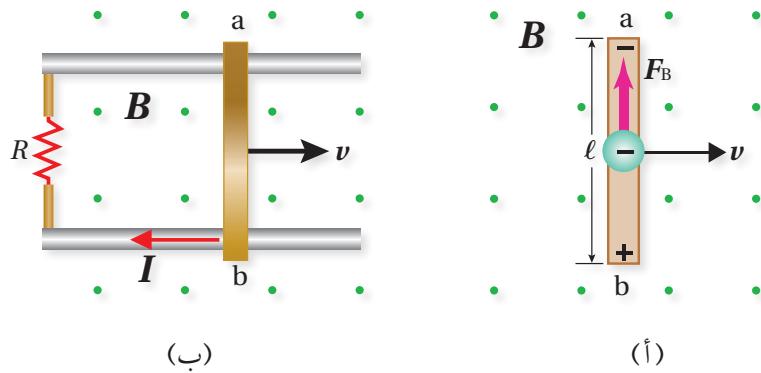
الشكل (40): ملف دائريّ موضوع في مجال مغناطيسيّ منتظم.

**أستخدام الأرقام:** ملف دائري عدد لفّاته (20) لفة، ومتّوسط نصف قطر اللفة الواحدة (1.0 cm) موضوع في مجال مغناطيسيّ منتظم مقداره (120 mT)، كما في الشكل (40). سُحب الملفُ خارج المجال المغناطيسيّ خلال زمن (0.20 s)، أحسبُ القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتوسطة المتولّدة في الملف.

الشكل (41):

- (أ) في أثناء قطع موصل خطوط مجال مغناطيسي يتولد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حية.

- (ب) ويسري فيه تيار كهربائي حيّ عندما يصبح جزءاً من دارة كهربائية مغلقة.



(ب)

(أ)

### القوة الدافعة الكهربائية الحية في موصل متحرك Motional EMF

يوضح الشكل (أ/41) موصلًا يتحرك باتجاه محور ( $+x$ ) بسرعة ثابتة عموديًّا على طوله، وعلى اتجاه مجال مغناطيسي منتظم (باتجاه محور  $+z$ ). تتحرك الإلكترونات الحرة في الموصل معه باتجاه محور ( $+x$ ) قاطعة خطوط المجال المغناطيسي باتجاه عموديٍّ عليه. فتتأثر الإلكترونات بقوة مغناطيسيّة باتجاه محور ( $+y$ ) بحسب قاعدة اليد اليمنى. ونتيجة لذلك تجمّع شحنات سالبة عند طرف السلك (a)، تاركةً خلفها شحنات موجبة عند الطرف (b)، فيصبح جهد الطرف (b) أكبر من جهد الطرف (a)، أيًّا يتولّد فرق في الجهد الكهربائي بين طرفيه، يُسمّى القوة الدافعة الكهربائية الحية ( $\mathcal{E}$ ). Induced electromotive force

الحيّة المتولّدة في هذا الموصل بالعلاقة الآتية:

$$\mathcal{E} = Blv$$

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

وعندما يكون الموصل جزءاً من دارة كهربائية مغلقة، كما في الشكل (41/ب)، فإنه يسري فيها تيار كهربائي حيّ، إذ يعمل الموصل عمل بطارية قطبهما الموجب عند الطرف (b). ويستمر سريان التيار الكهربائي في الدارة الكهربائية ما دام الموصل متحركاً.

✓ **أتحقق:** علام يعتمد مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحية المتولّدة بين طرفي موصل يتحرك عموديًّا على طوله وعلى اتجاه المجال المغناطيسي؟

يتقابل القطبان الشمالي N والجنوبي S لمغناطيسين، طول كلّ منهما ( $\ell = 20.0 \text{ cm}$ )، وارتفاع كلّ منهما ( $h = 6.00 \text{ cm}$ )، بينهما مجال مغناطيسي منتظم مقداره ( $54.0 \text{ mT}$ ). أتمّل الشكل (42/أ). حرك سلك مشدودًّا موصولًّا بملي أميتر من الطرف السفلي للمغناطيسين إلى الطرف العلوي عموديًّا على اتجاه خطوط المجال المغناطيسي بسرعة ثابتة خلال مدة زمنية مقدارها (0.200 s)، كما في الشكل (42/ب). أحسب ما يأتي:

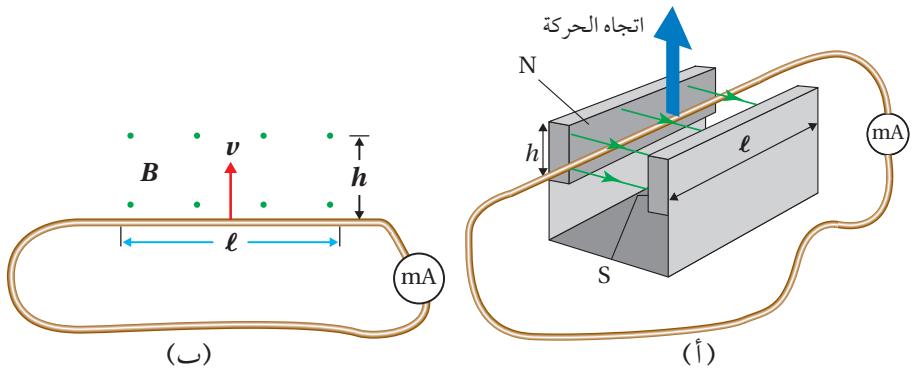
أ. القوة الدافعة الكهربائية الحثّية المترولدة في السلك.

ب. التيار الكهربائي الحثّي المارّ في الملي أميتر إذا علمت أنّ المقاومة الكهربائية للدارة ( $2.0 \Omega$ ).

الشكل (42):

(أ) تحريك سلك عموديًّا على اتجاه خطوط المجال المغناطيسي 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:  $\hat{\varepsilon} = ?$ ,  $I = ?$

الحلّ:

أ. طول السلك داخل المجال المغناطيسي يساوي طول أيٍّ من قطبي المغناطيس. تُحسب القوة الدافعة الكهربائية

الحثّية المترولدة فيه على النحو الآتي ، علماً بأنّ ( $v = \frac{\Delta y}{\Delta t}$ ), و

$$\hat{\varepsilon} = B\ell v$$

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

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

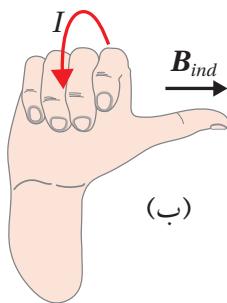
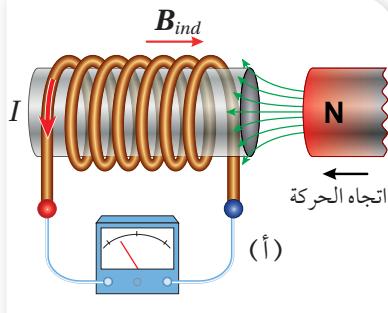
$$= 3.24 \times 10^{-3} \text{ V}$$

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

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

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

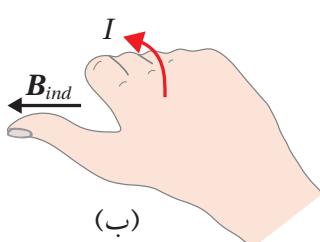
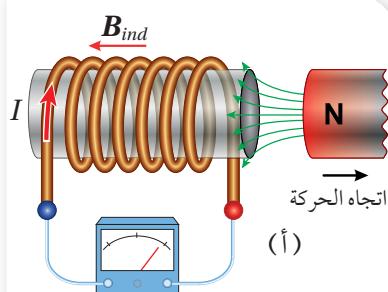
## قانون لنز Lenz's Law



الشكل (43):

(أ) تقرّب القطب الشمالي لمغناطيس من أحد طرفي ملف.

(ب) استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه التيار الكهربائي الحيّ في الملف.



الشكل (44):

(أ) إبعاد القطب الشمالي لمغناطيس عن أحد طرفي ملف.

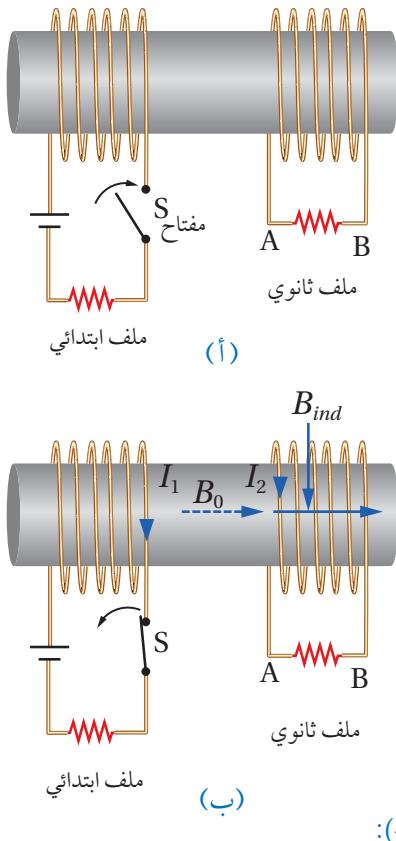
(ب) استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه التيار الكهربائي الحيّ في الملف.

لاحظت في طرائق توليد القوة الدافعة الكهربائية الحية والتيار الكهربائي الحيّ أنّ مؤشر الغلفانوميتر أو الأميتر ينحرف باتجاه معين عند تقرّب أحد قطبي مغناطيس من ملف، وأنّ اتجاه الانحراف ينعكس عند إبعاد القطب نفسه عن الملف. فما دلالة هذه المشاهدات؟ وكيف أُحدّد اتجاه التيار الكهربائي الحيّ المولّد؟

فسّر العالم الروسي لنز هذه المشاهدات من قانون أصبح يُعرف باسم **قانون لنز Lenz's law** الذي ينصّ على: "يكون اتجاه التيار الحيّ المولّد في دارة مغلقة بحيث يولّد مجالاً مغناطيسياً يقاوم التغيير في التدفق المغناطيسي المسبب له".

لتحديد اتجاه التيار الكهربائي الحيّ المولّد، أتأمل الشكل (43/أ) الذي يوضح تقرّب القطب الشمالي لمغناطيس من أحد طرفي ملف. ونتيجة لذلك يزداد التدفق المغناطيسي الذي يخترق الملف، فتولّد قوة دافعة كهربائية حية بين طرفيه، تؤدي إلى مرور تيار كهربائي حيّ في الاتجاه الذي يولّد مجالاً مغناطيسياً يقاوم الزيادة في التدفق المغناطيسي. وهذا يعني أنّ طرف الملف القريب من المغناطيس يصبح قطباً مغناطيسياً شمالياً، فيتّافر مع القطب الشمالي للمغناطيس. ولتحديد اتجاه التيار، تستخدم قاعدة اليد اليمنى، كما في الشكل (43/ب) حيث يُشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي الناتج من الملف ( $B_{ind}$ )، في حين يُشير اتجاه انحصار بقية الأصابع إلى اتجاه التيار الكهربائي الحيّ في لفّات الملف. أمّا عند إبعاد القطب الشمالي للمغناطيس عن طرف الملف الموضح في الشكل (44/أ) يقلّ التدفق المغناطيسي الذي يخترقه، فتولّد قوة دافعة كهربائية حية بين طرفيه تؤدي إلى مرور تيار كهربائي حيّ في الاتجاه الذي يولّد مجالاً مغناطيسياً يقاوم النقصان في التدفق المغناطيسي، فيصبح طرف الملف القريب من المغناطيس قطباً جنوبياً، فتنشأ قوة تجاذب بين القطبين تقاوم ابعاد القطب الشمالي عن الملف. ويُحدد اتجاه التيار الكهربائي الحيّ المولّد باستخدام قاعدة اليد اليمنى كما في الشكل (44/ب).

**أتحقق:** كيف أُحدّد اتجاه التيار الحيّ المولّد في الملف المبيّن في الشكل (43)، عند تقرّب القطب الجنوبي لمغناطيس بدلًا من القطب الشمالي؟



لُف ملقطان عدد لفات كُلّ منها (100) لفة، ومساحة المقطع العرضي لكلّ منها ( $3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ )، على قلب حديدي كما في الشكل (أ).  
 عند إغلاق مفتاح دارة الملف الابتدائي يتولّد مجال مغناطيسي داخليه مقداره ( $B_0 = 180 \text{ mT}$ ) ينتقل عبر القلب الحديدي، كما في الشكل (أ)، وعند فتح الدارة الكهربائية يتلاشى هذا المجال المغناطيسي خلال ( $0.10 \text{ s}$ ). أُجبِع عَمَّا يَأْتِي:

- أ. أحسب القوة الدافعة الكهربائية الحثّية المتوسطة المتولدة في الملف الثانوي لحظة فتح المفتاح  $S$ .
- ب. أُحدّد اتجاه سريان التيار الكهربائي الحثّي في المقاومة الكهربائية في الملف الثانوي لحظة فتح المفتاح  $S$ .

المُعْطَيات:

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

المطلوب:  $\vec{e} = ?$

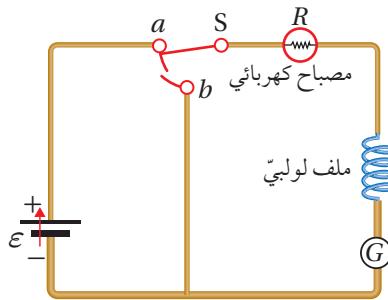
الحلّ:

أ. التغيير في التدفق المغناطيسي ناتج من تغيير مقدار المجال المغناطيسي الذي يخترق حلقات الملف الثانوي، وتحسب القوة الدافعة الكهربائية الحثّية المتوسطة المتولدة في الملف على النحو الآتي:

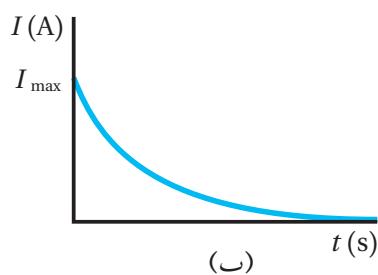
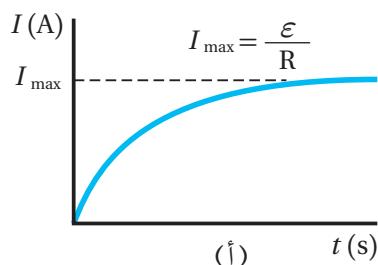
$$\vec{e} = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} = -N \left( \frac{\Phi_{B,f} - \Phi_{B,i}}{\Delta t} \right) \\ = -N \left( \frac{B_f A \cos 0.0^\circ - B_i A \cos 0.0^\circ}{\Delta t} \right) = -NA \left( \frac{B_f - B_i}{\Delta t} \right) \\ = -100 \times 3.0 \times 10^{-4} \times \left( \frac{0 - 180 \times 10^{-3}}{0.10} \right) = 5.4 \times 10^{-2} \text{ V}$$

ب. المجال المغناطيسي الناتج عن الملف الابتدائي يكون نحو اليمين وينتقل عبر القلب الحديدي، وعند فتح دارة الملف الابتدائي، يقل التدفق المغناطيسي الذي يخترق الملف الثانوي، فتتولّد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حثّية تؤدي إلى مرور تيار كهربائي حثّي في الملف في الاتجاه الذي يجعله يقاوم النقص في التدفق المغناطيسي؛ أي يكون المجال المغناطيسي الحثّي باتجاه المجال المغناطيسي نفسه. وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى نجد أن اتجاه التيار الكهربائي الحثّي المار في المقاومة يكون من  $B$  إلى  $A$  عبر المقاومة.

## الحث الذاتي Self Induction



الشكل (46): تزداد إضاءة المصباح تدريجياً عند وصل المفتاح S بالنقطة (a)، وتلاشى إضاءة المصباح تدريجياً عند وصل المفتاح S بالنقطة (b).



الشكل (47):

(أ) نموّ التيار الكهربائي في دارة تحوي محثاً ومصباحاً لحظة توصيل المفتاح S بالنقطة (a).

(ب) تلاشى التيار الكهربائي لحظة توصيل المفتاح S بالنقطة (b) في الدارة نفسها.

**أفخر:** في الشكل (47/ب)، لماذا يتلاشى التيار الكهربائي تدريجياً ولا يصل مقداره إلى الصفر مباشرةً؟ أناقش أفراد مجموعتي، للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

يوضح الشكل (46) دارة كهربائية تحوي بطارية ومقاومة (مصباح مثلاً) وملفاً لولبياً وغلفانوميتر ومفتاح (S). عند إغلاق المفتاح (S) بوصيله بالنقطة (a) تزداد شدة إضاءة المصباح تدريجياً حتى تثبت، ما يعني أنّ التيار لا يصل إلى قيمته العظمى لحظياً، بل ينمو تدريجياً من الصفر إلى قيمته العظمى، كما في الشكل (47/أ).

أفسر ما سبق بأنّ وجود الملف اللولبي قد أعاد نموّ التيار الكهربائي الناتج من البطارية. فعند إغلاق المفتاح (S) يسري التيار الكهربائي في الدارة الكهربائية، فيتولّد مجال مغناطيسي في الملف اللولبي، ويزداد التدفق المغناطيسي الذي يخترقه. وبحسب قانون لذر، ينشأ فيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية (Self-induced electromotive force) تعاكس القوة الدافعة الكهربائية (ε) للبطارية، ما يؤدي إلى نموّ التيار الكهربائي إلى قيمته العظمى تدريجياً وليس لحظياً. يُسمى الملف اللولبي محثاً **Inductor**، أمّا هذا التأثير، فيُسمى **الحث الذاتي Self induction**، ويُعرف بأنه تولّد قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في دارة كهربائية مغلقة نتيجة تغيير التدفق المغناطيسي بسبب تغيير مقدار تيار الدارة نفسها.

ويوضح الشكل (47/ب) أنّ التيار الكهربائي يتلاشى تدريجياً لحظة توصيل المفتاح (S) بالنقطة (b) في الدارة الكهربائية الموضحة في الشكل (19)، حيث لا يصل مقداره إلى الصفر مباشرةً. وألاحظ أنّ البطارية في هذه الحالة لم تعد جزءاً من الدارة الكهربائية.

تُحسب القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولّدة في الممحّ باستخدamation فارادي على النحو الآتي:

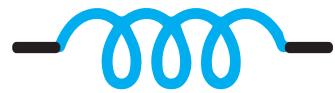
$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

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

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

حيث (L) ثابت التنااسب، ويُسمى **معامل الحث الذاتي Coefficient of self induction** للممحّ أو محاثة **Inductance** الممحّ اختصاراً، ويُعرف بأنه نسبة القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولّدة بين طرفي محث إلى المعدل الزمني للتغير في

مقدار التيار الكهربائي المار فيه، وهو مقياس لممانعة المحت للتغير في مقدار التيار الكهربائي المار فيه، ووحدة قياسه هي (V.S/A)، وتسمى هنري (H) بحسب النظام الدولي للوحدات، وذلك تكريماً لجهود العالم جوزيف هنري في مجال الحث الكهرومغناطيسي. وأُعرف وحدة الهنري (H) بأنها محاة محت تولّد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حية ذاتية مقدارها (1 V)، عندما يكون المعدل الزمني للتغير في مقدار التيار الكهربائي المار فيه (1 A/s). ويوضح الشكل (48) رمز المحت في الدارات الكهربائية.



الشكل (48): رمز المحت في الدارات الكهربائية.

### محاة ملف لولي Inductance of a Solenoid

يبين الشكل (49) محت طوله ( $\ell$ )، ومساحة مقطعه العرضي ( $A$ )، وعدد لفاته ( $N$ ) في دارة كهربائية. لحظة غلق المفتاح يتزايد مقدار التيار الكهربائي المار في الدارة تدريجياً من الصفر إلى ( $I$ ) خلال مدة زمنية ( $\Delta t$ )، ويتجاوز مقدار التدفق المغناطيسي الذي يخترق المحت من الصفر إلى ( $\Phi_B$ ) خلال المدة الزمنية ( $\Delta t$ ) نفسها. فيتولّد بين طرفي المحت قوة دافعة كهربائية حية ذاتية، يُعبر عن مقدارها المتوسط بالعلاقة الآتية:

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

وُعبر أيضاً عن مقدارها المتوسط بالعلاقة الآتية:

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

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

$$LI = N\Phi_B$$

ولما كانت خطوط المجال المغناطيسي داخل المحت عمودية على مساحة مقطعه العرضي، فإن التدفق المغناطيسي الذي يخترقه يساوي ( $\Phi_B = BA$ ). وبالتعويض عن مقدار المجال المغناطيسي داخل المحت بالعلاقة

$$(B = \frac{\mu I N}{\ell}), \text{ يمكن كتابة العلاقة السابقة على النحو الآتي:}$$

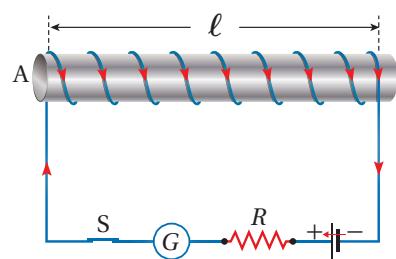
$$LI = NBA = NA \times \frac{\mu I N}{\ell}$$

بإعادة ترتيب العلاقة، فإن محاة المحت يُعبر عنها بالعلاقة الآتية:

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

توضح هذه العلاقة أن معامل الحث الذاتي ثابت للمحت نفسه، وهو يعتمد على أبعاد الملف الهندسية المتمثلة في طول المحت ( $\ell$ )، ومساحة مقطعه العرضي ( $A$ )، وعدد لفاته ( $N$ )، والنفاذية المغناطيسية لمادة قلب المحت ( $\mu$ ). وإذا كان قلب المحت هواءً تُعرض النفاذية المغناطيسية للهواء ( $\mu_0$ ).

أتحقق: ما المقصود بمعامل الحث الذاتي لمحت؟ وما وحدة قياسه؟



الشكل (49): محت في دارة كهربائية.

أتحقق: ما العوامل التي يعتمد عليها معامل الحث الذاتي لمحت لولي؟

إذا علمت أن طول المagnet الموضع في الشكل (22) يساوي (20 cm)، ومساحة مقطعه العرضي  $(2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2)$ ، وعدد لفاته (200) لفة، والمagnet ملفوف حول أنبوب كرتوني يملؤه الهواء، ويسري فيه تيار كهربائي (5.0 A)، أحسب ما يأتي:

أ. معامل الحث الذاتي للمagnet.

ب. التدفق المغناطيسي الذي يخترق المagnet.

ج. القوة الدافعة الكهربائية الحية الذاتية المتوسطة المتولدة في المagnet إذا عكست اتجاه التيار الكهربائي المار فيه خلال (0.10 s).

المعطيات:  $N = 200$  turns,  $\ell = 20 \times 10^{-2} \text{ m}$ ,  $A = 2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ,  $I = 5.0 \text{ A}$ ,  $\Delta t = 0.10 \text{ s}$ ,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ .

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

الحل:

أ. يحسب معامل الحث من العلاقة الآتية:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times (200)^2 \times 2.5 \times 10^{-5}}{20 \times 10^{-2}}$$

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

ب. يحسب التدفق المغناطيسي باستخدام العلاقة الآتية:

$$LI = N\Phi_B$$

أُعيد ترتيبها بجعل  $(\Phi_B)$  موضوع القانون على النحو الآتي:

$$\Phi_B = \frac{LI}{N}$$

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

ج. تحسب القوة الدافعة الكهربائية الحية الذاتية المتوسطة المتولدة في المagnet.

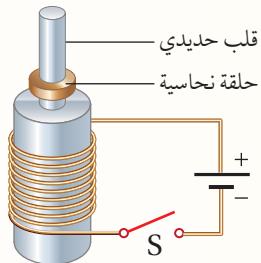
$$\vec{\varepsilon}_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -6.3 \times 10^{-6} \times \frac{(-5.0 - 5.0)}{0.10}$$

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

# مراجعة الدرس

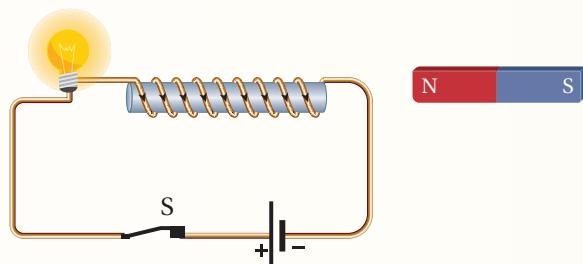
1. الفكرة الرئيسية: كيف أحسب القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في ملف؟ وكيف أحدد اتجاه التيار الكهربائي الحثي المار فيه؟

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



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

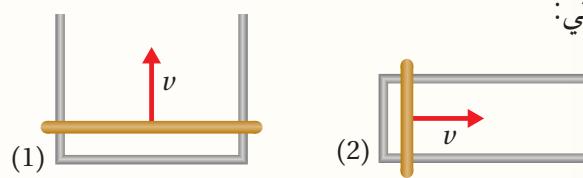
4. **أتوقع:** يوضح الشكل المجاور دارة كهربائية مغلقة. أتوقع ما يحدث لإضاءة المصباح في أثناء:



أ. تقرّب القطب الشمالي للمغناطيس من المحتّ.

ب. تقرّب القطب الجنوبي للمغناطيس من المحتّ.

5. **أستنتج:** يبيّن الشكل المجاور دارتين موضوعتين في مجال مغناطيسي منتظم مقداره ( $B$ )، الموصّل 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. أجيّب عمّا يأتي:



أ. اتجاه المجال المغناطيسي ( $B$ )؟

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

ج. هل يكون مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثّية المتولّدة في الدارة (1)، أكبر أم أقل أم مساوٍ لمقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثّية المتولّدة في الدارة (2)؟ أفسّر إجابتي.

6. **استخدم الأرقام:** محتّ معامل حثّه الذاتيّ ( $4.0 \times 10^{-4} \text{ H}$ ، موصول بدارة كهربائية. إذا تغيّر مقدار التيار الكهربائيّ المار فيها من (0 A) إلى (8.0 A) خلال (0.10 s)، أحسب القوة الدافعة الكهربائية الحثّية الذاتيّة المتولّدة في المحتّ.

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

1. وحدة قياس معامل الحث الذاتي لمحث بحسب النظام الدولي للوحدات، هي:

د.  $V.s/A$

ج.  $V.A.s$

ب.  $A.s/V$

أ.  $V.A/s$

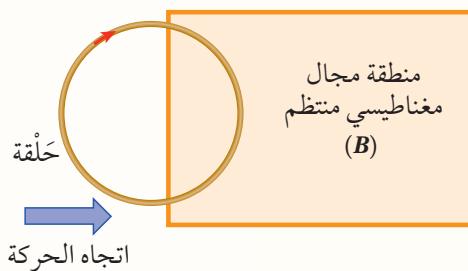
2. ملف مستطيل الشكل يتكون من لفة واحدة ومساحة سطحه ( $A$ )، مغمور في مجال مغناطيسيي ( $B$ )، بحيث تكون الزاوية بين مستوى الملف وخطوط المجال ( $30^\circ$ ). إذا تضاعف مقدار المجال المغناطيسيي خلال مدة زمنية مقدارها ( $\Delta t$ )، فإن التغير في التدفق المغناطيسيي الذي يخترق الملف خلال تلك المدة يساوي:

د.  $2BA \cos 60^\circ$

ج.  $BA \cos 60^\circ$

ب.  $2BA \cos 30^\circ$

أ.  $BA \cos 30^\circ$



3. في أثناء دخول الحلقة المبينة في الشكل إلى منطقة مجال مغناطيسيي منتظم ( $B$ ) يتولد في الحلقة تيار كهربائي حثّي بالاتجاه المبين في الشكل، فيكون المجال المغناطيسيي ( $B$ ) باتجاه محور:

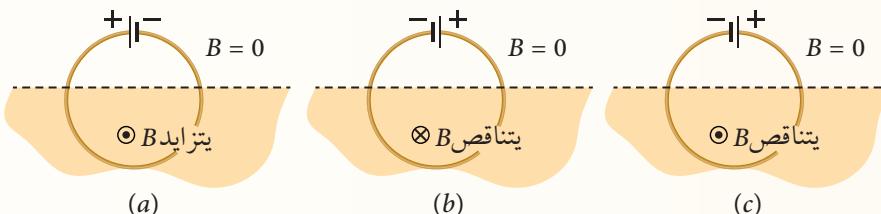
ب.  $-z$

أ.  $+z$

د.  $-x$

ج.  $+x$

4. يبيّن الشكل المجاور حلقة تتصل ببطارئ، ونصفها السفلي موضوع في مجال مغناطيسيي 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 الحثّية المولدة في الحلقة باتجاه القوة الدافعة الكهربائية للبطارئ؟

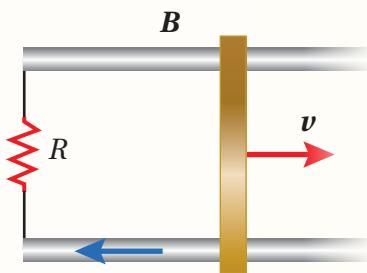


د. (c) و (b)

ج. (a) و (b)

ب. (c) فقط

أ. (b) فقط



5. موصل مستقيم طوله ( $\ell$ ) مغمور داخل مجال مغناطيسيي منتظم. عند سحب الموصل بسرعة ثابتة مقدارها ( $v$ ) على مجرّى فلزّي باتجاه محور ( $+x$ )، يمرّ في المقاومة ( $R$ ) تيار كهربائي حثّي ( $I$ ) بالاتجاه المبين في الشكل. إنّ مقدار المجال المغناطيسيي واتجاهه:

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

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

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

ج.  $\frac{\ell v}{IR}$  باتجاه  $(-z)$

## التصوير باستخدام تقنية الرنين المغناطيسي (MRI)



تسعى المستشفيات في الأردن دائمًا إلى الحصول على أحدث التكنولوجيا الطبية، ومنها أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي.

**التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)** تقنية غير جراحية تتّبع صورًا تشريحيةً واضحةً ثلاثيةً الأبعاد لجسم الإنسان، تساعد في الكشف عن الأمراض وتشخيصها. يتكون جهاز الرنين المغناطيسي من ثلاثة أجزاء رئيسية هي؛ ملفاتٌ مغناطيسية، ومصدر موجات راديو، وجهاز حاسوب.

تحتوي خلايا جسم الإنسان على نسبة كبيرة من الماء الذي يتكون من الأكسجين والهيدروجين، في ذرة الهيدروجين، يدور الإلكترون حول النواة

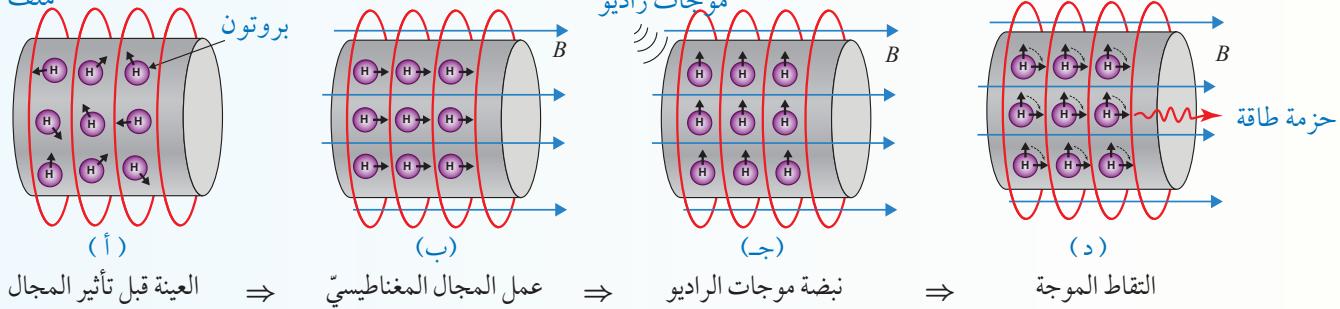
بشكل يشبه دائرة صغيرة جدًا. حركة الإلكترون هذه تشبه مرور تيار كهربائي في سلك دائري، ما يؤدي إلى توليد مجال مغناطيسي صغير داخل الذرة. هذا المجال المغناطيسي يستخدم في التعبير عن مقداره واتجاهه مفهوم العزم الثانقطبي المغناطيسي الممثل بالاتجاهات المبينة في الأشكال (أ) إلى (د).

### خطوات عمل الجهاز:

- تكون اتجاهات العزم المغناطيسي لذرات الهيدروجين موزعة في الاتجاهات كافة كما في الشكل (أ)، وعند تعريض الجسم لمجال مغناطيسي خارجي، تصفُّ العزم المغناطيسي لذرات الهيدروجين في اتجاه المجال المغناطيسي نفسه، وتُصبح في وضع اتزان، الشكل (ب).
- يُطلق مصدر موجات الراديو نبضةً من الموجات تخترق الجسم؛ فتؤدي إلى انحراف العزم المغناطيسي لذرات الهيدروجين بزاوية (90°) عن اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي، الشكل (ج).
- عند توقف نبضة موجات الراديو تبدأ العزم بالعودة للاصطدام باتجاه المجال المغناطيسي الخارجي، ويُتّسّع عن ذلك انبعاث حزمة من الموجات الكهرومغناطيسية تلتقطها مستشعرات التصوير وتحوّلها عن طريق برمجيات محوسبة إلى صورٍ تشريحية، الشكل (د).

تختلف العزم المغناطيسي في زمن عودتها إلى حالة الاتزان (الاصطدام باتجاه المجال المغناطيسي الخارجي)، وفي مقدار طاقة الموجات الكهرومغناطيسية التي تبعها؛ وذلك حسب تركيب النسيج والطبيعة الكيميائية للجزيئات فيه، وبذلك يمكن الأطباء من التفريق بين الأنسجة المختلفة (السليمة والمصابة بمرض معين مثلاً) بناءً على هذه الخصائص المغناطيسية.

### ملف

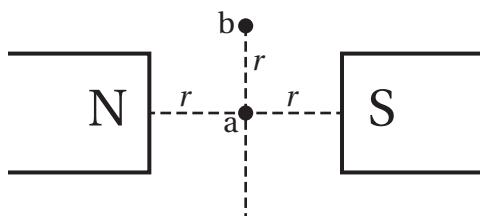


# مراجعة الوحدة

1. أضف دائرةً حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:

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

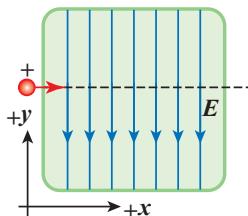
- أ. يتغير اتجاهها بحيث تبقى عمودية على متجهي المجال والسرعة.
- ب. تعمل على تغيير اتجاه السرعة مع بقاء مقدار السرعة ثابت.
- ج. تكسب الشحنة تسارعاً اتجاهه نحو مركز المسار الدائري.
- د. تبذل شغلاً على الشحنة يعمل على زيادة طاقتها الحركية.



2. في الشكل المجاور قطبان مغناطيسيان مختلفان متجاوران، والنقطتان (a,b) تقعان في المجال المغناطيسي للقطبين، فإذا 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 ( $+x$ ).
- ج. a، باتجاه ( $+y$ ).
- د. b، باتجاه ( $+y$ ).

3. يتحرك أيونٌ موجبٌ باتجاه محور ( $+x$ )، داخل غرفة مفرغة فيها مجالٌ كهربائيٌّ باتجاه ( $y-/-$ )، كما في الشكل. في أي اتجاه يجب توليد مجالٍ مغناطيسيٍّ بحيث يمكن أن يؤثر في الجسم بقوةٍ تجعله لا ينحرف عن مساره؟

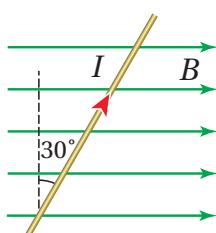


أ. باتجاه محور ( $+y$ )، للأعلى.

ب. باتجاه محور ( $y-/-$ )، للأسفل.

ج. باتجاه محور ( $+z$ )، نحو الناظر.

د. باتجاه محور ( $-z$ )، بعيداً عن الناظر.

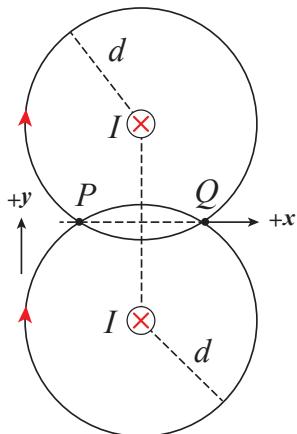


4. موصل مستقيم يحمل تياراً ( $I = 8.0 \text{ A}$ )، وموضعه في مجال مغناطيسي ( $B = 0.20 \text{ T}$ )، كما في الشكل. القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل مقداراً واتجاه:

- أ.  $0.80 \text{ N/m}$ ,  $+z$
- ب.  $0.80 \text{ N/m}$ ,  $-z$
- ج.  $1.39 \text{ N/m}$ ,  $+z$
- د.  $1.39 \text{ N/m}$ ,  $-z$

5. عندما يتحرك جسيمٌ مشحونٌ حركةً دائريّةً في مجالٍ مغناطيسيٍّ منتظمٍ؛ فإن نصف قطر المسار الدائري للجسيم يزداد:

- أ. بزيادة المجال وزيادة الشحنة.
- ب. بزيادة الكتلة ونقص المجال.
- ج. بنقص الكتلة وزيادة السرعة.
- د. بزيادة الكتلة وزيادة المجال.



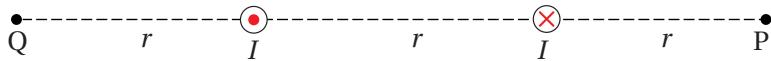
6. سلكان مستقيمان متوازيان لانهائيان الطول؛ يحملان تيارين متساوين وباتجاه ( $-z$ ) داخل الصفحة؛ النقطتان ( $P, Q$ ) تبعدان عن السلكين مسافات متساوية، كما في الشكل. كيف يكون اتجاه المجال المغناطيسي المُحصل عند النقطتين ( $P, Q$ )؟

- أ. عند ( $P$ ) باتجاه ( $+x$ )، وعند ( $Q$ ) باتجاه ( $+y$ ).
- ب. عند ( $P$ ) باتجاه ( $-x$ )، وعند ( $Q$ ) باتجاه ( $-y$ ).
- ج. عند ( $P$ ) باتجاه ( $+x$ )، وعند ( $Q$ ) باتجاه ( $-x$ ).
- د. عند ( $P$ ) باتجاه ( $+y$ )، وعند ( $Q$ ) باتجاه ( $-y$ ).

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

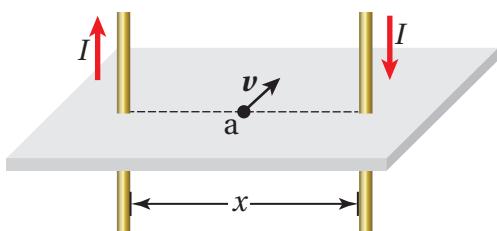
- أ. تبقى القوى المغناطيسية المؤثرة في أضلاع الملف بالاتجاه نفسه، فيواصل دورانه باتجاه واحد.
- ب. تبقى القوى المغناطيسية المؤثرة في أضلاع الملف بالاتجاه نفسه، فيينعكس اتجاه دورانه.
- ج. تتعكس القوى المغناطيسية المؤثرة في أضلاع الملف، فيواصل دورانه باتجاه واحد.
- د. تتعكس القوى المغناطيسية المؤثرة في أضلاع الملف، فيينعكس اتجاه دورانه.

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



- ب. ( $B_Q = B_P$ ) ، وباتجاهين متعاكسين.
- د. ( $B_Q \neq B_P$ ) ، وباتجاهين متعاكسين.
- أ. ( $B_P = B_Q$ ) ، وبالاتجاه نفسه.
- ج. ( $B_P \neq B_Q$ ) ، وبالاتجاه نفسه.

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



9. المجال المغناطيسي المُحصل عند النقطة (a):

- ب.  $\frac{\mu_0 I}{\pi x}$
- د. صفر
- أ.  $\frac{\mu_0 I}{2\pi x}$
- ج.  $\frac{2\mu_0 I}{\pi x}$

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

- د. صفر
- ج.  $\frac{2\mu_0 I q v}{\pi x}$
- ب.  $\frac{\mu_0 I q v}{\pi x}$
- أ.  $\frac{\mu_0 I q v}{2\pi x}$

11. ملف لوبي طوله ( $l$ ) ويمر فيه تيار كهربائي ( $I$ )، ومقدار المجال المغناطيسي المترولد 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:

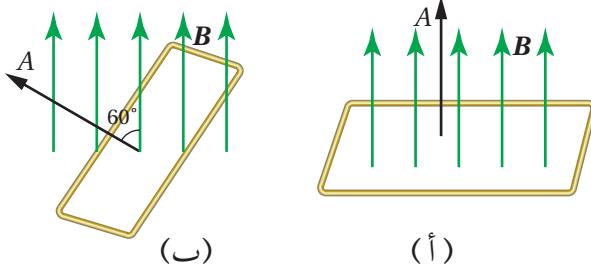
د.  $2B$

ج.  $B$

ب.  $0.5B$

أ.  $0.25B$

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

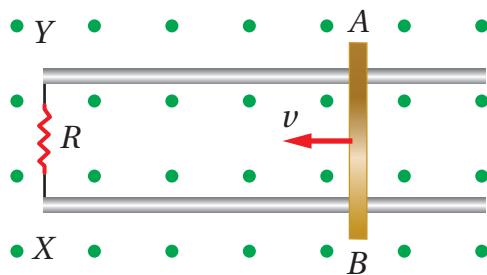


ب.  $-0.25$

أ.  $0.25$

د.  $-0.05$

ج.  $0.05$



\* موصل مستقيم (AB) يتحرك على مجرى فلزي بسرعة ثابتة ( $v$ ) باتجاه محور ( $x$ ) عموديا على مجال مغناطيسي منتظم. معتمدا على الشكل أجب عن الفقرتين الآتتين:

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

ب. سالبة، من (X) إلى (Y).

أ. موجبة، من (X) إلى (Y).

د. سالبة، من (Y) إلى (X).

ج. موجبة، من (Y) إلى (X).

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

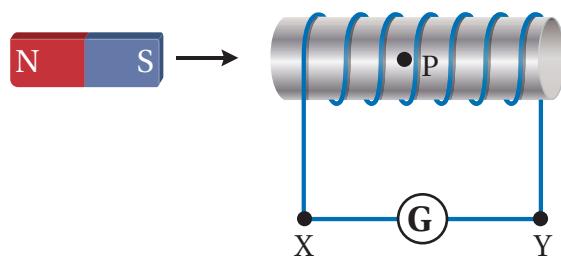
د.  $4I$

ج.  $2I$

ب.  $I$

أ.  $0.5I$

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



التيار الحيي عند (P)	المجال الحيي عند (P)	
يمين	من (X) إلى (Y)	أ
يسار	من (X) إلى (Y)	ب
يمين	من (Y) إلى (X)	ج
يسار	من (Y) إلى (X)	د

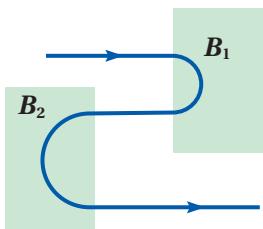
## مراجعة الوحدة

16. متح محااته ( $L$ ) و مقاومته ( $R$ ) ، يتصلان على التوالي مع بطارية قوتها الدافعة الكهربائية ( $\varepsilon$ ). عند غلق الدارة ينمو التيار الكهربائي مع الزمن حتى يصل إلى قيمته العظمى ( $I_{max}$ ). القيمة العظمى للتيار تعتمد على:

- متح محااته ( $L$ ) فقط.
- المقاومة ( $R$ ) فقط.
- متح محااته ( $L$ ) والقوة الدافعة الكهربائية ( $\varepsilon$ ).
- المقاومة ( $R$ ) والقوة الدافعة الكهربائية ( $\varepsilon$ ).

2. **أَسْتَعْجِلُ:** كيف يمكن استخدام جسم مشحون لتمييز منطقة مُحدّدة؛ إن كانت منطقة مجالٍ مغناطيسيٍّ أم مجالٍ كهربائيٍّ؟ أوّلُّ إجابةٍ بمثال.

3. **أستنتج:** يبين الشكل المجاور مساراً إلكترون في أثناء مروره عبر منطقتين تحتويان على مجالين مغناطيسيين متظمين ( $B_1$ ) و ( $B_2$ ) ، حيث يسلك إلكترون في كلا المنطقتين مساراً على شكل نصف دائرة.



ب. أي المجالين أكبر مقداراً؟ أفسر إجابتي.

جـ. أقارن بين الزمن الذي يستغرقه الإلكترون لعبور منطقة المجال ( $B_1$ ) والزمن اللازم لعبوره منطقة المجال ( $B_2$ ). موضحاً إجابتي.

**أ. استنتاج:** حلقة فلزية مستطيلة الشكل تقع في المستوى  $xy$ ، وتحرك باتجاه محور  $x +$  بسرعة متوجة ثابتة، فتدخل منطقة مجال مغناطيسيي منتظم باتجاه محور  $z -$ ، كما في الشكل المجاور. وتمثل الرموز  $a$  و  $b$  و  $c$  مرحلة دخول الحلقة منطقة المجال المغناطيسيي، ومرحلة حركتها داخله، ومرحلة خروجها من منطقة المجال المغناطيسيي، على الترتيب. أجب عنما يأتى:

أ. أي المراحل الثلاث يتولد فيها قوة دافعة كهربائية وتيار كهربائي حي في الحلقة؟ أفسر إجابتي.

ب. أحدد اتجاه التيار الكهربائي الحي المتولد في كل مرحلة إن وجد، مفسّراً إجابتي.

**5. أُفْسِر:** 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 حُثّي في الحلقة

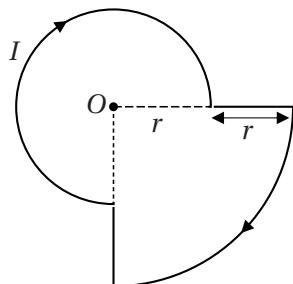


المجاور. أُحدّد لكل حالة من الحالات الآتية، هل يمر تيار كهربائي حّي في الحلقة  
أم لا؟ وأحدّد اتجاهه.

أ. عندما تتحرك الحلقة رأسياً إلى الأسفل، باتجاه السلك.

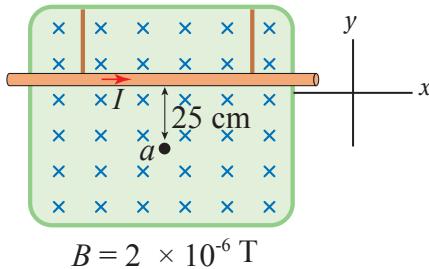
ب. في أثناء إنفاس التيار الكهربائي المار في السلك مع بقاء الحلقة ثابتة.





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

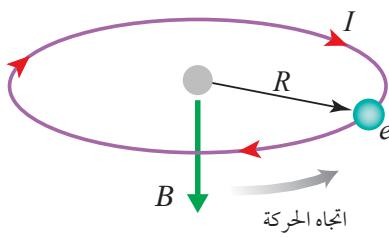
7. **استخدم الأرقام:** أيون موجب شحنته  $(+e)$  يكمل 5 دورات في مجال مغناطيسيٌّ منتظم  $(5.0 \times 10^{-2} \text{ T})$  خلال مدة زمانية  $(1.5 \text{ ms})$ . أحسب كتلة الأيون بوحدة  $(\text{kg})$ .



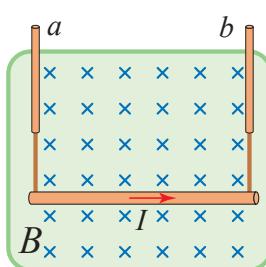
8. **استخدم الأرقام:** موصلٌ مستقيمٌ لانهائي الطول يحمل تياراً كهربائياً  $(4 \text{ A})$ ؛ معلقًّا أفقياً داخل مجالٍ مغناطيسيٍّ كما في الشكل. اعتماداً على بيانات الشكل؛ أحسب ما يأتي:  
أ. المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة  $(a)$ .

- ب. مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل المستقيم.

- ج. القوة المغناطيسية المحصلة المؤثرة في جسيمٍ شحنته موجبة مقدارها  $(6 \times 10^{-6} \text{ C})$  لحظةً مروره بالنقطة  $(a)$  بسرعة  $(2 \times 10^4 \text{ m/s})$  باتجاه محور  $(-y)$ .



9. **استخدم الأرقام:** أفترض أنَّ إلكترونَّ ذرةً الهيدروجين يدور حول النواة (البروتون) في مسار دائريٍّ نصفُ قطره  $(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})$  تحت تأثير القوة الكهربائية بينهما. تشكّل حركةُ الإلكترون تياراً كهربائياً (اصطلاحياً) في حلقةٍ دائريَّةٍ بعكس اتجاه حركته، كما في الشكل. أحسب مقدار المجال المغناطيسي  $(B)$  الناتج عن هذه الحركة؛ علمًا بأنَّ الزمن الدورى لحركة الإلكترون  $(1.46 \times 10^{-16} \text{ s})$ .

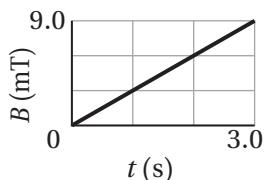


10. **استخدم الأرقام:** موصلٌ مستقيمٌ الشكل طوله  $(0.45 \text{ m})$  وكتلته  $(60 \text{ g})$ ، في وضعٍ أفقىً معلقاً بواسطة سلكين رأسين  $(a, b)$  ينقلان له تياراً كهربائياً  $(5 \text{ A})$ . حيث  $(g = 9.8 \text{ m/s}^2)$ .

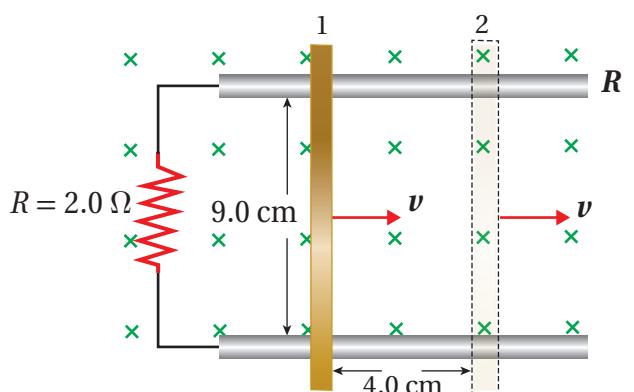
- أ. أحسب أقل مقدار للمجال المغناطيسي الذي يتعامد مع الموصل بحيث يجعل الشد في السلكين صفرًا.

- ب. أحسب مجموع الشد الكلي في السلكين المذكورين عندما ينعكس اتجاه التيار الكهربائي في الموصل.

11. **استخدم الأرقام:** حلقة دائيرية موصلة نصف قطرها (0.10 m)، موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (0.15 T)، على أن يكون مستواها عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي. سُحبت الحلقة من طرفيِن متقابلين فيها، فتغير شكلها، وأصبحت مساحتها ( $0.20 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ ) خلال (3.0 s). أحسب القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتوسطة المُتولدة في الحلقة خلال هذه المدة الزمنية.



12. **استنتج:** يُبيَّن الشكل حلقة فلزية مساحة مقطعها العرضي (8.0  $\times 10^{-24} \text{ m}^2$ ) موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم باتجاه محور (z)، يتغير مقداره بانتظام، والرسم البياني يُبيَّن تغير المجال مع الزمن. فيتولد في الحلقة تيار حثي مقداره ( $2.0 \times 10^{-3} \text{ A}$ ).  
 أ. أُحدِّد اتجاه التيار الحثي المار في الحلقة.  
 ب. أحسب مقاومة الحلقة.



13. **استخدم 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 ( $R = 2.0 \Omega$ ، وأُحدِّد اتجاهه.

# الوحدة

## التيار المتردد والدارات الإلكترونية

Alternating Current and Electronic Circuits

6



### أتاًمِلُ الصورة

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

كيف تختلف الدارات الإلكترونية عن غيرها من الدارات الكهربائية الأخرى؟

## الفكرة العامة:

ظهرت محطات توليد الطاقة الكهربائية نهاية القرن التاسع عشر، وكان بعضها يولد تياراً مستمراً، وبعضها الآخر يولد تياراً متربّداً، أمّا الآن، فيمكن القول إنّ المحطات جميعها تولد تياراً متربّداً، وبوجود أجهزة كثيرة تحتوي دارات إلكترونية تعمل بالتيار المستمر، اقتضت الحاجة إلى أجهزة تحول أيّ من التيارين إلى الآخر.

### الدرس الأول: دارات التيار الكهربائي المتربّد

#### Alternating Electric Current Circuits

**الفكرة الرئيسية:** تعمل بعض الأجهزة الكهربائية المنزلية بالتيار المتربّد، ويمكن استخدام عناصر الدارات الكهربائية للتيار المستمر، مثل المقاومة والمحثّ والمواسع في دارات التيار المتربّد، التي تخضع لمبدأ حفظ الشّحنة والطاقة؛ إلا أنّ مصدر الطاقة فيها يكون مصدر فرق جهد متربّد.

### الدرس الثاني: الدارات الإلكترونية

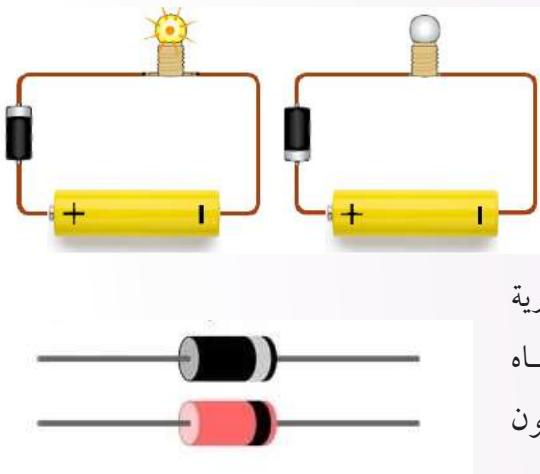
#### Electronic Circuits

**الفكرة الرئيسية:** تحتوي الأجهزة الإلكترونية التي نستخدمها، مثل الهاتف الخلوي وجهاز التحكم عن بعد دارات إلكترونية، من مكوناتها الثنائي والترانزستور، التي جاءت مخرجات لعلم أشباه الموصلات.

# تجربة استهلاكية

## اختبار الثنائي البلوري وقياس مقاومته

**المواد والأدوات:** ثنائي بلوري، مقياس متعدد رقمي، بطارية (1.5 V)، أسلاك توصيل مصباح كهربائي صغير (1.5 V).



**إرشادات السلامة:** توخي الحذر عند التعامل مع الأطراف الحادة للأدوات والمواد وعند استخدام أدوات القطع.

### خطوات العمل:

أنفذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

- أحدد طرفي المصعد والمبهط للثنائي البلوري بوصله بالبطارية (1.5 V) والمصباح الكهربائي كما في الشكل، ثم أحدد اتجاه التوصيل الذي يضاء فيه المصباح، (يضيء المصباح عندما يكون المصعد متصلًا بالقطب الموجب للبطارية).
- أختار على المقياس المتعدد الرقمي وضع قياس المقاومة عن طريق تدوير المفتاح لكي يشير إلى رمز الأوم ( $\Omega$ )، ثم أختار مجال قياس المقاومة المنخفضة ( $2\text{ k}\Omega$ ) تقريرًا.
- أصل الطرف الموجب للمقياس (المجس الأحمر) بمصعد الثنائي البلوري، والطرف السالب (المجس الأسود) بمبهط الثنائي البلوري، وألاحظ قراءة الشاشة الرقمية للمقياس، ثم أدونها.
- أختار مجال قياس المقاومات الكبيرة ( $200\text{ k}\Omega$ ) أو ( $2\text{ M}\Omega$ ) مع بقاء مفتاح المقياس المتعدد باتجاه رمز ( $\Omega$ ).
- أعيد توصيل الطرف الموجب للمقياس المتعدد بمبهط الثنائي البلوري، والطرف السالب بمصعد الثنائي البلوري، وألاحظ قراءة الشاشة الرقمية للمقياس، ثم أدونها.

### التحليل والاستنتاج:

- استنتاج:** أحدد أي طرف في الثنائي البلوري يمثل المبهط وأيهما يمثل المصعد عن طريق ملاحظة إضاءة المصباح في الخطوة (1).
- استنتاج:** أحدد وضعية الانحيازين الأمامي والعكسى للثنائي البلوري عند تنفيذ الخطوتين (3) و(5).
- قارن** بين قيمتي مقاومة الثنائي البلوري في وضعيات الانحياز السابقتين، ثم أحدد أيهما أكبر، مبينًا أهمية ذلك.

## التيار الكهربائي المتردد

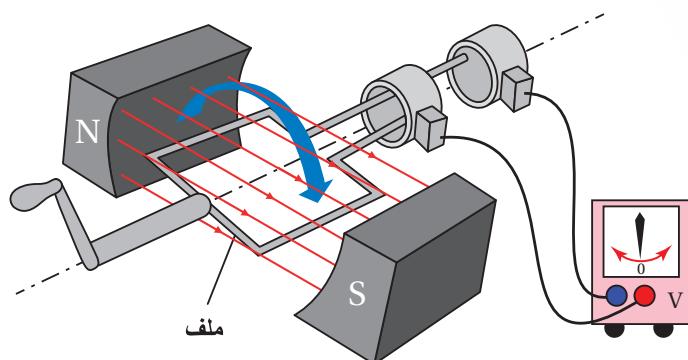
## Alternating Electric Current

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

نحصل على التيار المتردد Alternating current (AC) من المولد الكهربائي الذي يتكون في أبسط أشكاله من ملفًّ أحادي مصنوع من سلك فلزّي معزول، يدور داخل مجال مغناطيسي، كما يبين الشكل (1).

عندما يدور الملفّ، تتغير الزاوية المحصورة بين متّجه مساحته واتّجاه المجال المغناطيسي، وهذا ما يؤدّي إلى تغيير في التدفق المغناطيسي الذي يخترق الملف، فتتولد قوة دافعة كهربائية حثية في الملف؛ وفقاً لقانون فارادي في الحث الكهرمغناطيسي.

عند دوران الملفّ يتذبذب مؤشر الفولتميتر يميناً ويساراً على جانبي الصفر، أي أنّ القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملفّ تغيّر مقدارها واتجاهها باستمرار، فينشأ عنها تيار كهربائي متغير مقداراً واتجاهًا.



الشكل (1): مولد كهربائي يتصل طرفاً ملفة بفولتميتر.

## الفكرة الرئيسية:

تعمل بعض الأجهزة الكهربائية المنزلية بالتيار المتردد، ويمكن استخدام عناصر الدارات الكهربائية للتيار المستمر، مثل المقاومة والمحتّ والمواسع في دارات التيار المتردد، التي تخضع لمبدأ حفظ الشحنة والطاقة؛ إلا أنّ مصدر الطاقة فيها يكون مصدر فرق جهد متردد.

## نتائج التعلم:

- أقارن بين التيارين المتردد والمستمر من حيث الخصائص ومصادر كلّ منها.
- أحدّ العوامل التي تؤثّر في توليد القوة الدافعة الكهربائية الحثّية بين طرفي المولد.
- أحلّ مسائل حسابية على دارات التيار المتردد التي تشتمل على: مقاومة فقط، محتّ مثالّي فقط، مواسع فقط، مقاومة ومحثّ ومواسع تتصل على التوالي.
- أتعرّف بتركيب دارة الرنين، ثم أحدّ العوامل التي يعتمد عليها تردد الرنين لدارة توالي.

## المفاهيم والمصطلحات:

فرق الجهد المتردد

Alternating Voltage

Alternating Current

التيار المتردد

Inductive Reactance

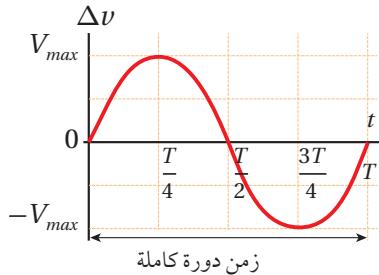
المعاوقة المحسّنة

Capacitive Reactance

المعاوقة الموسعة

Natural Frequency

التردد الطبيعي



الشكل (2): **تغّير فرق الجهد المترّدد** بين طرفي الملف مع الزمن وفقاً لاقتران جيبي.

## فرق الجهد المترّدد 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 التغيير في فرق الجهد بين طرفي الملف مع الزمن؛ في أثناء دوران الملف دورة كاملة.

أُستنتج من الشكل، أن فرق الجهد اللحظي ( $\Delta v$ ) يتغيّر بالنسبة إلى الزمن ( $t$ ) وفقاً لعلاقة جيبيّة؛ فيكون فرق الجهد موجّاً في النصف الأول من الدورة، وسالباً في النصف الثاني، ويصل إلى قيمة عظمى ( $V_{max}$ ) عند اللحظة  $(\frac{T}{4})$ ، وقيمة عظمى  $(\frac{3T}{4})$  بالاتجاه المعاكس عند اللحظة  $(\frac{3T}{4})$ . حيث ( $T$ ) : الزمن الدوري للملف. يسمى فرق الجهد في هذه الحالة **فرق الجهد المترّدد**، ويعرف بأنه فرق جهد متغيّر بالنسبة إلى الزمن وفقاً لعلاقة جيبيّة، ويعبر عنه بالعلاقة الآتية:

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

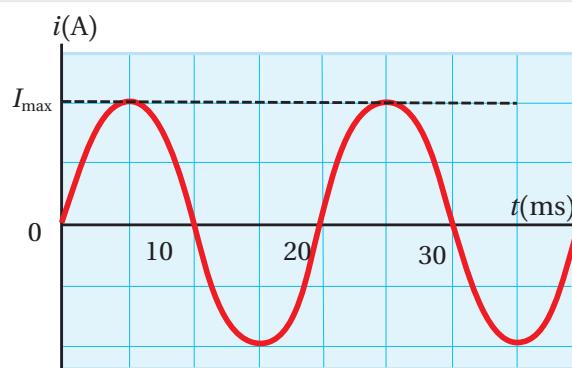
حيث، ( $\omega$ ) التردد الزاوي؛ فعند دوران الملف بتردد ( $f$ ) وزمن دوري ( $T$ )، فإن:

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

يعد المولد الكهربائي مصدراً لفرق الجهد المترّدد؛ يزودنا بتيار متّرد Alternating current (AC) ويعّرف بأنه تيار يسري في دارة كهربائية مغلقة يتغيّر مقداره واتجاهه بالنسبة إلى الزمن وفقاً لعلاقة جيبيّة. في حين تزوّدنا البطاريات بمختلف أنواعها بتيار كهربائي مستمر DC. وبين الرسم البياني في الشكل (3/أ) أنّ مقدار التيار المترّدد ( $i$ ) يتغيّر باستمرار مع الزمن، ويتغيّر أيضاً اتجاه سريانه كـ نصف دورة؛ بسبب تغيّر مقدار واتجاه فرق الجهد الكهربائي المُسّبّب له بين طرفي الملف. في حين يبيّن الشكل (3/ب) أنّ التيار المستمر ثابت في المقدار وفي الاتجاه.



(ب): العلاقة بين التيار المستمر والزمن.



(أ) : العلاقة بين التيار المترّدد والزمن.

الشكل (3): مقارنة بين التيارين المترّدد والمستمر من حيث المقدار والاتجاه.

يُزوّدنا مولّد كهربائي بفرق جهد متّرد، قيمته العظمى (310 V)، وتردّده (50 Hz). أكتب معادلة فرق الجهد المتّرد، ثمّ أجد فرق الجهد عند كل من

$$t_3 = \frac{12}{600} \text{ s}, \quad t_2 = \frac{9}{600} \text{ s}, \quad t_1 = \frac{1}{600} \text{ s}$$

اللحظات الآتية:

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

المطلوب:  $\Delta v = ?$

الحل:

أحسب ( $\omega$ ) باستخدام العلاقة:

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

ثمّ أكتب معادلة فرق الجهد:

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

أجد فرق الجهد عند اللحظة ( $t = \frac{1}{600}$  s):

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

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

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

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

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

.....

**أُفْكِر:** عند إضاءة مصباح كهربائي

بتيار متّرد كما في الشكل (3)

زمنه الدورى (20 ms)، فهل

سنلاحظ التغيير في شدة سطوع

إضاءة المصباح الناتجة من تغير

مقدار التيار الذي يسري فيه؟

أفْسَر إجابتى.

## الربط بالحياة

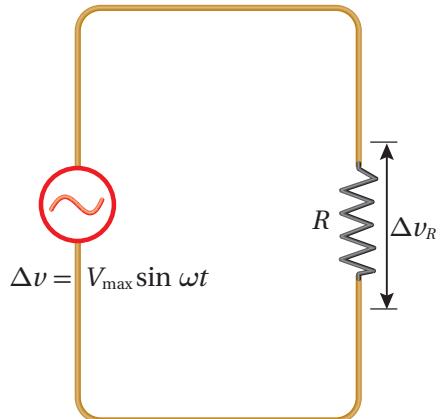


في محطات توليد الطاقة الكهربائية تدور المولّدات بسرعات كبيرة جدًا، وتستمدّ دورانها من توربينات ضخمة تعمل بالبخار، فتنتج قوة دافعة كهربائية حية تصل قيمتها إلى آلاف الفولتات، ثمّ تُوزَّع من خلال شبكات وطنية.

في الأردن، تزود شركات الكهرباء المنازل بفرق جهد متّرد تردد (50 Hz)، وقيمة العظمى (325 V).

## دورات التيار الكهربائي المتردد البسيطة

### مقاومة في دارة تيار كهربائي متردد



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

تتكون دارة التيار المتردد في أبسط أشكالها من مصدر فرق جهد متردد ومقاومة ( $R$ ) كما في الشكل (4)، ويتطبق قاعدة كيرشوف الثانية، فإن المجموع الجبري للتغيرات في الجهد في الدارة المغلقة عند أي لحظة زمنية يساوي صفرًا، ومنه نتوصل إلى أن فرق الجهد بين طرفي المقاومة ( $\Delta v_R$ ) يساوي فرق الجهد للمصدر ويعبر عنه بالعلاقة:

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

حيث ( $\Delta v_R$ ): فرق الجهد بين طرفي المقاومة عند لحظة ما.

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

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

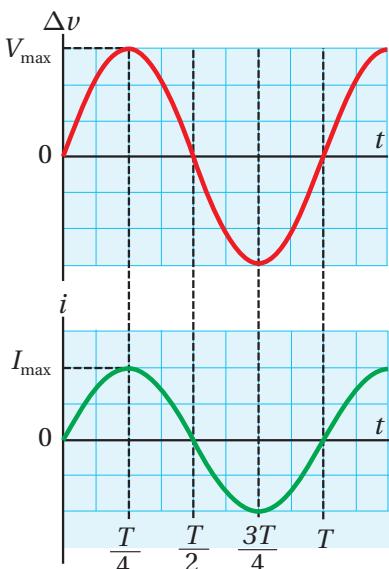
حيث ( $I_{\max}$ ): القيمة العظمى للتيار ( $I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R}$ ).

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

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

يمكن تمثيل التغيير في فرق الجهد بين طرفي المقاومة، والتغيير في التيار المار فيها بالنسبة إلى الزمن كما في الشكل (5).

### القدرة المستهلكة في المقاومة



الشكل (5): تغير كل من فرق الجهد والتيار بالنسبة إلى الزمن في دارة تيار متردد تحتوي مقاومة فقط.

تعلّمت حساب القدرة المستهلكة في مقاومة عند سريان تيار كهربائي مستمر ( $I$ ) فيها باستخدام العلاقة ( $P = I^2 R$ ). أما في حالة التيار المتردد، فإن استخدام العلاقة نفسها تنتج منه قدرة متغيرة بسبب تغير التيار، لذلك نلجأ إلى حساب القدرة المتوسطة ( $\bar{P}$ ) المستهلكة في المقاومة عند سريان تيار متردد فيها، لكننا نحتاج إلى قيمة ثابتة للتيار تكافئ ( $I$ )؛ هذه القيمة يرمز إليها بالرمز ( $I_{\text{rms}}$ )، وتُقرأ root-mean-square وتعني الجذر التربيعي للقيمة المتوسطة لربع التيار، وسنطلق عليه اسم القيمة الفعالة، وتُحسب بالعلاقة الآتية:

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

أي أن القدرة المتوسطة المستهلكة في مقاومة عند سريان تيار متردد فيها،

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



## المثال 2

جهاز كهربائي مقاومته ( $65 \Omega$ )، وصل بمصدر فرق جهد متعدد، إذا علمت أنّ القيمة العظمى لفرق الجهد المتعدد بين طرفيه (325 V)، وتزدّه (60 Hz)، أُحدّد ما يأتي:

- الزمن الدورى لفرق الجهد المتعدد.

ب. القيمة العظمى للتيار المتعدد الذي يسري في الجهاز.

ج. الاقتران الذي يُعبر عن التيار المتعدد بدالة الزمن ( $t$ ).

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

المطلوب:  $T = ?$ ,  $I_{\max} = ?$ ,  $i_R = ?$

الحل:

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

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R} = \frac{325}{65} = 5.0 \text{ A} \quad \text{ب.}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 1.2 \times 10^2 \pi \text{ rad/s} \quad \text{ج.}$$

$$i_R = I_{\max} \sin \omega t = 5 \sin 120 \pi t$$

### المثال 3

القيمة العظمى لمصدر فرق الجهد المتردد في دارة كهربائية (88.0 V)، والقيمة العظمى للتيار المتردد (4.40 A).  
أحسب القيمتين الفعاليتين ( $V_{\text{rms}}$  و  $I_{\text{rms}}$ ) للجهد والتيار في الدارة، ثم أبين المقدار المُتوقع لمقاومة الدارة.

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

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

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

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

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

الحل:

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

### المثال 4

مذكرة كهربائية مقاومتها (40.0  $\Omega$ ) تعمل على فرق جهد متردد بوحدة الفولت مُعبرً عنه بالعلاقة:  $\Delta v = 310 \sin \omega t$

حيث ( $t$ ) بوحدة الثانية، أحسب ما يأتي:

- مقدار القيمة الفعالة للتيار الذي يسري في المذكرة.
- القدرة الكهربائية المتوسطة المستهلكة في مقاومة المذكرة.

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

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

الحل:

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

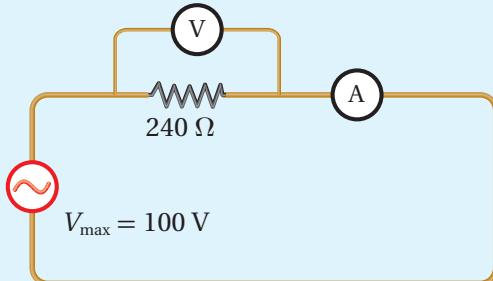
$$V_{\text{max}} = 310 \text{ V}$$

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

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

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

ب.

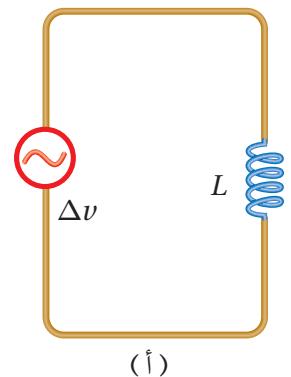


الشكل (6): مقاومة في دارة تيار كهربائي متزدّد.

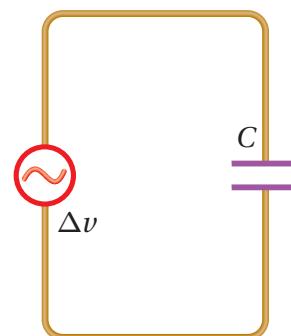
**استخدم الأرقام:** يبيّن الشكل (6) دارة كهربائية تتكون من مقاومة مقدارها ( $240 \Omega$ )، ووصلت بمصدر فرق جهد متزدّد، حيث القيمة العظمى لفرق الجهد بين طرفيه ( $100 \text{ V}$ ). استخدم أميتر وفولتميتر في قياس التيار وفرق الجهد بين طرفي المقاومة. أحسب قراءة كلّ من الأميتر والفولتميتر.

### المعاوقة Reactance

يبّين الشكل (7) شكلين آخرين لدورات التيار الكهربائي المتزدّد؛ إذ يبيّن الشكل (7/أ) دارة تيار متزدّد تحتوي ممثّلاً مصنوعاً من سلك عديم المقاومة محاثته ( $L$ )، والشكل (7/ب) يبيّن دارة تيار متزدّد تحتوي موسعاً مواسعه ( $C$ )، يؤدي الممثّل والموسع دوراً يشبه دور المقاومة من حيث الممانعة التي تبديها هذه العناصر لمرور التيار الكهربائي المتزدّد. فالمقاومة **Resistance** هي خصيصة تعبّر عن الممانعة التي يبديها الموصل لمرور التيار الكهربائي فيه، وبالمثل أعرف مفهوماً مشابهاً يُسمى **المعاوقة Reactance** يعبّر عن الممانعة التي تبديها عناصر الدارة (ممثّل أو موسع) لمرور التيار الكهربائي المتزدّد فيها. ويرمز إلى المعاوقة بالرمز ( $X$ ) وتُقاس بوحدة قياس المقاومة نفسها وهي الأوم ( $\Omega$ )، عند دراسة تغييرات فرق الجهد والتيار في الدارتين الموضّحتين في الشكل (7)، ومقارنتها بتغييرات فرق الجهد والتيار في الدارة المبيّنة في الشكل (4)، نتوصل إلى أنّ:



(أ)



(ب)

الشكل (7): دارات التيار المتزدّد

(أ) دارة ممثّل ومصدر فرق جهد متزدّد.

(ب) دارة موسع ومصدر فرق جهد متزدّد.

• الكمية ( $\omega L$ ) في دارة الممثّل تؤدي دور المقاومة ( $R$ ) في دارة المقاومة،

وُسمّى **المعاوقة الممثّلة** ( $X_L$ ) **Inductive reactance**.

• الكمية ( $\frac{1}{\omega C}$ ) في دارة الموسع تؤدي دور المقاومة ( $R$ ) في دارة المقاومة،

وُسمّى **المعاوقة الموسعة** ( $X_C$ ) **Capacitive reactance**.

• في دارة المقاومة نعبّر عن القيمة العظمى للتيار بالعلاقة ( $I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R}$ )،

والقيمة الفعالة للتيار بالعلاقة ( $I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{R}$ )، وبالمثل يمكن التعبير عنها

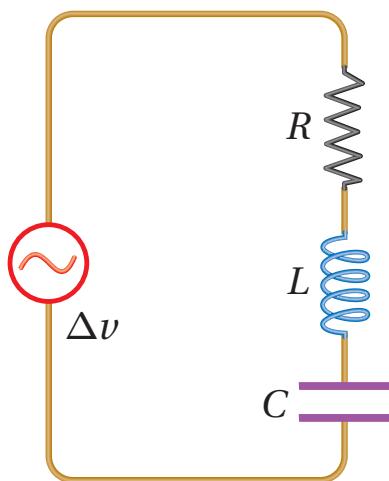
بعلاقات مشابهة في حالة الممثّل والموسع بدلالة المعاوقة بدلاً من المقاومة

كما في الجدول (1).

**أفكار:** ما مقدار معاوقة كل من الممحّث والمواسع عندما يكون التردد الزاوي لمصدر فرق الجهد صغيراً جداً، وعندما يكون ترددّه كبيراً جداً؟

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

يتضح من الجدول (1) أن المعاوقة تتغيّر بتغيّر التردد الزاوي لمصدر فرق الجهد، أي أن الممانعة التي يديها المحث أو المواسع لممرور التيار الكهربائي المتردد تعتمد على تردد المصدر، حيث تزداد معاوقة محث محسّنه ( $L$ ) بزيادة ( $\omega$ )، وتقلل معاوقة مواسع محسّنة ( $C$ ) بزيادة ( $\omega$ ).



الشكل (8): دارة تيار متردد تحتوي مواسعاً ومقاومة ومحثاً موصولة على التوالي.

**أتحقق:** ما العوامل التي تعتمد عليها المعاوقة المحسّنة للممحّث؟ ✓

### دارة مقاومة ومحث ومواسع ( $RLC$ ) على التوالي

#### The RLC Series Circuit

هذه الدارة تحتوي العناصر الثلاثة: مقاومة ( $R$ ) ومحث ( $L$ ) ومواسع ( $C$ ) موصولة جميعها على التوالي بمصدر فرق جهد متردد كما في الشكل (8). ويرمز إلى المعاوقة الكلية للدارة بالرمز ( $Z$ )، ويعبر عنها بدلالة معاوقات مكوناتها الثلاثة بالعلاقة الآتية:

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

وبصورة مماثلة لدورات التيار المستمر، يمكننا استخدام القيمة الفعالة للتيار المتردد:

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

وبتعويض المعاوقة الكلية ( $Z$ ) نتوصل إلى أن:

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

تبين هذه العلاقة أنه يمكن الحصول على تيار فعال له أكبر قيمة ممكّنة في الدارة، عندما تكون قيمة المقام أصغر ما يمكن. ويتحقق ذلك عندما يكون:

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

بتعويض معاوقة المحت و معاوقة الموساع نتوصل إلى أنّ:

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

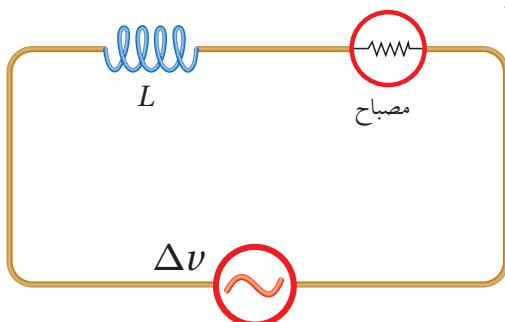
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

يشير الرمز ( $\omega_0$ ) إلى قيمة التردد الذي تتساوى عنده قيمة معاوقة المحت و معاوقة الموساع و يسمى **التردد الطبيعي لدارة (RLC)** (**Natural frequency**). و تعتمد قيمة على كل من معاوقة الموساع و معاوقة المحت، و عندما يتساوى تردد مصدر فرق الجهد في الدارة مع التردد الطبيعي لها ( $\omega_0 = \omega$ ) تكون الدارة في حالة تسمى بالرنين، و تكون قيمة التيار الفعال عند أقصى ما يمكن.

✓ **أتحقق:** ماذا تمثل حالة الرنين في دارة مقاومة و محت و موساع؟

## المثال 5

يبين الشكل (9) دارة يتصل فيها محت و مصباح بمصدر فرق جهد متعدد. ماذا يحدث لإضاءة المصباح عند نقصان تردد المصدر مع بقاء القيمة العظمى لفرق الجهد ثابتة؟



الشكل (9): مصباح و محت في دارة تيار متعدد.

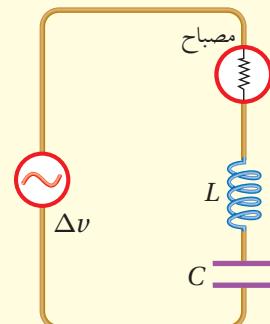
المعطيات: ( $V_{max}$ ) ثابتة، ( $\omega$ ) قلت.

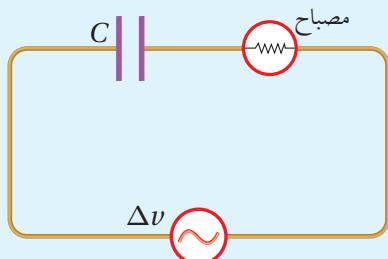
المطلوب: كيف تتغير إضاءة المصباح؟

الحل:

وفقاً للعلاقة ( $\omega L = X_L$ ), فإنّ نقصان تردد المصدر يؤدي إلى نقصان معاوقة المحت؛ فتقل الممانعة التي يبديها المحت لمرور التيار. وهذا يعني زيادة مقدار التيار المار في الدارة، ومن ثمّ، زيادة القدرة المستهلكة في المصباح فتزداد الإضاءة.

**أفكّر:** ما الشرط اللازم توافره كي يضيء المصباح بأكبر شدة ممكنة في الدارة المبينة في الشكل؟





**أـسـتـنـج:** يـبـيـنـ الشـكـلـ (10) دـارـةـ يـتـصـلـ فـيـهـ مـوـاسـعـ وـمـصـبـاحـ بـمـصـدـرـ فـرـقـ جـهـدـ مـتـرـدـدـ. مـاـذـاـ يـحـدـثـ لـإـضـاءـةـ الـمـصـبـاحـ عـنـ نـقـصـانـ تـرـدـدـ الـمـصـدـرـ مـعـ بـقـاءـ الـقـيـمـةـ الـعـظـمـيـ لـفـرـقـ الـجـهـدـ ثـابـتـةـ؟ـ أـفـسـرـ إـجـابـتـيـ.

الشكل (10): مـوـاسـعـ وـمـصـبـاحـ فـيـ دـارـةـ تـيـارـ مـتـرـدـدـ.

## المـاـلـ 6

دارـةـ (AC) تـحـتـوـيـ مـصـدـرـ فـرـقـ جـهـدـ مـتـرـدـدـ قـيـمـتـهـ الـفـعـالـةـ (150 V) وـتـرـدـدـهـ (60.0 Hz) وـمـقاـوـمـةـ (420  $\Omega$ ) وـمـحـثـ مـحـاـثـتـهـ (1.80 H) ، وـمـوـاسـعـ مـوـاسـعـتـهـ (7.00  $\mu$ F). أـجـدـ كـلـاـ مـمـاـ يـأـتـيـ:

أـ.ـ الـمـعـاـوـقـةـ الـمـحـثـيـةـ،ـ الـمـعـاـوـقـةـ الـمـوـاسـعـيـةـ،ـ وـالـمـعـاـوـقـةـ الـكـلـيـةـ لـلـدـارـةـ.

بـ.ـ الـقـيـمـةـ الـفـعـالـةـ لـلـتـيـارـ الـمـتـرـدـدـ.

الـمـعـطـيـاتـ:

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

الـمـطـلـوبـ:

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

الـحـلـ:

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

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

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

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

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

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

بـ.ـ الـقـيـمـةـ الـفـعـالـةـ لـلـتـيـارـ الـمـتـرـدـدـ:

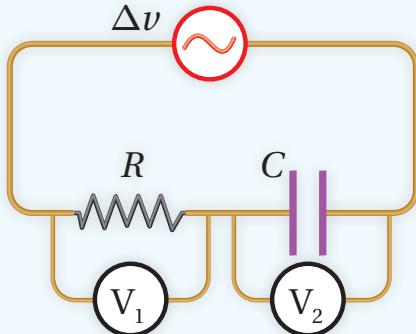
$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{150}{516} = 0.290 \text{ A}$$

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

## التجربة ١

### حساب مواسعة مواسع باستخدام دارة (RC)

**المواد والأدوات:** مقاومة ( $\Omega$  1000)، مواسع (0.1 mF)، مصدر طاقة متردد (AC) منخفض الجهد وقابل للضبط، فولتميتر عدد 2، أسلاك توصيل.



**إرشادات السلامة:** توخي الحذر عند التعامل مع مصدر الطاقة الكهربائية والوصلات الكهربائية.

#### خطوات العمل:

أنفذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

1. أصل الدارة كما في الشكل المجاور، على أن تتصل المقاومة والمواسع ومصدر الطاقة جميعها على التوالي، ثم أصل فولتميتر بطرف المقاومة وآخر بطرف المواسع.
2. أضبط مصدر الطاقة المتردد على قيمة منخفضة، ولتكن بين (1.0 V–5.0 V).
3. **أجب:** أضبط مصدر الطاقة على تردد (400 Hz)، ثم أقيس فرق الجهد بين طرفي المقاومة بالفولتميتر ( $V_1$ )، وفرق الجهد بين طرفي المواسع بالفولتميتر ( $V_2$ )، ثم أدون القراءات في الجدول.
4. أرفع تردد مصدر الطاقة إلى القيم (400, 800, 1000, 1200, 1400 Hz)، وفي كل مرة أكرر الخطوة السابقة، ثم أدون النتائج في الجدول.

#### التحليل والاستنتاج:

1. **أستخدم الأرقام:** أحسب القيمة الفعالة للتيار ( $I_{rms}$ ) الذي يسري في الدارة عند كل محاولة بقسمة فرق الجهد بين طرفي المقاومة ( $\Delta v_R$ ) على مقدار المقاومة ( $R$ )، ثم أدون النتائج في جدول البيانات.
2. **أستخدم الأرقام:** أحسب المعاوقة الموسعة للمواسع ( $X_C$ ) عند كل محاولة بقسمة فرق الجهد بين طرفيه على القيمة الفعالة للتيار، ثم أدون النتائج في جدول البيانات.
3. **أمثل بيانياً** العلاقة بين مقلوب التردد الزاوي على محور ( $x$ ) والمعاوقة الموسعة على محور ( $y$ ).
4. **أستنتج:** أجد ميل المنحنى، وأستخرج مواسعة المواسع من الميل، ثم أقارن النتيجة بقيمة المكتوبة على المواسع.

## تطبيقات تكنولوجية

### جهاز كشف الفلزات



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



الشكل (12): أجهزة الاتصال اللاسلكي، كل جهاز يحتوي دارة إرسال و دائرة استقبال.

تُستخدم في المطارات بوابات للكشف عن الفلزات، عندما يمر المسافر خلالها فإنها تصدر إشارة تُبيّن إنْ كان المسافر يخفى أداة فلزية أم لا. وتحتوي إطار الباب المبيّن في الشكل (11) ملأً من سلكٍ موصل يمثل محثًا في دارة (RLC)، وتكون الدارة متصلة بمصدر فرق جهدٍ متعددٍ ضبط ترددُه لإحداث حالة الرنين. إن اقتراب جسم فلزي من البوابة يغير من قيمة محاثة الملف، ما يؤدي إلى انعدام حالة الرنين، وعليه يتغير التيار الكهربائي المار في الدارة، ونتيجة لذلك تصدر دارات الكترونية إشارات تحذيرية صوتية و أخرى مرئية.

### أجهزة المذيع والاتصال اللاسلكي

دارات الاستقبال في أجهزة المذيع وأجهزة الاتصال اللاسلكي، تُعدّ مثالاً مُهمًا على دارة الرنين، فمحطات الإذاعة تُثبت برامجها على هيئة موجات كهرمغناطيسية، ولكل إذاعة ترددات محددة. عندما يضبط أحدنا مفتاح الموجة في المذيع على إذاعة معينة، فإنه يغير من مواسعة المواسع في دارة الرنين داخل المذيع، وهذا يغير من التردد الطبيعي لدائرة الاستقبال ليصبح مطابقًا لتردد موجات الإذاعة، ثم تمرر هذه الموجات بعد تكبيرها إلى مكّبّر الصوت في المذيع فنسمعها بوضوح، في حين تتلاشى موجات الإذاعات الأخرى التي يختلف تردداتها عن تردد الرنين.

وبالطريقة نفسها تعمل أجهزة الاتصال اللاسلكية التي تتكون من دارّة إرسال واستقبال، على نحو ما هو مبيّن في الشكل (12)، تُستخدم في مجالات كثيرة، مثل التواصل بين دوريات السير، واتصال الطائرات والسفن بالمراکز الأرضية، وغير ذلك الكثير من الاستخدامات.

## المثال 7

تتكون دارة استقبال (RLC) في جهاز مذيع من مقاومة ومحثٌّ محاثته ( $1.4 \text{ mH}$ ) ومواسع. أجد مواسعة المواسع المستخدم لضبط المذيع على استقبال موجات محطة إذاعة عمان (FM) وترددُها ( $99 \text{ MHz}$ ).

المُعطيات:  $L = 1.4 \times 10^{-3} \text{ H}$ ,  $f_0 = 9.9 \times 10^7 \text{ Hz}$

المطلوب:  $C = ?$

الحل:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2 \times 3.14 \times 9.9 \times 10^7 = 6.2 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

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

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

.....

## المحول 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 المحول الكهربائي في عمله على الحث الكهرومغناطيسي ، وهو يتكون من ملفين من الأسلاك الموصولة ملفوفين على قلب حديدي مشترك ، كما في الشكل (13) ، يُسمى الملف الأول بالملف الابتدائي ، ويكون من ( $N_1$ ) لفة ، ويصل بمصدر فرق جهد متردد . في حين يتكون الملف الثاني من ( $N_2$ ) لفة ، ويتصل بجهاز مستهلك للطاقة ، مثل مقاومة أو مصباح ، وُسمى الملف الثاني . يولّد مصدر فرق الجهد المتردد تياراً كهربائياً متردداً؛ فيتولّد في الملف الابتدائي مجال مغناطيسي متغير مع الزمن ، ما يؤدي إلى تغير التدفق المغناطيسي عبره ، وبتطبيق قانون فارادي في الحث ، فإن فرق الجهد بين طرفي الملف الابتدائي يُعبر عنه بالعلاقة :

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

يعلم القلب الحديدي على تركيز المجال المغناطيسي داخل الملف الابتدائي ، وتتدفق أقوى عدد ممكّن من خطوط المجال المغناطيسي إلى الملف الثاني ، وبافتراض عدم وجود طاقة مفقودة كما هو الحال في المحول المثالى ، فإن هذا التدفق يولّد فرق جهد كهربائي بين طرفي الملف الثاني ، يُعبر عنه بالعلاقة :

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

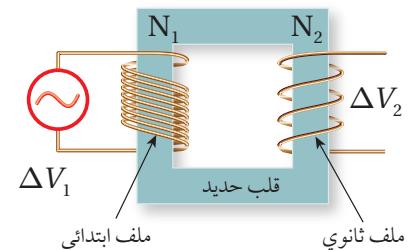
وبتعويض التغيير في التدفق من العلاقة الأولى في الثانية نحصل على :

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

عندما يكون عدد اللفات ( $N_2$ ) في الملف الثاني أكبر من عدد اللفات ( $N_1$ ) في الملف الابتدائي ، فإن ( $\Delta V_2 > \Delta V_1$ ) ، ويكون المحول رافعاً للجهد ، في حين يكون المحول خافضاً للجهد ( $\Delta V_2 < \Delta V_1$ ) إذا كان عدد اللفات في الملف الثاني أقل منه في الابتدائي . وفي المحول المثالى تكون القدرة الداخلة في الملف الابتدائي مساوية للقدرة الناتجة من الملف الثاني ، 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 جزءاً من الطاقة المنقولة يُفقد بسبب المقاومة الكهربائية للأسلاك الناقلة . وتحرص محطات توليد الكهرباء إلى خفض قيمة الطاقة المفقودة إلى الحد الأدنى .

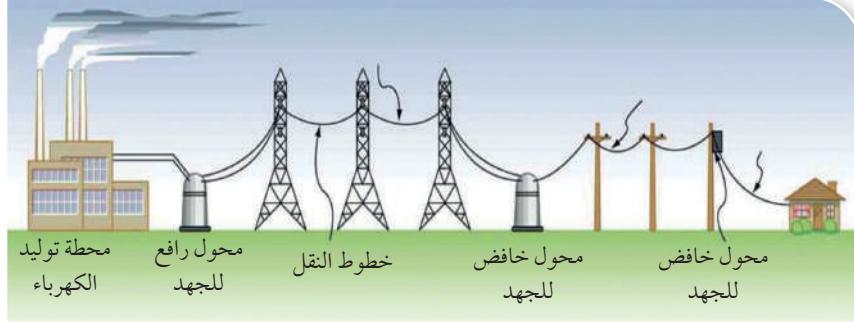


الشكل (13) : محول كهربائي يتكون من ملفين ابتدائي وثانوي .

**أتحقق :** أوضح كيف تنتقل الطاقة الكهربائية بين ملفي المحول .

**أفّكر :** هل يعمل المحول المبين في الشكل (13) عند وصل الملف الابتدائي بمصدر تيار مستمر؟ أنسرب إجابتي

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



**أَفْخَر:** توجد نهاية قصوى لرفع الجهد الكهربائي، عند نقل الطاقة الكهربائية، يؤدي تجاوزها إلى تأمين جزئيات الهواء. مما الذي ينتج من تأمين الهواء حول خطوط النقل (الأسلاك)؟

وفقاً للمعادلة ( $P = I^2 R$ ) فإن القدرة المستهلكة في الأسلاك تتناسب طردياً مع كل من مقاومة الأسلاك ومربيع 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 مقطعيها صغيرة، فتكون مقاومتها مرتفعة نسبياً. 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 خاضعة للجهد حتى تصل قيمة فرق الجهد في الأحياء السكنية إلى (230 V). ويبيّن الشكل (14) مخططاً يوضح استخدام المحولات الرافعية والخاضعة للجهد لنقل الطاقة الكهربائية.

## المثال 8

محول كهربائي مثالي خاضع للجهد يتصل ملخّق الابتدائي بمصدر فرق جهد (240 V)، ويتصل ملخّقه الثانوي بمصباح كهربائي مقاومته ( $2 \Omega$ )، وعدد لفّات الملف الابتدائي (1200) لفة، ولفّات الملف الثانوي (30) لفة.

أ. فرق الجهد بين طرفي الملف الثانوي أحسب:

ب. التيار في الملف الابتدائي.

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

المطلوب:  $\Delta V_2 = ?$ ,  $I_1 = ?$

الحلّ:

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

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

ب. التيار الكهربائي المار في الملف الابتدائي:

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

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

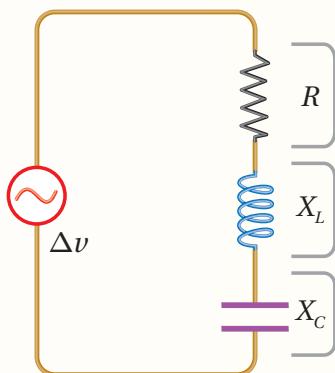
$$I_1 = \frac{I_2 \Delta V_2}{\Delta V_1} = \frac{3 \times 6}{240} = 0.075 \text{ A}$$

# مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أوضح المقصود بالمعاوقتين المحية والمواسعة، ثم أبين العوامل التي تؤثر في كلّ منها.

2. أوضح المقصود بالقيمتين العظمى والفعالة لفرق الجهد المتردد.

3. **أستنتج:** أوضح سبب صغر قيمة التيار المتردد في دارة (AC) تحتوي مواسعاً فقط عند الترددات المنخفضة جداً. ثم أوضح سبب انعدام التيار في دارة (AC) تحتوي محثّاً فقط عند الترددات العالية جداً.



4. **أفسّر:** عند مضاعفة تردد مصدر فرق الجهد إلى مثيله في دارة تيار متردد تحتوي (RLC) كما في الشكل، ماذا يحدث لكّل من:  $R, X_L, X_C$ ؟ أوضح إجابتي.

5. **استخدم الأرقام:** ما القيمة العظمى للتيار المتردد في دارة (AC) تحتوي مواسعاً مواسعه ( $5.0 \mu F$ )، ومصدر فرق جهد قيمته العظمى ( $111 V$ ) وتردده ( $86 Hz$ )؟

6. **استخدم الأرقام:** عند أي تردد زاوي لمصدر فرق الجهد تتساوى المعاوقة المحية لمحث ( $57 \mu H$ ) مع المعاوقة الموسعة لمواسع ( $57 \mu F$ ) في دارة تيار متردد؟ وماذا يسمى هذا التردد؟

7. **استخدم الأرقام:** دارة (RLC) تتكون من مقاومة ( $80 \Omega$ ) ومواسع ( $5.0 \mu F$ ) ومحثّ، موصولة على التوالي بمصدر فرق جهد متردد، جهده الفعال ( $12 V$ )، وتردده الزاوي ( $2000 rad/s$ ). أجد محاثة المحث التي تجعل للتيار الفعال أكبر قيمة، ثم أجد أكبر قيمة للتيار الفعال.

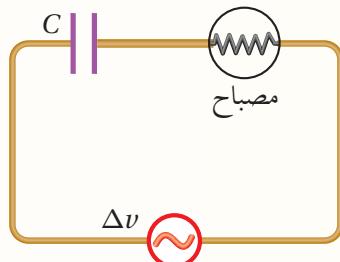
8. **استخدم الأرقام:** يُستخدم في شبكات توزيع الكهرباء محول خافض للجهد، عدد لفات ملفه الابتدائي ( $6900$ ) والثانوي ( $600$ )، فما مقدار فرق الجهد بين طرفي ملفه الثانوي، إذا كان فرق الجهد بين طرفي الملف الابتدائي  $?(230 kV)$ ؟

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

1. يدور ملف مولّد كهربائي فيزودنا بفرق جهد متردد بحسب العلاقة ( $\Delta V = 240 \sin 360\pi t$ ). إنّ القيمة العظمى لفرق الجهد بين طرفيه وتردده يساويان:

أ.  $(120 V)$  و  $(180 Hz)$ . ب.  $(120 V)$  و  $(360 Hz)$ .

د.  $(360 Hz)$  و  $(240 V)$ . ج.  $(180 Hz)$  و  $(240 V)$ .



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

أ. مواسعة المواسع.

ب. معاوقة المصابح.

ج. مقاومة المصباح.

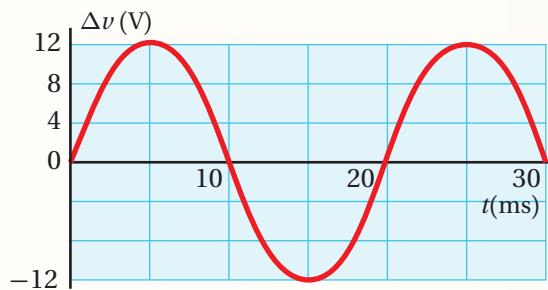
3. يبيّن الشكل المجاور دارة تيار متعدد يتصل فيها مصباح ومواسع بمصدر فرق جهد تردد  $(40 \text{ Hz})$ ، وقراءة الأميتر  $(2.0 \text{ A})$ ، إذا ارتفع تردد مصدر الجهد إلى  $(56 \text{ Hz})$  مع بقاء قيمته العظمى ثابتة، فإنَّ قراءة الأميتر بوحدة أمبير  $(\text{A})$  تساوي:

د. 2.8

ج. 2.3

ب. 2.0

أ. 1.6



\* دارة تيار متعدد تحتوي مقاومة فقط مقدارها  $(6 \Omega)$ ، يتغيّر فرق الجهد بين طرفيها كما في التمثيل البياني المجاور. أجب عن الفقرتين الآتتين مستعيناً بالتمثيل البياني:

4. القيمة الفعالة للتيار المتعدد الذي يسري في المقاومة بوحدة أمبير  $(\text{A})$  تساوي:

د. 4

ج.  $2\sqrt{2}$

ب. 2

أ.  $\sqrt{2}$

5. التردد الزاوي لفرق الجهد المصدر في الدارة بوحدة  $(\text{rad/s})$  يساوي:

د.  $100\pi$

ج.  $50\pi$

ب. 100

أ. 50

6. وصل مصدر للتيار المتعدد مع مقاومة  $(R)$ ، وكانت 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:

د.  $4\overline{P}$

ج.  $2\overline{P}$

ب.  $\frac{\overline{P}}{2}$

أ.  $\frac{P}{4}$

### المواد الموصلة والعزلة وشبكة الموصلة

#### Conductors, Insulators and Semiconductors

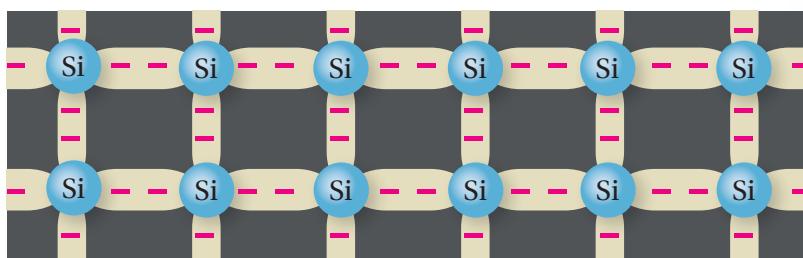
تعلّمتُ سابقاً أنَّ الذرّات هي وحدات البناء الأساسية للمواد، وتتكوّن الذرّة من نواة موجبة الشحنة تتحرّك حولها إلكترونات سالبة الشحنة تتوزّع في مستويات (أغلفة) طاقة. وتُسمّى الإلكترونات الموجودة في آخر مستوى طاقة إلكترونات التكافؤ **Valence electrons**، وهي التي تُحدّد كثيراً من خصائص المادة، مثل التوصيل الكهربائي والتوصيل الحراري. وتُصنّف المواد من حيث قابليتها للتوصيل الكهربائي إلى الأنواع الآتية:

1. **مواد عازلة Insulators**: عدد إلكترونات التكافؤ لها أكثر من أربعة، وترتبط بذرات المادة بقوّى كهربائية كبيرة، لذلك لديها عدد قليل من الإلكترونات الحرّة وهذا يجعلها مادة عازلة للكهرباء، وعادة توجد على هيئة مركّبات، مثل المطاط والمایكا والزجاج.

2. **مواد موصلة Conductors**: عدد إلكترونات التكافؤ لها أقلّ من أربعة، لكن قوى ارتباطها بالذرات ضعيفة، لذلك لديها كثير من الإلكترونات الحرّة وهذا يجعلها موصلات جيدة للتيار الكهربائي، مثل الحديد والنحاس والفضة.

3. **مواد شبه موصلة Semiconductors**: عدد إلكترونات التكافؤ لها يساوي أربعة، وتوجد بين المواد الموصلة والمواد العازلة من حيث قدرتها على توصيل التيار الكهربائي، ومن الأمثلة على المواد شبه الموصلة الجرمانيوم (Ge) والسليلكون (Si)، وهما من أهمّ أشباه الموصلات المستخدمة في التطبيقات الإلكترونية.

ترتبط كل ذرّة من ذرات السليكون بأربع ذرّات مجاورة لها بروابط تساهمية، وتشكّل بذلك بلورة السليكون، وعند درجة حرارة الصفر المطلق (0 K) تكون جميع إلكترونات التكافؤ للسليكون تقريباً مقيّدة نتيجة ل الروابط التساهمية، ولا توجد إلكترونات حرّة كما في الشكل (15).



القاهرة الرئيسية:

تحتوي الأجهزة الإلكترونية التي نستخدمها، مثل الهاتف الخلوي وجهاز التحكم عن بعد دارات إلكترونية، من مكوناتها الثنائي والترانزستور، التي جاءت مخرجات لعلم أشباه الموصلات.

نتائج التعلم:

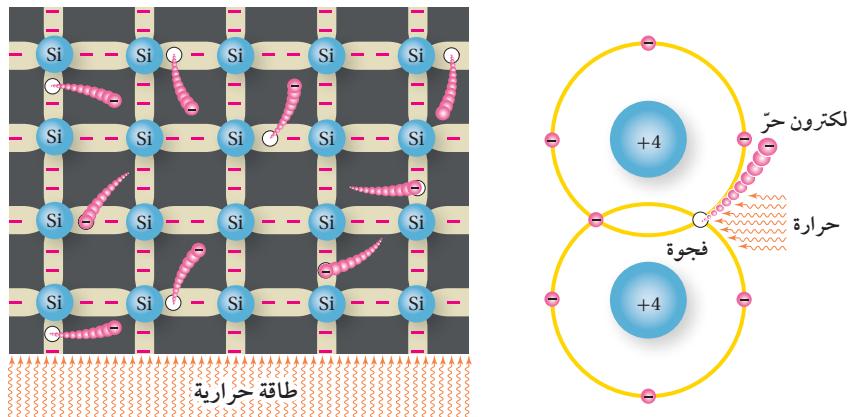
- أصنّف المواد إلى مواد موصلة وعزلة وشبكة موصلة.
- أشرح تركيب الثنائي البلوري.
- أمثل العلاقة بين الجهد والتيار في الثنائي البلوري.
- أصمّم دارة كهربائية أستخدم فيها الثنائي البلوري بوصفه مقوّماً للتيار المتردّد.
- أصنف أجزاء الترانزستور الرئيسية.
- أذكر استخدامات الترانزستور في الأجهزة الإلكترونية الحديثة.

المفاهيم والمصطلحات:

- إلكترونات التكافؤ
- Valence Electrons
- مواد عازلة للكهرباء
- مواد موصلة
- مواد شبه موصلة
- إشباه
- Doping

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

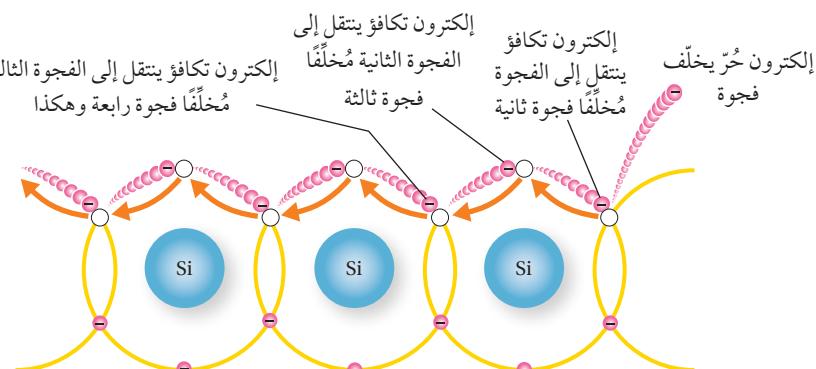
الشكل (16): الإلكترونات  
الحرجة والفجوات في بلورة  
السليلكون عند درجة حرارة  
الغرفة.



أما عند درجة حرارة الغرفة ( $20^{\circ}\text{C}$ ) مثلاً، فتمتص بعض الإلكترونات طاقة حرارية تؤدي إلى كسر الروابط التساهمية، ما يؤدي إلى تحرير إلكترونات تُسمى **إلكترونات التوصيل** Conduction electrons. عندما يغادر الإلكترون الرابطة التساهمية يصبح إلكترونًا حرًا، ويترك خلفه فراغاً يُطلق عليه **فجوة Hole**، أتأمل الشكل (16). تبدو الفجوة مثل شحنة موجبة نتيجة للنقص في الشحنة السالبة الكلية على الذرة عند ترُك الإلكترون موقعه، وبذلك يكون عدد الفجوات يساوي عدد الإلكترونات التوصيل في بلورة السليكون النقيّة، وهو ما يُسمى زوج **إلكترون-فجوة Electron–Hole pair**.

تسهم الفجوات في التوصيل الكهربائي مثل إلكترونات التوصيل، فحين تتكوّن فجوة نتيجة لإفلات الإلكترون عند كسر رابطة تساهمية يصبح من السهل لـإلكترون ذرة مجاورة الانتقال إلى تلك الفجوة تاركًا خلفه فجوة جديدة، ينتقل إليها إلكترون من ذرّة أخرى مجاورة وهكذا دواليك. تبدو الفجوات مثل شحنات موجبة تتحرك بعكس اتجاه حركة الإلكترونات، وعليه، يمكن افتراض أنّ الفجوات تشكّل تياراً كهربائيًّا يسري بعكس اتجاه حركة الإلكترونات كما في الشكل (17).

الشكل (17): التيار الناتج  
من الفجوات.



## أشبه الموصلات من النوع *n* والنوع *p*

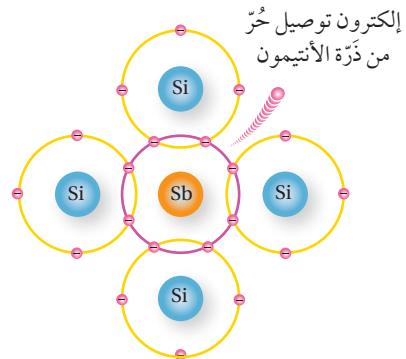
### *n*-type and *p*-type Semiconductors

أشبه الموصلات النقيّة لا توصل التيار الكهربائي جيداً، لكن يمكن زيادة موصليتها الكهربائية بإضافة بعض المواد إليها تُسمى شوائب Impurities، ويُطلق على تلك العملية **الإشبابة Doping**، حيث تضاف مادة إلى بلورة السليكون النقيّ تزيد عدد الإلكترونات الحرّة؛ فينتج من ذلك ما يُسمى البلورة السالبة نوع (*n*) أو *p*-type.

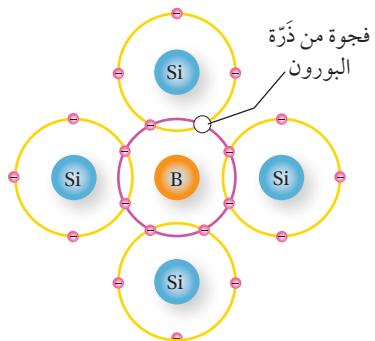
تضاف مادة تزيد عدد الفجوات ليتتج من ذلك بلورة موجبة نوع (*p*) *p*-type. لزيادة عدد الإلكترونات الحرّة في بلورة السليكون النقيّ، يُضاف إليها عنصر خماسي التكافؤ (يملك خمسة إلكترونات تكافؤ في غلافه الأخير) مثل الأنتيمون أو الفسفور أو الزرنيخ، وفي هذه الحالة تحلّ ذرّة أنتيمون (Sb) محلّ ذرّة سليكون مركزية، وتكون أربع روابط تساهمية مع أربع ذرات سليكون مجاورة لها، ويبقى إلكترون التكافؤ الخامس حرّاً على نحو ما يظهر في الشكل (18). ونتيجة لذلك يزداد عدد الإلكترونات التوصيل في بلورة السليكون، ويصبح أكثر من عدد الفجوات. وتُسمى البلورة في هذه الحالة بلورة سالبة أو بلورة من النوع (*n*).

أمّا لزيادة عدد الفجوات في بلورة السليكون، فيُضاف عنصر ثلاثي التكافؤ (يملك ثلاثة إلكترونات تكافؤ في غلافه الأخير) كالغالليوم أو البورون. وفي هذه الحالة تحلّ ذرّة البورون محلّ ذرّة سليكون مركزية، فترتبط بأربع ذرات سليكون مجاورة لها، وتشارك إلكتروناتها الثلاثة لتكوين ثلاث روابط تساهمية مع ثلات ذرات سليكون، أمّا الرابطة الرابعة، فينقصها إلكترون واحد، فتتشكل فجوة كما في الشكل (19)، وهذا يعني أنّ كلّ ذرّة بورون تضاف إلى بلورة السليكون تُنتج فجوة جديدة، فيزداد بذلك عدد الفجوات في بلورة السليكون، ويصبح عددها أكبر من عدد الإلكترونات التوصيل، وتُسمى البلورة في هذه الحالة بلورة موجبة، أو بلورة من النوع (*p*).

عند توصيل البلورة الموجبة (*p*) أو السالبة (*n*) بمصدر فرق جهد فإنّ تياراً كهربائياً يسري فيها، وهذا التيار يتتج من حركة الفجوات والإلكترونات، وتُسمى الفجوات والإلكترونات ناقلات التيار Current carriers. ولأنّ عدد الإلكترونات أكبر في البلورة السالبة، فإنّها تُسمى الناقلات الأغلبية Majority carriers وتُسمى الفجوات فيها الناقلات الأقلية Minority carriers. وبالمقابل، فإنّه في البلورة الموجبة تكون الفجوات هي الناقلات الأغلبية، والإلكترونات هي الناقلات الأقلية. وتجدر الإشارة هنا إلى أنّ الشحنة الكلية للبلورة تساوي صفرًا؛ لأنّها تتكون من ذرات متعادلة.



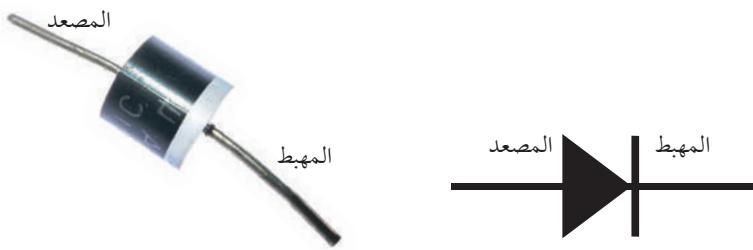
الشكل (18): إضافة عنصر خماسي التكافؤ مثل ذرّة أنتيمون (Sb) إلى بلورة السليكون. يصبح الإلكترون الزائد إلكترونًا حرّاً.



الشكل (19): إضافة ذرّة بورون (B) إلى بلورة السليكون وتكوين فجوة.

**أتحقق:** أوضح المقصود بناقلات التيار الأغلبية، وناقلات التيار الأقلية في البلورة الموجبة (*p*) والبلورة السالبة (*n*). ✓

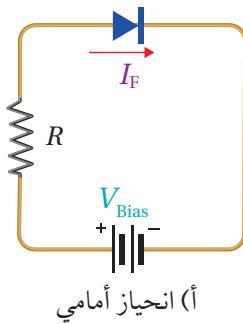
الشكل (20): الثنائي ورموزه في الدارات الإلكترونية.



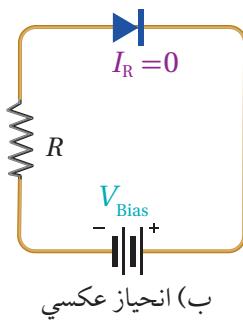
(أ) رمز الثنائي.  
(ب) الثنائي الأكثر استخداماً في الدارات الإلكترونية، حيث يمثل الطرف الذي رسم عليه خط أبيض المهبط.

## الثائي البلوري Diode

الثائي البلوري (Diode): وصلة تكون من بلورة من مادة شبه موصلة، جزؤها الأول من النوع ( $n$ )، وجزؤها الثاني من النوع ( $p$ )، ويرمز إليه في الدارات الإلكترونية بالرمز الموضح في الشكل (20/أ). حيث يسمى طرف الثنائي من النوع ( $n$ ) المهبط (K) Cathode، وطرفه من النوع ( $p$ ) المصعد (A) Anode. ويظهر الشكل (20/ب) شكل الثنائي الأكثر استخداماً في الدارات الإلكترونية، ويستخدم لتمرير التيار الكهربائي باتجاه واحد فقط.



أ) انحياز أمامي



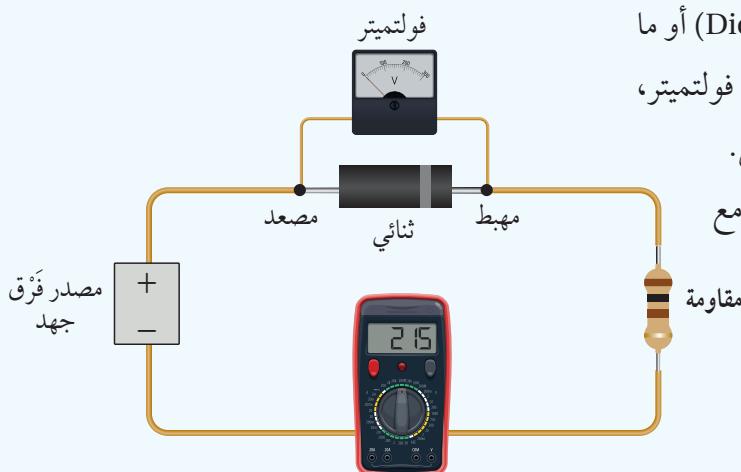
ب) انحياز عكسي

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

يسمى توصيل الثنائي بمصدر فرق جهد انحيازاً. وللانحياز حالتان الأولى: انحياز أمامي Forward bias، حيث يوصل الثنائي بمصدر فرق جهد (بطارية مثلاً)، 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 مادة البلورة؛ فعند درجة حرارة 25°C، يكون حاجز الجهد (0.7 V) في بلورة السليكون، في حين يساوي (0.3 V) في بلورة الجermanium. أما إذا كان فرق الجهد بين طرفي الثنائي أقل من حاجز الجهد، تكون قيمة التيار صغيرة جداً. إن 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 جداً، وهذا يؤدي إلى عبور تيار كهربائي صغير جداً يمكن عدّه صفراء ( $I_R = 0$ ). وإذا زاد فرق جهد المصدر على قيمة معينة، تسمى جهد الانهيار Breakdown voltage، فإن مقاومة الثنائي تنها، ويسري فيه تيار كبير يؤدي إلى تلفه.

### دراسة فرق الجهد والتيار الكهربائي في الثنائي البلوري



**المواد والأدوات:** ثنائي بلوري (Diode 1N4004) أو ما يكافئه، مصدر فرق جهد مستمر (15 V - 0)، فولتميتر، أميتر رقمي، مقاومة (10 kΩ)، أسلاك توصيل.

**إرشادات السلامة:** توخي الحذر عند التعامل مع مصادر التيار الكهربائي.

#### خطوات العمل:

أنفذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

- أركب الدارة كما في الشكل. الاحظ أن مهبط الثنائي متصل بالقطب السالب لمصدر فرق الجهد.
- الاحظ:** أبدأ من فرق جهد يساوي صفراء، ثم أرفع فرق الجهد تدريجياً بزيادة 0.1 V في كل مرة حتى أصل إلى فرق جهد 2 V.

3. أدون قراءات الفولتميتر والأميتر في الجدول.

4. أعيد مصدر فرق الجهد إلى وضع الصفر.

5. أعكس توصيل أقطاب المصدر ليتصل القطب الموجب للمصدر بمهبط الثنائي.

6. أعيد ضبط الأميتر حتى يستطيع قراءة تيار بالميكرو أميتر.

7. أرفع فرق جهد المصدر من (0) إلى 10 V بزيادة 1 V في كل مرة، وأدون قراءاتي الفولتميتر والميكرو أميتر في الجدول.

#### التحليل والاستنتاج:

1. **أتوقع:** في أي الحالتين كان توصيل الثنائي في وضعية الانحياز الأمامي؟ وفي أيهما كان في وضعية الانحياز العكسي؟

2. **أمثل بيانياً** العلاقة بين التيار الكهربائي المار في الثنائي وفرق الجهد بين طرفيه على أن يكون التيار الكهربائي على المحور  $u$ ، وفرق الجهد على المحور  $x$  باستخدام برمجية (Excel)، أو على ورق رسم بياني.

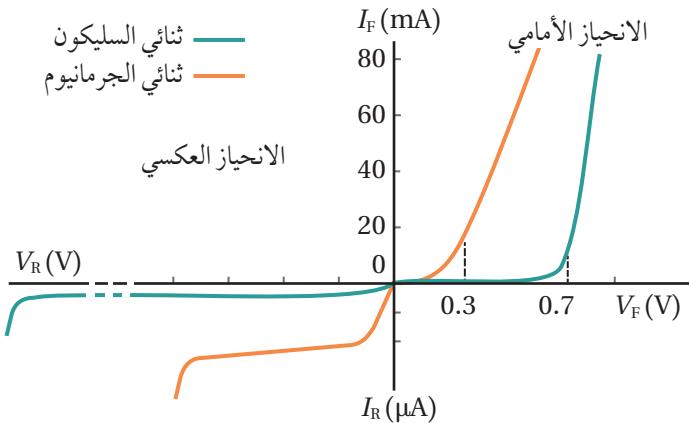
3. أحدد قيمة حاجز الجهد من منحنى ( $I-V$ ).

4. **أستنتج:** اختار 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 فرق الجهد والتيار المقيس في الخطوة (7).

6. **أقارن** بين مقاومة الثنائي في وضعية الانحياز الأمامي والانحياز العكسي.

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

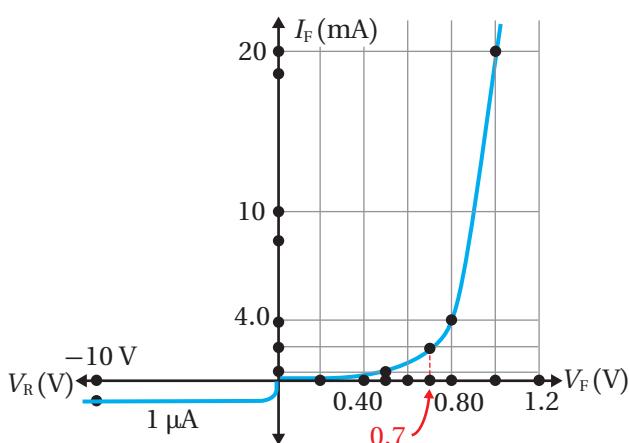


### مقاومة الثنائي البلوري Diode Resistance

لاحظت في التجربة السابقة أنّ مقاومة الثنائي تختلف باختلاف فرق الجهد بين طرفيه، وباختلاف طريقة توصيله بمصدر فرق الجهد. يوضح الشكل (22) التمثيل البياني لمنحنى ( $I-V$ ) لثنائي السليكون (Si) وثنائي الجرمانيوم (Ge)؛ فالعلاقة بين التيار وفرق الجهد للثنائي عموماً غير خطية، وقد سبق أنْ تعرّفْت ذلك في الوحدة الرابعة من هذا الكتاب، حيث وُصفت مقاومة الثنائي بأنّها لا أومية.

في حالة الانحياز الأمامي،لاحظ أنّ التيار يكون صغيراً عندما يكون فرق الجهد على طرفي الثنائي أقل من حاجز الجهد، وبزيادة فرق جهد المصدر إلى قيمة أعلى من حاجز الجهد، فإنّ زيادة قليلة في فرق الجهد تؤدي إلى زيادة كبيرة في التيار الكهربائي، ما يعني أنّ مقاومة الثنائي في وضعية الانحياز الأمامي صغيرة جدّاً. في حين أنه في وضعية الانحياز العكسي، يكون التيار الكهربائي صغيراً جدّاً (بالميكرو أمبير)، ما يعني أنّ مقاومة الثنائي كبيرة جدّاً.

### المثال 8



يبين الشكل (23) منحنى ( $I-V$ ) لثنائي السليكون في وضعية الانحيازين الأمامي والعكسي، معتمداً على الشكل والبيانات المثبتة عليه، (علمًا أنّ حاجز الجهد لثنائي السليكون (0.7 V)، وجهد المهبط يساوي صفرًا). أجد المقاومة المتوسطة لثنائي في الحالات الآتية:

- الانحياز الأمامي.
- الانحياز العكسي.

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

المعطيات: بيانات الشكل.

المطلوب:  $R_F = ?$ ,  $R_R = ?$

الحل:

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

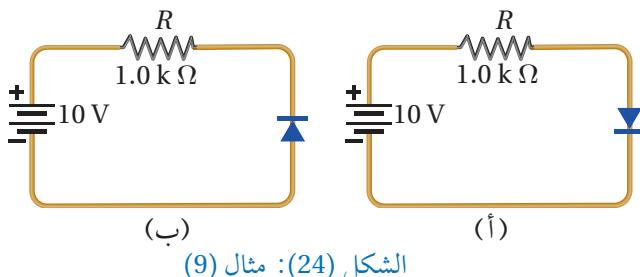
$$R_F = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1.0 - 0.80}{(20 - 4.0) \times 10^{-3}} = \frac{2.0 \times 10^2}{16} \approx 13 \Omega$$

ب. من المحنن أجد أن التيار قد تغير من (0) إلى (10 mA)، وتحسب المقاومة المتوسطة على النحو الآتي:

$$R_R = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{10 - 0}{1.0 \times 10^{-3} - 0} = 10 M\Omega$$

## المثال 9

اعتماداً على الدارة في الشكل (24)، علماً أن الثنائي مصنوع من مادة السليكون، والمقاومة الداخلية لمصدر فرق الجهد مهملة، أجد لكلاً من السكلين (أ) و (ب)، فرق الجهد على طرفي الثنائي، وفرق الجهد على طرفي المقاومة  $\Delta V_R$ ، والتيار الكهربائي المار في المقاومة، ومقاومة الثنائي.

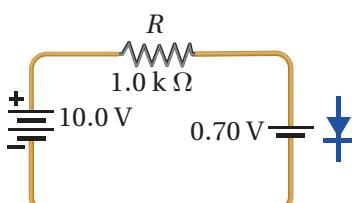


الشكل (24): مثال (9)

المعطيات: الشكل (24).

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

الحل:



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

الشكل (24/أ). نظراً إلى أن مهبط الثنائي متصل بالقطب السالب للبطارية، وجهد البطارية أكبر من حاجز الجهد للثنائي، فإن الثنائي في حالة انحياز أمامي، ويكون فرق الجهد على طرفيه ( $\Delta V_D = 0.7 V$ ) كما في الشكل (25)؛ لأن الثنائي مصنوع من السليكون.

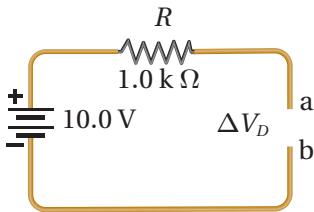
باستخدام قاعدة كيرتشوف الثانية أجد أن

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

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

مقاومة الثنائي عند هذه القيمة للجهد تساوي:

$$R_D = \frac{V_D}{I} = \frac{0.70}{9.3 \times 10^{-3}} = 75 \Omega$$



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

الشكل (24/ب)، ونظرًا إلى أن مصعد الثنائي متصل بالقطب السالب للبطارية، فإن الثنائي في حالة انحياز عكسي، ويعمل عمل مفتاح مفتوح (وكأنه مقاومة لانهائية)؛ كونه لا يمرر تياراً كهربائيًا، وأمثل الدارة كما في الشكل (26).

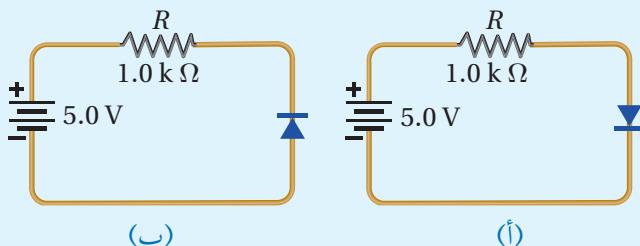
$$\Delta V_D = V_a - V_b = 10.0 \text{ V}$$

$$\Delta V_R = 0$$

$$I = 0$$

## لـمرين

**استخدم الأرقام:** اعتمادًا على الدارة الموضحة في الشكل (27) حيث إن الثنائي مصنوع من مادة الجermanيوم، وبإهمال المقاومة الداخلية للبطارية، أجد ما يأتي لكلا من الشكلين (أ) و (ب) :



الشكل (27): الانحيازان الأمامي والعكسبي لثنائي الجermanيوم.

1. فرق الجهد على طرفي الثنائي .

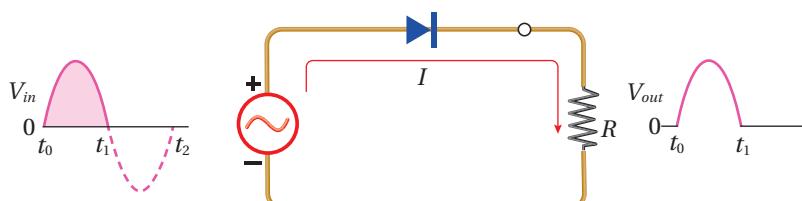
2. فرق الجهد على طرفي المقاومة .

3. التيار المار في المقاومة .

4. مقاومة الثنائي .

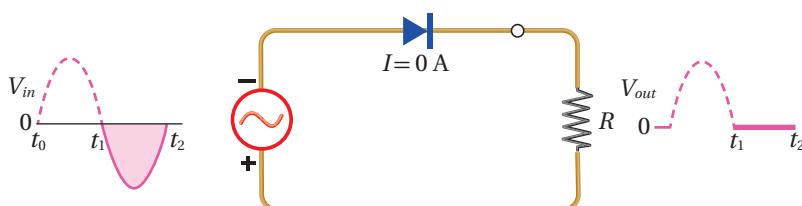
## الثاني مقوماً للتيار المتردد Diode as a Current Rectifier

تعلّمت سابقاً، أنّ المقاومات في المنازل تزوّدنا بتيار متردّد، وبعض الأجهزة الكهربائية تعمل بتيار مستمر. فكيف أحول التيار المتردّد إلى تيار مستمر؟ عند توصيل الثنائي بمصدر تيار متردّد كما في الشكل (28)، فإنّه يسمح لنصف الموجة التي تمثل جهداً موجباً بالعبور؛ لأنّ وصلة الثنائي تكون في حالة الانحياز الأمامي كما في الشكل (28/أ). أمّا النصف الثاني من الموجة، فيمثل جهداً سالباً وتكون وصلة الثنائي في حالة انحياز عكسي، وال الثنائي لا يسمح للنصف السالب من الموجة بالعبور كما في الشكل (28/ب). لذلك تكون الإشارة الناتجة على شكل موجة نصف جيبيّة باتجاه واحد (موجة فقط) كما في الشكل (28/ج)، وتُسمّى الدارة في الشكل (28) دارة تقويم نصف موجة Half wave rectifier وفي هذه الحالة يكون تردد الموجة الناتجة مساوياً لتردد الموجة الداخلة.



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

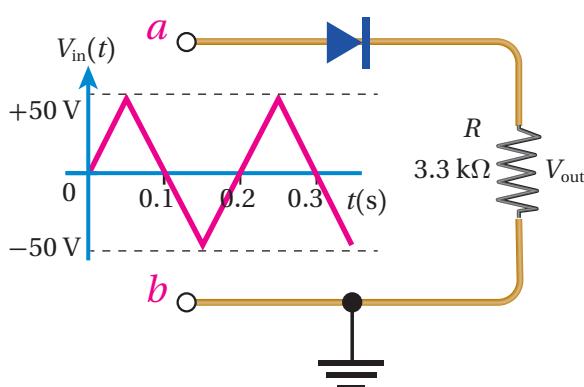
الشكل (28): الثنائي البلوري مقوم نصف موجة.



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



ج) الشكل النهائي للإشارة الناتجة.



الشكل (29): دارة مقوم نصف موجة.

يُمثّل الشكل (29) دارة مقوم نصف موجة، إذا كانت الموجة الكهربائية الدخلة مثلثة الشكل كما في الشكل، بافتراض أن الثنائي مثالي مقاومته مهملة، وبإهمال فرق الجهد بين طرفيه، أجب عما يأتي:

- في أي المدد الزمنية يكون الثنائي في حالة انحصار أمامي؟ وفي أيها يكون في حالة انحصار عكسي؟
- أرسم شكل الموجة الناتجة على المقاومة ( $R$ ).

المعطيات: الشكل (29).

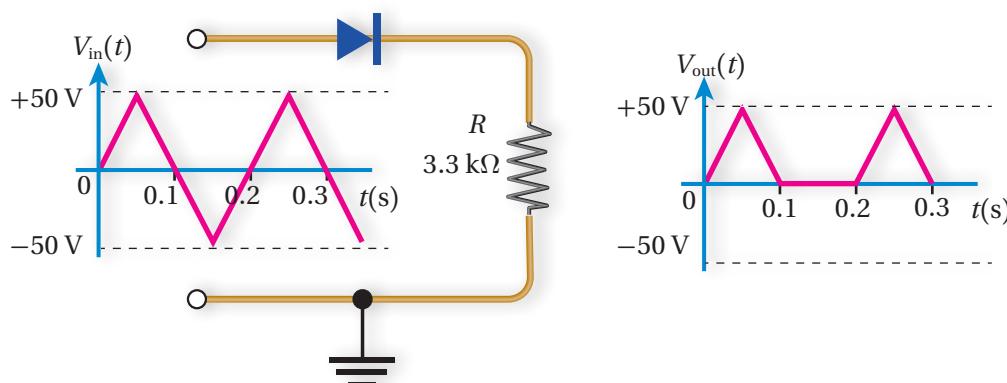
المطلوب: شكل الموجة الخارجة.

الحل:

أ. في المدة الزمنية ( $0-0.1 \text{ s}$ ) والمدة ( $0.2-0.3 \text{ s}$ ) يكون جهد النقطة (a) أكبر من جهد النقطة (b)، أي أن جهد مصعد الثنائي أكبر من جهد مهبطه، لذلك يكون الثنائي في حالة انحصار أمامي. أما في المدة الزمنية ( $0.1-0.2 \text{ s}$ ) فيكون جهد النقطة (a) أقل من جهد النقطة (b)، أي أن جهد مصعد الثنائي أقل من جهد مهبطه، لذلك يكون الثنائي في حالة انحصار عكسي.

ب. في المدة التي يكون فيها الثنائي في حالة انحصار أمامي يمرر الموجة الكهربائية، وأما في المدة التي يكون فيها الثنائي في حالة انحصار عكسي، فلا يمرر الموجة الكهربائية، ويكون شكل الموجة الخارجة على المقاومة ( $R$ ) كما في الشكل (30).

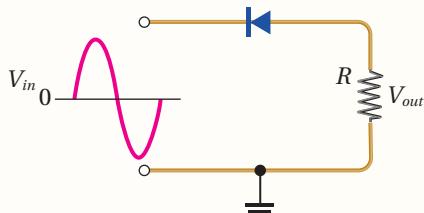
نلاحظ أن القيمة العظمى للموجة الناتجة على المقاومة ( $50 \text{ V}$ ) تساوي القيمة العظمى للموجة الدخلة، ويعود ذلك لافتراض أن الثنائي مثالي لا يوجد فرق في الجهد بين طرفيه.



الشكل (30): شكل الموجتين الدخلة والخارجية.

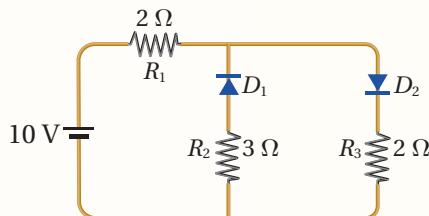
# مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أوضح المقصود بكل من: المواد شبه الموصلة، والإشبابة، والثنائي البلوري.



2. **أستنتاج:** اعتماداً على الدارة الموضحة في الشكل، أرسم شكل الموجة الناتجة إذا عكس الثنائي؟ أفسّر إجابتي.

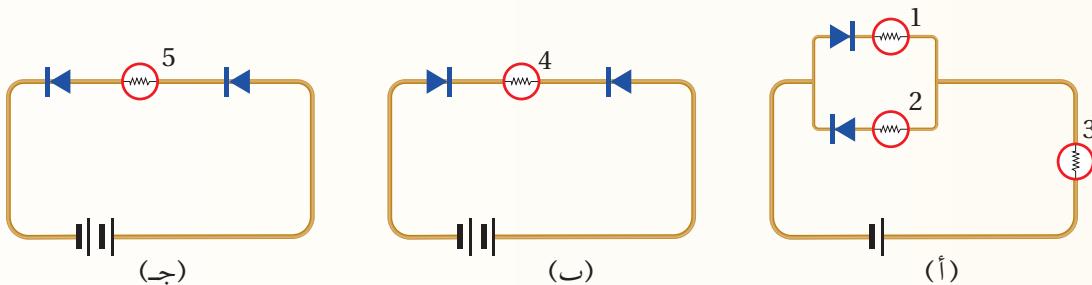
3. **استخدم الأرقام:** اعتماداً على الشكل، وبإهمال فرق الجهد على طرفي الثنائي في حالة الانحياز الأمامي:



- أ. أي الثنائيين في حالة انحياز أمامي؟، وأيهما في حالة انحياز عكسي؟  
ب. أجد التيار المار في كل مقاومة.

ج. إذا عكست أقطاب البطارية، أجد التيار المار في كل مقاومة.

4. **أستنتاج:** اعتماداً على الشكل التالي أي المصايد يضيء، وأيها لا يضيء؟



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

1. أي العبارات الآتية صحيحة لبلورة السليكون الموجبة:

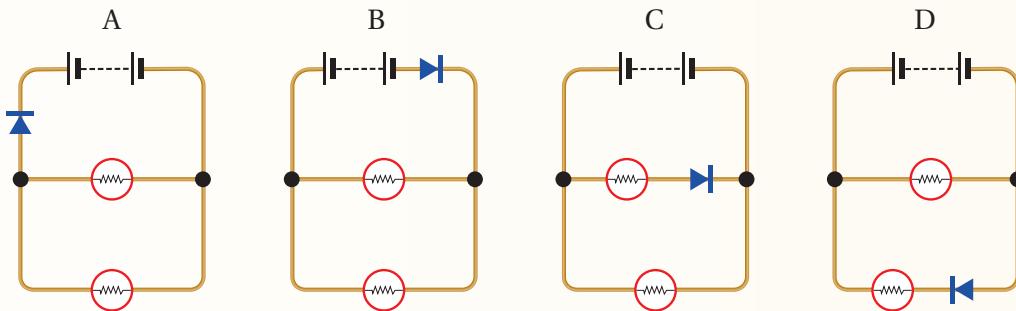
أ. تحتوي على فجوات فقط.

ب. عدد الفجوات فيها يساوي عدد إلكترونات التوصيل.

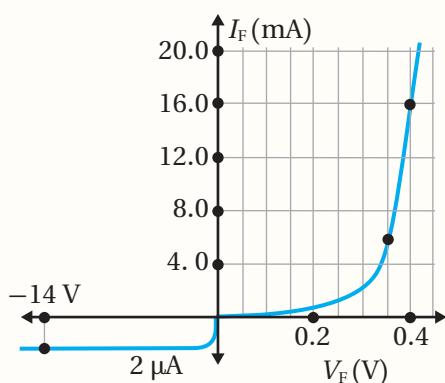
ج. عدد الفجوات أكبر من عدد إلكترونات التوصيل.

د. تحتوي على إلكترونات توصيل فقط.

2. في أي دارة من الدارات الأربع المبينة في الشكل المجاور سوف يضيء المصباحان معًا؟



- أ . الدارة (A) . ب. الدارة (B) . ج. الدارة (C) . د . الدارة (D) .

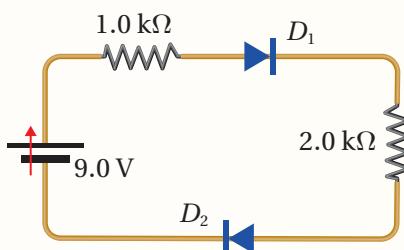


3. يبيّن الشكل المجاور العلاقة البيانية (V-I) بين التيار الذي يسري في ثنائي مصنوع من الجermanيوم وفرق الجهد بين طرفيه، بالاعتماد على بيانات الشكل، فإنّ القيمة التقريرية لمقاومة الثنائي في حالة الانحياز الأمامي بوحدة أوم ( $\Omega$ ) تساوى:

58.

0.2 . ٦

2



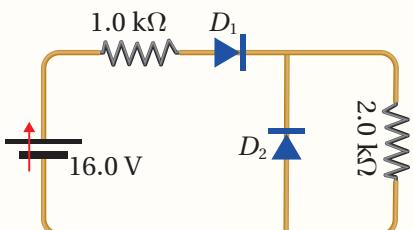
4. تصل بطارية مثالية بثنائيين من الجرمانيوم ومقاومنتين على التوالي كما هو مُبيّن في الشكل المجاور، مُعتمِداً على بيانات الشكل، فإنَّ التيار الذي يُسُرِّي في الدارة يُوَحدَ مليـ أمـير (mA) يساوي:

2.8.с

3.0. ١

0.2. 5

2.5  $\frac{1}{2}$



5. يبيّن الشكل المجاور دارة كهربائية تتكون من بطارية مثالية وثنائيين من السليكون ومقاومةً مُقاومتين، مُعتمِدًا على بيانات الشكل، فإنَّ التيار الذي يسري في المقاومة  $(2\text{ k}\Omega)$  بوحدة ملي أمبير  $(\text{mA})$  يساوي:

15.

## 5.1. ١

0.23 . 5

4.9. 

## تطور الدارات الإلكترونية

الترازستور Transistor هو أحد أهم عناصر الدارات الإلكترونية، ويدخل في تركيب الأجهزة الإلكترونية كلها، فالهاتف النقال يحتوي مئات الآلاف من الترازستورات، وكذلك الحاسوب وغيرهما من الأجهزة الإلكترونية.

يُصنَّع الترازستور من موادٍ شبه موصلة، مثل السليكون أو الجرمانيوم، وهو يشبه بذلك الثنائي البلوري، إلا أنه يتكون من ثلاثة طبقات. لقد أحدث اختراع الترازستور ثورة في الإلكترونيات، حيث أمكن عن طريقه إيجاد أجهزة صغيرة جدًا وأكثر دقة في أدائها. إذ كانت الدارات الإلكترونية تؤدي وظائفها باحتوائهما الصمامات الثنائية والثلاثية، عوضًا عن الثنائي والترازستور. لكنَّ الصمام كان كبير الحجم كما في الشكل، ويوَّلد حرارة ما يستدعي تبریدها للتخلص من الحرارة التي تؤثر سلباً في عملها.

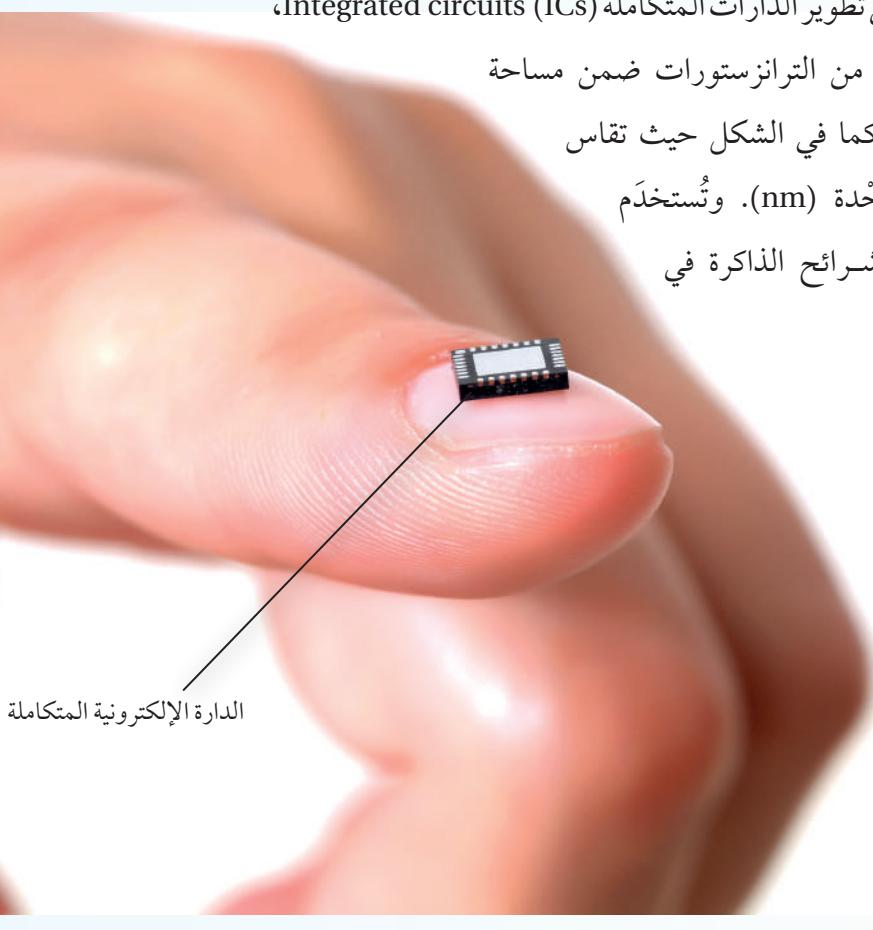
تُستخدم الترازستورات مفاتيح كهربائية مثالية؛ لأنَّها تُشغَّل وتنقِّل التشغيل بسرعة، وهذا يجعلها مثالية للدارات الرقمية، وتُستخدم الترازستورات في تضخيم التيار أو الجهد الكهربائي، فكانت بدايات استخدامه للتضخيم في الأجهزة السمعية المحمولة مثل المذياع، ثم استخدامه في الأنظمة والآلات الموسيقية وغيرها.

أدى تطوير الترازستور وتصغير حجمه إلى تطوير الدارات المتكاملة ICs، Integrated circuits، حيث تَجْمَع الواحدة منها عدداً كبيراً جدًا من الترازستورات ضمن مساحة صغيرة لا تتجاوز أبعادها بضعة مليمترات كما في الشكل حيث تقايس أبعاد الترازستور الواحد في الشريحة بواحدة nm. وتُستخدم الترازستورات والدارات المتكاملة في شرائح الذاكرة في أجهزة الحاسوب.

الصمام الإلكتروني (أنبوب أشعة مهبطية)



الترازستور



الدارة الإلكترونية المتكاملة

# مراجعة الوحدة

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

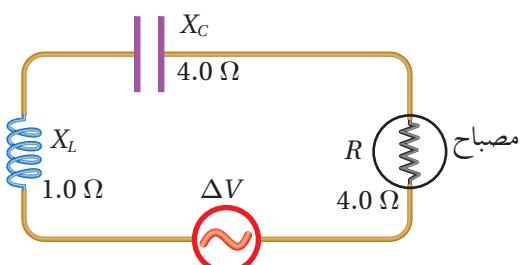
1. يدور ملفٌ مولّد كهربائي بتردد (60 Hz) فيزوجنا بفرق جهد متعدد. إذا كان فرق الجهد يساوي ( $8\sqrt{2}$  V) عند اللحظة ( $t = \frac{1}{480}$  s)، فإن القيمة العظمى لفرق الجهد بوحدة فولت (V) تساوي:

د. 48

ج. 32

ب. 24

أ. 16



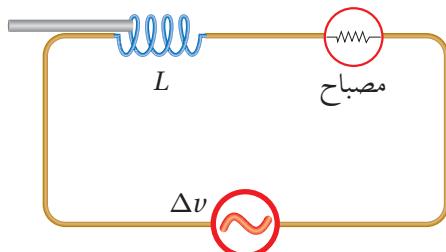
د. 7.9

ج. 4.0

ب. 2.5

أ. 1.0

2. دارة كهربائية يتصل فيها مصباح مقاومته  $R$  ومحثٌ ومواسع بمصدر فرق جهد متعدد كما في الشكل، فيسري فيها تيار فعال (2.0 A). إذا زاد تردد مصدر فرق الجهد إلى مثلي ما كان عليه، فإن التيار الفعال في الدارة بوحدة أمبير (A) يصبح:



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

- أ. تزداد، تزداد.  
ب. تقل، تزداد.  
ج. تزداد، تقل.

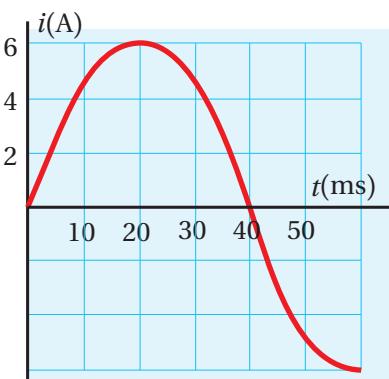
4. يمكن التعبير عن نسبة المعاوقة الممحثية إلى المعاوقة المواتية في دارات التيار المتعدد بإحدى العلاقات الآتية:

$$d. \frac{L}{\omega^2 C}$$

$$ج. \frac{LC}{\omega^2}$$

$$ب. \frac{\omega^2}{LC}$$

$$أ. \omega^2 LC$$



5. الشكل البياني المجاور يمثل تغير التيار المتعدد بالنسبة إلى الزمن، إن التيار اللحظي يعبر عنه بإحدى العلاقات الآتية:

- ب.  $i = 6 \sin 40 \pi t$       أ.  $i = 6 \sin 40 t$   
د.  $i = 6 \sin 25 \pi t$       ج.  $i = 6 \sin 12.5 \pi t$

6. يعبر عن فرق الجهد المتعدد بالعلاقة ( $\Delta v = V_{\max} \sin 3 \pi t$ ). عند أي لحظة زمنية تكون القيمة اللحظية لفرق الجهد المتعدد مساوية لنصف قيمته العظمى؟

$$د. \frac{6}{18} \text{ s}$$

$$ج. \frac{3}{18} \text{ s}$$

$$ب. \frac{2}{18} \text{ s}$$

$$أ. \frac{1}{18} \text{ s}$$

7. دارة (AC) تتصل فيها مقاومة ( $4.8 \Omega$ ) على التوالي مع محث محااته ( $40 \text{ mH}$ ) ومواسع ومصدر فرق جهد متعدد قيمته الفعالة ( $24 \text{ V}$ ) وتردد الزاوي ( $400 \text{ rad/s}$ ). مقدار المواسعة بوحدة ( $\mu\text{F}$ ) التي تجعل التيار الفعال في الدارة ( $2.0 \text{ A}$ ) مما يأتي هو:

د.  $5.0 \times 10^{-2}$

ج. 5.0

ب.  $5.0 \times 10^1$

أ.  $5.0 \times 10^2$

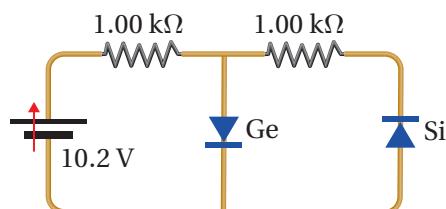
8. ما مقدار مقاومة متصلة بمصدر فرق جهد متعدد قيمته العظمى ( $69 \text{ V}$ ، عندما يسري فيها تيار متعدد قيمته الفعالة ( $3.5 \text{ A}$ )؟

د.  $28 \Omega$

ج.  $20 \Omega$

ب.  $14 \Omega$

أ.  $7 \Omega$



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

د. 10.5

ج. 10.2

ب. 9.90

أ. 9.50

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 ( $3.0 \text{ V}$ ) ويتصل بمقاومة تستهلك قدرة كهربائية ( $18 \text{ W}$ )، فإن مقدار التيار في الملف الابتدائي بوحدة أمبير (A) يساوي:

د. 0.5

ج. 2.0

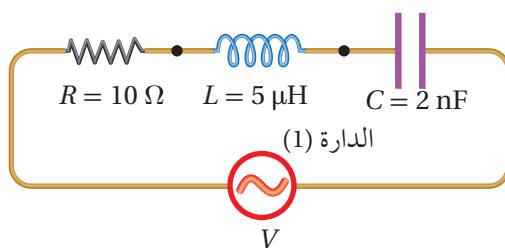
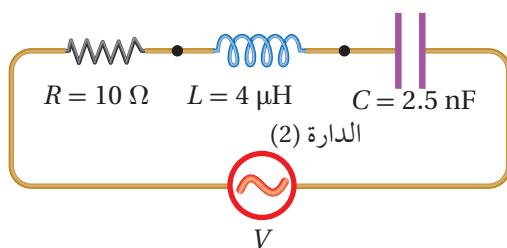
ب. 6.0

أ. 18

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

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

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



- أ. الدارたن 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.  
 ج. الدارたن في حالة رنين ويمر فيهما التيار الفعال نفسه.  
 د. الدارたن ليستا في حالة رنين؛ لأن تردد المصدر لا يتفق مع التردد الطبيعي لأي منهما.

# مراجعة الوحدة

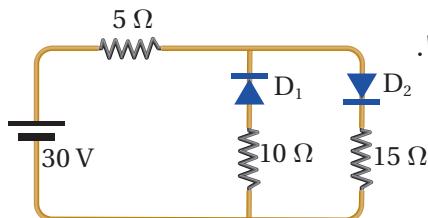
13. دارة تتكون من مقاومة ( $40.0 \Omega$ ) ووصلت مع مصدر فرق جهد متعدد. إذا علمت أن الزمن الدوري لمصدر فرق الجهد ( $\frac{1}{60.0} \text{ s}$ )، والقدرة الكهربائية المتوسطة المستهلكة في المقاومة ( $1210 \text{ W}$ ) فإن الاقتران الذي يعبر فرق الجهد المتعدد بين طرفي المقاومة بدلالة الزمن هو:

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

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

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

ج.  $\Delta v_R = 311 \sin (60 \pi t)$



14. في الدارة المبينة في الشكل المجاور الثنائيان مصنوعان من المادة نفسها.

عند عكس أقطاب البطارية فإن التيار المار في المقاومة ( $5 \Omega$ ):

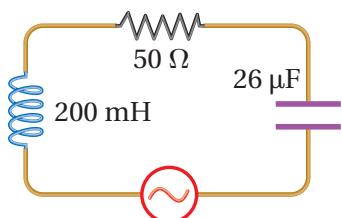
أ. يزداد.

ب. لا يتغير.

ج. يقل.

د. يصبح صفرًا.

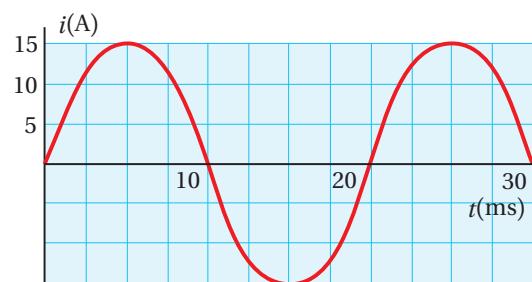
2. **أمثل البيانات:** القيمة الفعالة لفرق الجهد الكهربائي المتردد في الأردن ( $230 \text{ V}$ ), وتردد ( $50 \text{ Hz}$ ). أمثل فرق الجهد المتردد بمنحنى بياني، مبيناً عليه تدرج الزمن والقيمة العظمى لفرق الجهد.



3. **استخدم الأرقام:** دارة ( $RLC$ ) تحتوي مقاومة ومحثًا ومواسعاً مبيئاً قيمها في الشكل المجاور، تتصل بمصدر فرق جهد متعدد قيمته العظمى ( $210 \text{ V}$ ), وتردد ( $50 \text{ Hz}$ ). أحسب القيمة العظمى للتيار المتردد.

4. **أستنتج:** تحتوي دارة استقبال في جهاز مذيع مقاومة ( $120 \Omega$ ), ومحثًا محااته ( $0.20 \text{ mH}$ ), ومواسعاً متغير المواسعة. يمكن ضبط الدارة لكي تستقبل موجات بترددات مختلفة، عن طريق إحداث الرنين. أحدد مجال القيم التي تتغير بينها مواسعة المواسع لاستقبال مدى الترددات ( $550 \text{ kHz} - 1650 \text{ kHz}$ ).

5. **استخدم البيانات:** أجد ما يأتي، معتمداً على العلاقة البيانية المجاورة لغير التيار الذي يسري في دارة (AC) تحتوي مقاومة فقط مقدارها ( $40 \Omega$ ):



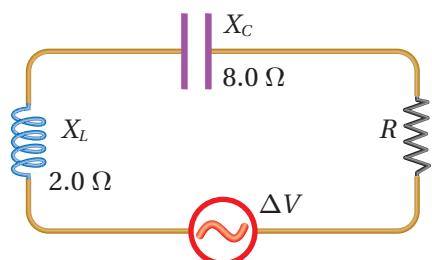
أ. القيمتين العظمى والفعالة للتيار.

ب. التردد الزاوي للتيار.

ج. القيمة الفعالة لفرق الجهد.

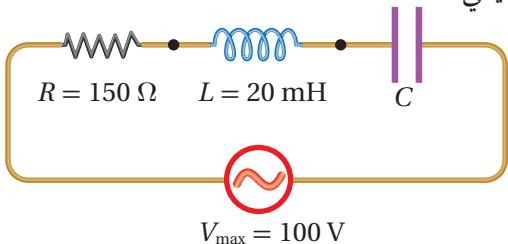
د. القدرة الكهربائية المتوسطة المستهلكة في المقاومة.

6. **استخدم الأرقام:** تتكون دارة ( $RLC$ ) من مواسع مواسعته ( $5.1 \mu\text{F}$ ) ومحث محاثته ( $50 \text{ mH}$ ) ومقاومة ( $24 \Omega$ ) وأمير و مصدر فرق جهد قيمته العظمى ( $178 \text{ V}$ ) وتردد الزاوي ( $1400 \text{ rad/s}$ ) أحسب قراءة الأمبير.



7. **استخدم الأرقام:** يبين الشكل المجاور دارة تتصل فيها مقاومة ( $R$ ) ومحث ومواسع بمصدر فرق جهد متعدد قيمته الفعالة ( $20 \text{ V}$ ), فيسري فيها تيار قيمته الفعالة ( $2 \text{ A}$ ). إذا ازداد التردد الزاوي لمصدر فرق الجهد إلى أربعة أمثال، فكم تصبح القيمة الفعالة للتيار في الدارة؟

8. **استخدم الأرقام:** يبين الشكل دارة (RLC) تتصل مع مصدر فرق جهد متعدد تردد الزاوي (5000 rad/s)، معتمداً على القيم المثبتة في الشكل، فإذا علمت أن الدارة في حالة رنين مع المصدر أحسب ما يأتي:

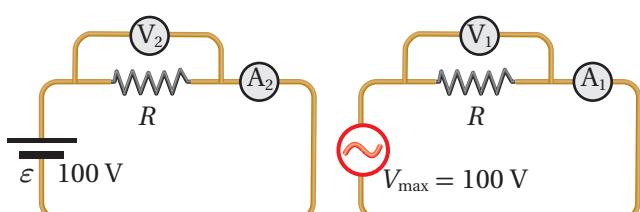


أ. مواسعة المواسع.

ب. المعاوقة الكلية للدارة.

ج. التيار الفعال المار في الدارة.

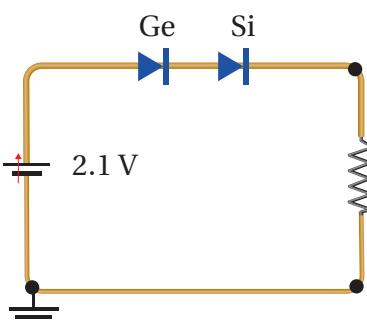
9. **أقارن:** يبين الشكل المجاور دارة تيار متعدد، وأخرى للتيار المستمر، معتمداً على القيم المثبتة في الشكل، وإذا علمت أن البطارية مثالية وقيمة المقاومة ( $R$ ) متساوية في الدارتين، أقارن بين قراءتي كل من الأميتر والفولتميتر في الدارتين، موضحاً إجابتي.



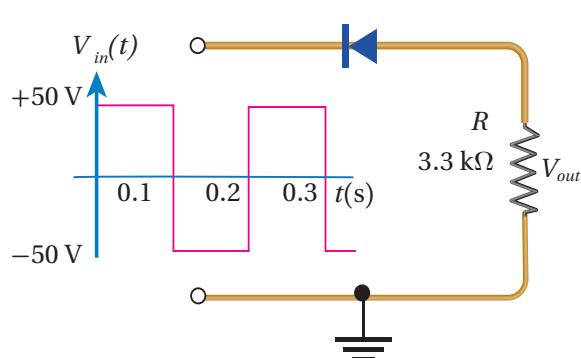
10. **استنتج:** في الدارة المبينة في الشكل المجاور، المقاومة الداخلية للبطارية مهملة، وقراءة الفولتميتر (6 V)، والمقاومات الثلاثة متساوية، وبإهمال فرق الجهد بين طرفي الثنائي عندما يكون في حالة انحياز أمامي، أجيب عن السؤالين الآتيين:

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. **استخدم الأرقام:** وُصل ثنائيان من السليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) على التوالي بمقاومة على نحو ما هو مبيّن في الشكل المجاور، اعتماداً على البيانات المثبتة على الشكل أجد مقاومة كل من ثنائي السليكون وثنائي الجermanيوم في الوضعية المبينة في الشكل.



12. **استنتاج:** اعتماداً على البيانات الموضحة على الشكل المجاور وبافتراض أن الثنائي مثالي:

أ. أمثل بيانياً الإشارة الخارجة ( $V_{out}$ ) بالنسبة إلى الزمن.

ب. إذا استخدمت مصباحاً بدلاً من المقاومة، أجد عدد المرات التي سيضيء فيها المصباح في الثانية الواحدة.

# الفيزياء الحديثة

Modern Physics

# الوحدة

7

## أتأمل الصورة

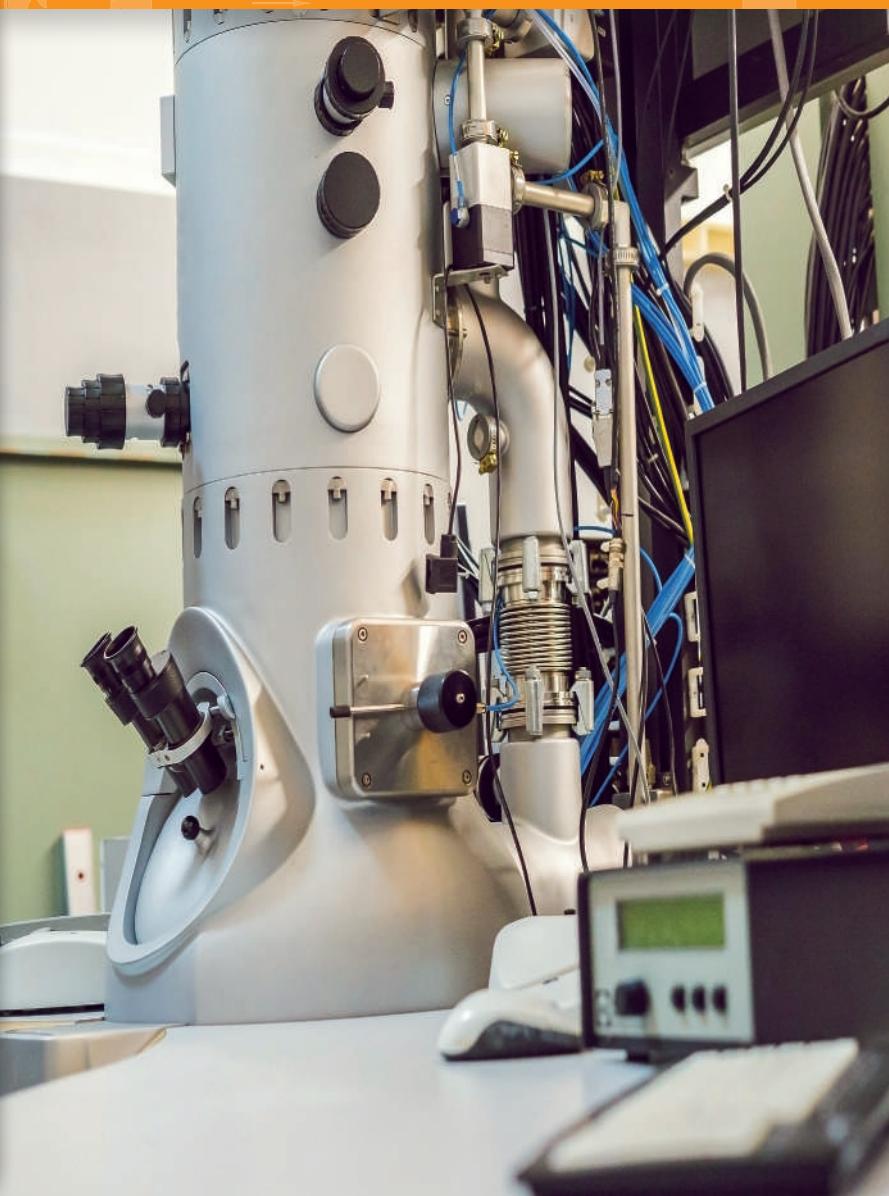
### الفيزياء والطاقة

تحوّل الخلايا الشمسية الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. والشكل أعلاه يبيّن محطة شمس معان للطاقة الشمسية، التي أُنشئت في مدينة معان عام 2016، وهي من أكبر مشاريع الطاقة الشمسية في الأردن، واستُخدم في تصميمها 600 ألف لوح من الخلايا الشمسية.

هل توجد شروط يجب توافرها في المناطق التي تُبني 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 نجاحاً كبيراً في تفسير ظواهر فيزيائية، ترتبط بسلوك المادة على المستوى دون الجاهري.



### الدرسُ الأولُ: الطبيعةُ الجُسيميةُ للضوء Particle Nature of Light

**الفكرةُ الرئيسةُ:** للضوء طبيعة جُسيمية إضافةً إلى طبيعته الموجية، وفهمنا الطبيعة الجُسيمية للضوء مكّناً من فهم الظواهر المتعلقة بالجُسيمات الذرّية دون الذرّية (دون الجاهريّة) فهماً أعمق.

### الدرسُ الثاني: التركيبُ الذريُ Atomic Structure

**الفكرةُ الرئيسةُ:** تتكونُ الذرّة من نواة موجبة الشحنة، تتحرّك حولها إلكترونات سالبة الشحنة، تحتلّ مستويات طاقة غير متّصلة (مُكّمة)، وفهمنا هذا التركيب أدى إلى تطوير تكنولوجيا متطرّفة أسهمت في تسهيل سبل الحياة، واكتشافات علمية جديدة.

# تجربة استهلاك الله

## العلاقة بين درجة حرارة الجسم والاشعاع الصادر عنه

**المواد والأدوات:** موقد بنسن، سلك فلزّي، ملقط، قفازان سميكان، نظّارة واقية للعينين.

**إرشادات السلامة:** ارتداء القفازين واستخدام النظارات الواقية للعينين، وتوخي الحذر عند استخدام الغاز وموقد بنسن.

### خطوات العمل:

أنفذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

1 أشعّل موقد بنسن بمساعدة معلّمي / معلّمتى، وأحمل السلك الفلزّي بالملقط، ثم أضعه فوق الموقد.

2 **الاحظ** لون الورج الصادر عن السلك في أثناء تسخينه، واستمر بالتسخين حتى أحصل على وهج لونه أبيض.

3 أدون لون الورج الصادر عن السلك مع مرور الزمن حتى الحصول على وهج لونه أبيض.

### التحليل والاستنتاج:

1. ما ألوان الورج الصادرة عن السلك التي شاهدتها؟

2. **استنتاج:** لماذا تغيّر لون الورج مع مرور الزمن؟ وهل لذلك علاقة بدرجة حرارة الجسم؟



### الحاجة إلى الفيزياء الحديثة The Need for Modern Physics

تطور علم الفيزياء الكلاسيكية على يد كثيرون من العلماء، مثل غاليليو Galileo الذي اهتم بدراسة الأجسام الساكنة والمتحركة، ونيوتون Newton الذي وضع ثلاثة قوانين في الحركة، وهذا ما درسته في صفوف سابقة. وتعد النظرية الكهرومغناطيسية من مجالات الفيزياء الكلاسيكية المهمة، طورها العالم الإنجليزي ماكسويل Maxwell، وتصف الضوء بأنه موجات كهرومغناطيسية، ونجحت هذه النظرية في تفسير كثيرون من الظواهر المتعلقة بالضوء كالحيود، والتدخل، والانعكاس، والانكسار.

لكن، في بدايات القرن العشرين، اكتُشفت ظواهر فيزيائية جديدة لم تستطع الفيزياء الكلاسيكية تفسيرها، مثل إشعاع الجسم الأسود، والظاهرة الكهرومغناطيسية، ظاهرة كومبتون، وتركيب الذرات والأطيف الخطية المنبعثة عنها، التي سأدرسها لاحقاً في هذه الوحدة. إن الحاجة إلى تفسير هذه الظواهر أدت إلى نشوء علم الفيزياء الحديثة، ويندرج تحتها علم فيزياء الكم الذي يعني بدراسة أنظمة الجسيمات الذرية ودون الذرية (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 كهرومغناطيسية، ويعتمد إشعاع جسم للطاقة على درجة حرارته وطبيعة سطحه. وقد لاحظت في التجربة الاستهلالية أنّ لون توهج السلك تغير مع ارتفاع درجة حرارته، بدءاً من اللون الأحمر مروراً بالأصفر وانتهاءً باللون الأبيض.

لفهم الإشعاع الحراري المنبعث من جسم، طور العلماء مفهوم **الجسم الأسود Blackbody** وهو جسم مثاليّ يمتصّ الأشعة الكهرومغناطيسية الساقطة عليه كلها بغضّ النظر عن تردداتها، ويُشعّها كلها بالكفاءة نفسها، ويعتمد اباعث الأشعة منه على درجة حرارته فقط. وأطلق عليه اسم الجسم الأسود؛ لأنّ الجسم الذي يمتصّ الأشعة الساقطة عليه جميعها يكون لونه أسود. والشكل (1) يوضح تصوّراً للجسم الأسود بأنه ثقب صغير في جسم أحجوف، والأشعة التي تدخل الجسم من خلال الثقب تُمتصّ امتصاصاً كاملاً.

الفكرة الرئيسية:

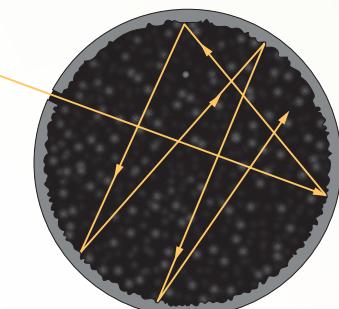
للضوء طبيعة جسيمية إضافة إلى طبيعته الموجية، وفهمنا الطبيعة الجسيمية للضوء مكّننا من فهم الظواهر المتعلقة بالجسيمات الذرية ودون الذرية (دون الجاهريّة) فهماً أعمق.

تتاجُنُ التعلم:

- أصف إشعاع الجسم الأسود.
- أستخدم فرضية بلانك في تفسير إشعاع الجسم الأسود.
- أشرح الظاهرة الكهرومغناطيسية.
- أفسّر العلاقة بين الطاقة الحرارية العظمى للإلكترونات المتحررة من سطح الفلز وتردد الضوء الساقط عليه.
- أشرح ظاهرة كومبتون.
- أحّلّ مسائل حسابية على الظاهرة الكهرومغناطيسية وظاهرة كومبتون.

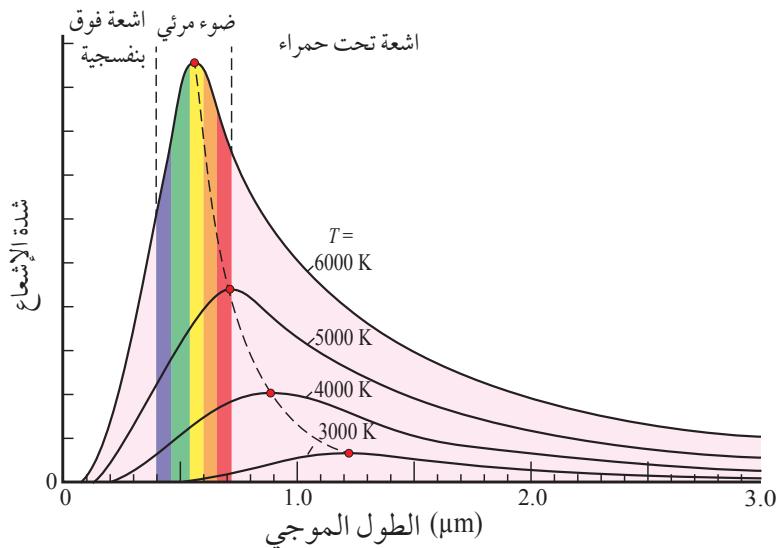
المفاهيم والمصطلحات:

Blackbody	الجسم الأسود
	الظاهرة الكهرومغناطيسية
Photoelectric Effect	
Photoelectrons	الإلكترونات الضوئية
Stopping Potential	جهد الإيقاف
Threshold Frequency	تردد العتبة
Work Function	اقتران الشغل للفلز



الشكل (1): الجسم الأسود يمتصّ الأشعة الساقطة عليه كلّها.

الشكل (2): منحنى إشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة. بين الشكل منطقة الأشعة تحت الحمراء، ومنطقة الضوء المرئي، ومنطقة الأشعة فوق البنفسجية.



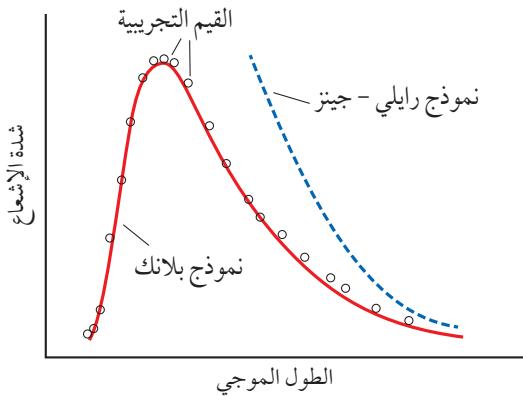
تعرف شدة الإشعاع بأنها الطاقة التي يشعها الجسم في الثانية الواحدة لكل وحدة مساحة عند طول موجي معين. ويوضح الشكل (2) منحنى إشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة. من المحنى نستنتج الأمور الآتية:

- عند درجة (3000 K) معظم الإشعاع المنبعث من الجسم يقع في منطقة الأشعة تحت الحمراء، وبزيادة درجة الحرارة تصدر عن الجسم إشعاعات في مناطق الأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي، والأشعة فوق البنفسجية.
- بزيادة درجة الحرارة تزداد قمة منحنى شدة الإشعاع نحو الأطوال الموجية القصيرة (الترددات العالية)، وعند درجة (6000 K) تكون قمة المحنى في منطقة الضوء المرئي.
- المساحة تحت المحنى تمثل الطاقة الكلية المنبعثة من سطح الجسم في الثانية الواحدة لكل وحدة مساحة.

استخدم العالمان رايلى وجينز Rayleigh and Jeans الفيزياء الكلاسيكية في تفسير منحنى إشعاع الجسم الأسود، حيث ترتكز الفيزياء الكلاسيكية على أن الأجسام تُشع الطاقة، وتمتصها بأي مقدار وعند أي تردد؛ أي أن امتصاص الطاقة وإشعاعها يكون متصلًا Continuous. وقد أظهر نموذج رايلى - جينز توافقًا مقبولًا مع النتائج التجريبية في منطقة الأطوال الموجية الكبيرة (الأشعة تحت الحمراء)، في حين أظهر عدم توافق في منطقة الأطوال الموجية القصيرة (الأشعة فوق البنفسجية) كما في الشكل (3)، حيث تؤول شدة الإشعاع بحسب نموذج رايلى - جينز إلى الانهيار 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 رايلى - جينز صحيحًا، لتوهج السلك في التجربة الاستهلالية باللون الأزرق بدلاً من اللون الأبيض عند درجات الحرارة المرتفعة.

### الربط بعلوم الفضاء

درجة حرارة سطح الشمس تصل إلى  $6000\text{ K}$  تقريبًا، حيث إن الشمس تشع طاقة في مناطق الطيف الكهرومغناطيسي كلها، ولكن أكبر قيمة لشدة إشعاع الشمس تقع في منطقة الضوء المرئي كما في الشكل (2). المساحة تحت المحنى تمثل الطاقة الكلية المشعة في الثانية الواحدة لكل وحدة مساحة؛ لذا فإن الشمس تشع 40% تقريبًا من الطاقة في منطقة الضوء المرئي.



الشكل (3): مقارنة نموذج رايلي-جيتر  
ونموذج بلانك بالنتائج التجريبية للإشعاع  
الجسم الأسود.

### تفسير ماكس بلانك لإشعاع الجسم الأسود: تكمية الطاقة

#### Planck's Interpretation of Blackbody Radiation: Energy Quantization

عام 1900 تمكّن العالم ماكس بلانك Max Planck من وضع صيغة رياضية تصف شدة الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود، وتطابقت حساباته مع النتائج التجريبية تماماً كما في الشكل (3). افترض بلانك أنّ الأشعة الصادرة عن الأجسام ناتجة من مُتذبذبات Oscillators (الإلكترونات في الذرات مثلاً)، وأنّ هذه المتذبذبات تشع الطاقة أو تمتّصها بكميات محدّدة وغير متصلة، وهذا يخالف تماماً الفيزياء الكلاسيكية التي تفترض أنّ تلك المتذبذبات تشع الطاقة أو تمتّصها بأيّ مقدار؛ أيّ على نحوٍ متّصل.

وَفقاً لفرضية بلانك، فإنّ الطاقة التي تشعّها الأجسام أو تمتّصها عند تردد معين تكون عدداً صحيحاً من مضاعفات طاقة الحزمة (الكمة) الواحدة، وطاقة الكمة الواحدة يُعبّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$E = hf$$

حيث  $h$  ثابت بلانك وقيمه  $(6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s})$ ، و  $f$  تردد الموجة. عند تردد معين، فإنّ طاقة الأشعة الكهرمغناطيسية التي يشعّها جسم أو يمتّصها يُعبّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$E_n = nhf$$

حيث  $n$  عدد صحيح موجب. وبذلك، فإنّ طاقة الأشعة الصادرة عن جسم عند التردد  $f$  يمكن أن تأخذ قيمًا غير متصلة، مثل:

$$hf, 2hf, 3hf, 4hf, \dots$$

وهذا ما يعرف بمبدأ تكمية الطاقة Energy quantization.

لم يكن من السهل حينئذ قبول مبدأ تكمية الطاقة بحسب فرضية بلانك، ولكن صحة هذه الفرضية ترسّخت بنجاح العالم أينشتين Einstein عام 1905 في تفسير الظاهرة الكهرضوئية، مُعتمداً على فرضية بلانك في تكمية الإشعاع الكهرمغناطيسية، وأصبحت نقطةً مهمةً في انطلاق ما يُعرف في وقتنا الحالي بفيزياء الكم.

✓ أتحقق: أذكر فرضية ماكس بلانك في تكمية الطاقة.

✓ أتحقق: في أيّ مناطق الطيف الكهرمغناطيسى نجح نموذج رايلي-جيتر في تفسير إشعاع الجسم الأسود؟

✓ أفكّر: في التجربة الاستهلاكية، مع زيادة درجة حرارة السلك بدأ يشع باللون الأحمر، ثم الأصفر، ثم الأبيض. فلماذا تغيّر لون التوهج إلى الأبيض؟

## المثال 1

جسم ساخن بدرجة حرارة معينة، ومعظم الأشعة الصادرة عنه ترددتها يساوي ( $f = 1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}$ )، أجد طاقة الكمة الواحدة من الإشعاع عند هذا التردد.

المعطيات:  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ,  $f = 1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}$

المطلوب:  $E = ?$

الحلّ:

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 1.00 \times 10^{15} = 6.63 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ومن العجيز بالذكر أنَّ وحدة قياس الطاقة المستخدمة في الفيزياء الذرية هي الإلكترون فولت (eV) 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 أشعة سينية ترددتها ( $4.20 \times 10^{18} \text{ Hz}$ )

المعطيات:  $f = 4.20 \times 10^{18} \text{ Hz}$ ,  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

المطلوب:  $E = ?$

الحلّ:

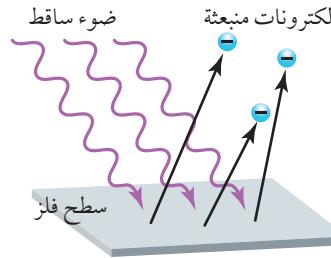
$$\begin{aligned} E = hf &= 6.63 \times 10^{-34} \times 4.20 \times 10^{18} \\ &= 2.78 \times 10^{-15} \text{ J} = 2.78 \times 10^{-15} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 17 \text{ keV} \end{aligned}$$

## لديه

**استخدم الأرقام:** مصدر أشعة تحت حمراء طولها الموجي (700nm). إذا كان عدد الفوتونات المنبعثة من المصدر في الثانية الواحدة ( $1.41 \times 10^{21}$ ) فوتون، أحسب الطاقة الكلية الصادرة عن المصدر في الثانية.

## الظاهرة الكهرومagnetية Photoelectric Effect

لاحظ العالم هيرتز Hertz في تجاربها عام 1887 أن الشارة الكهربائية تحدث على نحو أسرع في جهاز الإرسال الخاص به عند تعریضه لأشعة فوق البنفسجية. تبيّن في ما بعد أن سبب ذلك هو انبعاث إلكترونات من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع كهرومغناطيسي بتردد مناسب عليه كما في الشكل (4)، وسمّي هذه الظاهرة **بالظاهرة الكهرومagnetية Photoelectric effect** وسمّي الإلكترونات المنبعثة **إلكترونات الضوء Photoelectrons** ولكي أتعرّف الظاهرة الكهرومagnetية على نحو أكثر، أُنفّذ التجربة الآتية:

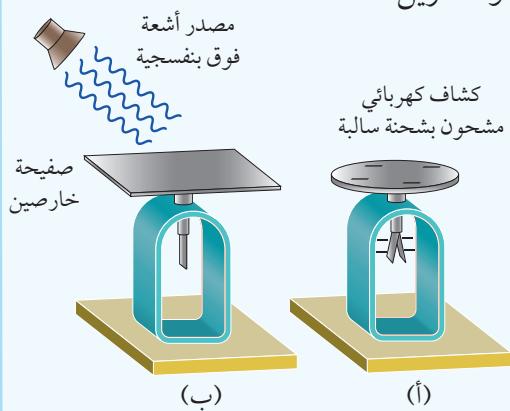


الشكل (4): انبعاث الإلكترونات من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع بتردد مناسب على سطحه.

### التجربة ١

**المواد والأدوات:** صفيحة خارصين، كشاف كهربائي، مصدر أشعة فوق البنفسجية، مصدر ضوء أحمر، قضيب من الزجاج، قطعة من الحرير، ورق صنفية، نظارة واقية، قفازان.

**إرشادات السلامة:** ارتداء المعطف واستخدام النظارة الواقية للعينين والقفازين.



**خطوات العمل:**

أُنفّذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

١. أصلّ صفيحة الخارصين بورق الصنفية.

٢. **الاحظ:** أشحن الكشاف الكهربائي بالحث مُستخدماً قضيب زجاج ذلك بقطعة من الحرير، ثم ألاحظ انفراج ورقتي الكشاف الكهربائي كما في الشكل (أ).

٣. أضع صفيحة الخارصين فوق قرص الكشاف الكهربائي كما في الشكل (ب).

٤. **الاحظ:** أسلّط الضوء الأحمر على صفيحة الخارصين، وأراقب ما يحدث لورقتي الكشاف الكهربائي.

٥. **الاحظ:** أسلّط كمية أكبر من الضوء الأحمر (باستخدام المصدر الإضافي للضوء الأحمر) على صفيحة الخارصين، وأراقب ما يحدث لورقتي الكشاف الكهربائي.

٦. أُعيد الخطوة (٤) باستخدام الأشعة فوق البنفسجية.

**التحليل والاستنتاج:**

١. **أتوقع:** هل تغير انفراج ورقتي الكشاف عند استخدام مصدر الضوء الأحمر؟ ماذا أستنتج من ذلك؟

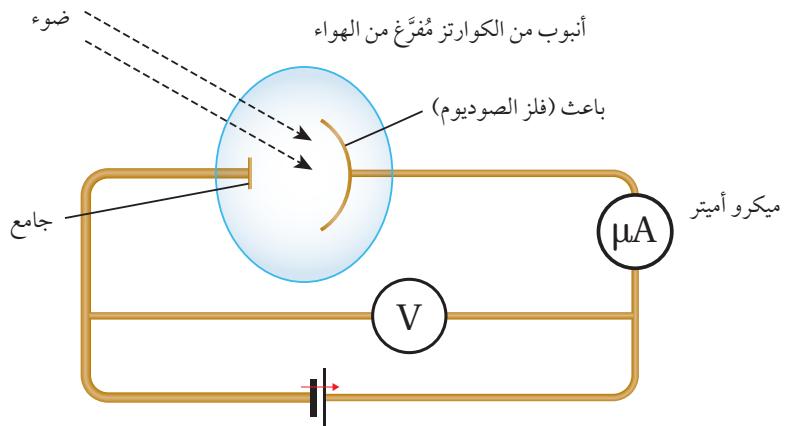
٢. **أصنف** ما حدث لورقتي الكشاف عند استخدام مصدر الأشعة فوق البنفسجية.

٣. أبحث عن تردد الأشعة فوق البنفسجية وتردد الضوء الأحمر، باستخدام مصادر التعلم المخولة الموثوقة بها.

٤. **أفسر:** لماذا لم يقلّ انفراج ورقتي الكشاف عند سقوط الضوء الأحمر، حتى عند زيادة شدّته؟

٥. **أفسر:** لماذا قلّ انفراج ورقتي الكشاف عند استخدام الأشعة فوق البنفسجية؟

الشكل (5): تجربة لينارد لظاهرة الكهربائية.



اللحوظ من التجربة السابقة أنه عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية على صفيحة الخارجيين قلل انفراج ورقي الكشاف، وهذا ما يدل على تفريغ شحنة الكشاف السالبة، ويعود ذلك إلى تحرر الإلكترونات من سطح الخارجيين عند اتصالها طاقةً من الأشعة فوق البنفسجية، أتمّل الشكل (ب) في التجربة.

الشكل (5) يبيّن رسماً تخطيطياً لجهاز لينارد Lenard لإجراء كثير من التجارب الخاصة بالظاهرة الكهربائية، ويكون من أنبوب من زجاج الكوارتز مفرغ من الهواء؛ تجنبًا لفقد الإلكترونات طاقةً حركيّة نتيجة تصدامها بجسيمات الهواء. ويحتوي الجهاز أيضًا قطبين فلزيين، أحدهما مصنوع من فلز الصوديوم يُسمى الباعث، موصول بالقطب الموجب لمصدر فرق جهد قابل للضبط، والآخر يُطلق عليه اسم الجامع يتصل بالقطب السالب لمصدر فرق الجهد. عند سقوط أشعة كهرمغناطيسية بتردد مناسب على الباعث تحرر الإلكترونات من سطحه وتنطلق نحو الجامع، ويسدل على ذلك من التيار الكهربائي الذي يقرأه الميكروأميتر والذي يُسمى التيار الكهربائي Photocurrent.

كلما ازدادت سالبية جهد الجامع، ازدادت قوّة تنافر الإلكترونات مع الجامع، فيقلّ التيار الكهربائي حيث لا يصل الجامع إلاً الإلكترونات التي تمتلك طاقة حركيّة كافية للتغلب على قوة التنافر الكهربائية مع الجامع. وُسمى فرق الجهد الذي يصبح عنده التيار الكهربائي 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.

✓ **أتحقق:** مستعيناً بالشكل (5)،

أجيب عما يأتي:

أ. ما أهمية أن يكون الأنبوب المستخدم في التجربة مفرغاً من الهواء؟

ب. كيف نستدل على وصول الإلكترونات المتحررة إلى الجامع؟

وقد لاحظ لينارد المشاهدات التجريبية الآتية للظاهرة الكهرومغناطيسية:

1. تتحرّر الإلكترونات من سطح الفلز فقط عندما يكون تردد الأشعة الساقطة على سطحه أكبر من تردد معين أو يساويه، يُسمى **تردد العتبة** **Threshold frequency**.
2. تنبعث الإلكترونات ابغاً فوريًا بمجرد سقوط الأشعة على سطح الفلز، 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 الفلز تتناسب طرديًا مع تردد الأشعة الساقطة عليه، ولا تعتمد على شدة الأشعة.
4. يزداد عدد الإلكترونات المنبعثة بزيادة شدة الأشعة دون زيادة في الطاقة الحركية العظمى لهذه الإلكترونات.

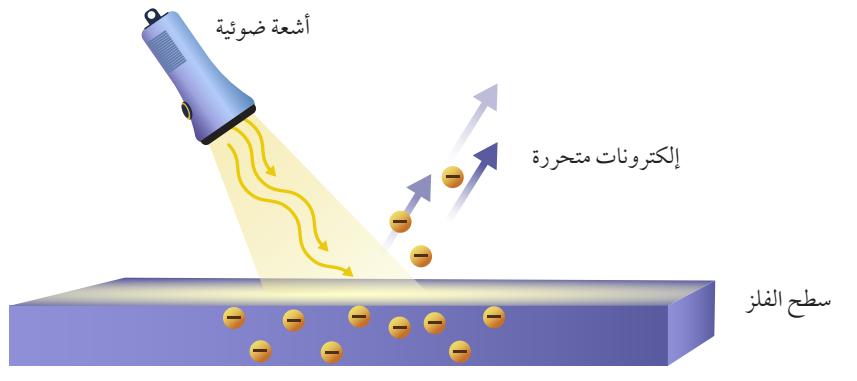
في حين تنبأ النظرية الكهرومغناطيسية التي ترتكز على النموذج الموجي للضوء في ما يخص الظاهرة الكهرومغناطيسية بما يأتي:

1. تنبعث الإلكترونات عند أي تردد للأشعة الساقطة على سطح الفلز، لأنّها تمتص الطاقة بأي مقدار وعند أي تردد، وسقوط الأشعة على سطح الفلز مدة زمنية مناسبة سيُمكّن الإلكترونات من امتصاص الطاقة الكافية لتحريرها من سطح الفلز.
2. لا تنبعث الإلكترونات الضوئية ابغاً فوريًا؛ لأنّها تحتاج إلى وقت كافٍ لامتصاص الطاقة الكافية من الأشعة الساقطة على الفلز لتحرّر من سطحه.
3. زيادة شدة الأشعة تزيد من الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المتحرّرة، والزيادة في تردد الضوء لا ينتج عنها زيادة في الطاقة الحركية للإلكترونات المتحرّرة.

من الواضح أن النتائج جميعها تخالف النتائج التجريبية، وبذلك شكّلت الظاهرة الكهرومغناطيسية دليلاً آخر على عجز الفيزياء الكلاسيكية بنموذجها الموجي للضوء عن تفسير سلوك الجسيمات دون الجاهريّة.

✓ **أتحقق:** لماذا فشلت الفيزياء الكلاسيكية في تفسير نتائج الظاهرة الكهرومغناطيسية؟

**أفخر:** سقط ضوء على سطح فلز فتحرّرت منه الإلكترونات، ماذا يحدث لعدد الإلكترونات المتحرّرة وطاقتها الحركية إذا:  
أ. زادت شدة الضوء مع بقاء تردداته ثابتة.  
ب. زاد تردد الضوء مع بقاء شدته ثابتة.



الشكل (6): تصور أينشتين للظاهرة الكهربائية.

الجدول (1): اقتران الشغل لبعض الفلزات.

$\Phi$ (eV)	الفلز
2.14	سيزيوم
2.28	صوديوم
2.30	بوتاسيوم
4.7	نحاس
4.55	تنغستون
5.10	ذهب

✓ **أتحقق:** أذكر فرضية أينشتين التي استخدمها في تفسير نتائج الظاهرة الكهربائية.

### Einstein's Explanation

استخدم أينشتين فرضية تكمية الطاقة لبيان تفسير الظاهرة الكهربائية، وافتراض أن طاقة الأشعة الكهرومغناطيسية مرکزة في جسيمات أطلق على كل منها اسم فوتون، حيث طاقة الفوتون الواحد تساوي ( $E = hf$ )؛ أي أن للأشعة الكهرومغناطيسية طبيعة جسيمية إضافة إلى طبيعتها الموجية؛ 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 يتحرر الإلكترون من سطح الفلز، يجب أن يمتلك طاقة كافية للتغلب على قوة التجاذب الكهربائي مع النوى الموجبة للفلز، وأقل طاقة كافية لتحرير الإلكترون من سطح الفلز تسمى اقتران الشغل ( $\Phi$ ) **Work function** وهو يعتمد على نوع الفلز كما في الجدول (1). فالفوتون الذي طاقته ( $hf$ ) أقل من اقتران الشغل للفلز لن يتمكن من تحرير الإلكترون من سطح الفلز، أما عندما تكون طاقة الفوتون مساوية لاقتران الشغل، فإن طاقة الفوتون تكون كافية لتحرير الإلكترون دون إكسابه طاقة حرارية، ويكون تردد الأشعة الكهرومغناطيسية المستخدم مساوياً لتردد العتبة للفلز ( $f_0$ )، ويعرف بأنه أقل تردد يلزم لتحرير الإلكترون من سطح الفلز دون إكسابه طاقة حرارية، ويحسب تردد العتبة من العلاقة الآتية:

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

أما إذا كانت طاقة الفوتون ( $hf$ ) أكبر من ( $\Phi$ ) فإن الإلكترون يتحرر مكتسباً طاقة حرارية، وتحسب الطاقة الحرارية العظمى للإلكترونات المتحركة ( $KE_{\max}$ ) بالعلاقة الآتية:

$$KE_{\max} = hf - \Phi$$

يمكن التعبير عن الطاقة الحرارية العظمى بالصيغة ( $KE_{\max} = \frac{1}{2} mv_{\max}^2$ )، وبذلك يمكن إعادة كتابة العلاقة السابقة على النحو الآتي:

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

حيث:  $m$  كتلة الإلكترون.

$v_{\max}$  : السرعة العظمى للإلكترونات المتحركة.

عند إمعان النظر في العلاقة التي وضعها آينشتين، نلاحظ أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات تتناسب طردياً 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 المتحركة في الثانية الواحدة، فيزداد التيار الكهربائي.

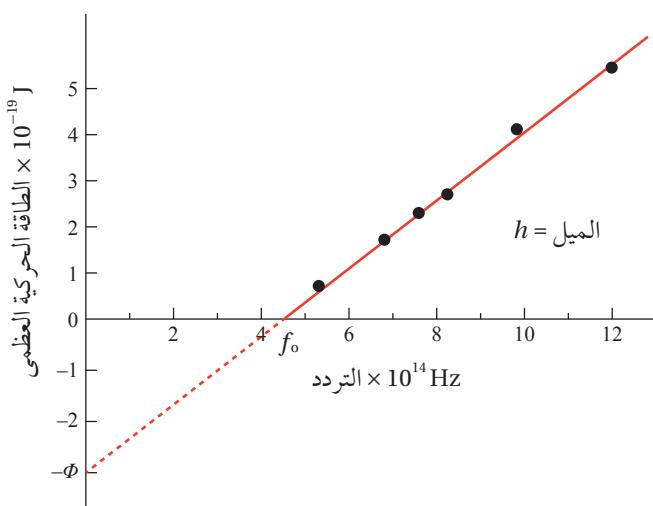
بالإضافة إلى ما سبق، فقد استطاع النموذج الجسيمي للإشعاع تفسير الانبعاث الفوري للإلكترونات من سطح الفلز؛ لأنّه يفترض أن الطاقة مرکزة في الفوتون، وبمجرد امتصاص الإلكترون للفوتون، فإنّ الإلكترون يكتسب طاقة تحرّره من الفلزّ مهما كانت شدة الإشعاع، شريطة أن يكون تردد الفوتون أكبر من تردد العتبة للفلزّ أو يساويه. واستطاع هذا النموذج تفسير التفاوت في الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة، وذلك بحسب طاقة ربط الإلكترون بذرّات الفلزّ، إضافة إلى عمق موقع الإلكترون تحت سطح الفلزّ، فالإلكترونات ذات طاقة الرابط الأصغر والأقرب إلى سطح الفلزّ تحرّر بطاقة حرکية أكبر.

عام 1916 أجرى العالم ميليكان Millikan قياسات تجريبية للتحقق من علاقة آينشتين للظاهرة الكهربائية، حيث استخدم ميليكان أشعة كهرمغناطيسية بترددات مختلفة، وقاس جهد الإيقاف عند كل تردد، وتمثل العلاقة البيانية بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحركة وبين تردد الأشعة الساقطة على الباعث برسم بياني فكانت كما في الشكل (7). من الواضح أن العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى

✓ أتحقق:

أُفسّر اعتماداً على النموذج الجسيمي للضوء:

- زيادة شدة الضوء الساقط تؤدي إلى زيادة التيار الكهربائي دون زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحركة.
- الانبعاث الفوري للإلكترونات من سطح الفلزّ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسى بتردد مناسب على سطحه.



الشكل (7): العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية، وتردد الأشعة الكهرمغناطيسية في الظاهرة الكهربائية.

لماذا رُسم امتداد الخط البياني عند قيمة الطاقة السالبة مُقطعاً ولم يُرسم خطًّا مُتصلاً؟

يعتمد مبدأ عمل كثير من الأجهزة والأدوات في وقتنا الحاضر على الظاهرة الكهربائية، حيث تحول طاقة الفوتونات إلى طاقة كهربائية. مثلاً على ذلك الخلايا الشمسية المبنية في الشكل أدناه، تحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. وقد تصل فاعلية الخلايا الشمسية المستخدمة في الأغراض التجارية إلى 20% تقريباً. ومن الجدير بالذكر أنَّ الخلايا الشمسية من المصادر البديلة النظيفة للطاقة.



للإلكترونات المتحرّرة وترتُّد الأشعة الساقطة على الباعث علاقة خطية، وهذا يتنق مع تفسير أينشتين للظاهرة الكهربائية. ويمثل ميل الخط في الرسم ثابت بلانك، في حين يمثل تقاطع امتداد الخط مع محور الطاقة ( $\Phi$  -)، وتمثل نقطة تقاطع الخط مع محور التردد، تردد العتبة ( $f_0$ ).

### المثال 3

إذا كان اقتران الشغل لفلز (2.0 eV)، وسقط على سطحه إشعاع كهرومغناطيسي طاقة الفوتون الواحد منه (6.0 eV). أجد ما يأتي:

- أ . تردد العتبة للفلز.
- ب . الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنطلقة من سطح الفلز بوحدة الإلكترون فولت (eV).

المعطيات:

$$\Phi = 2.0 \text{ eV}, hf = 6.0 \text{ eV}, h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

المطلوب:

$$f_0 = ?, KE_{\max} = ?$$

الحلّ:

- أ . أحسب تردد العتبة من العلاقة الآتية:

$$hf_0 = \Phi$$

الاحظ 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 الحركية العظمى من العلاقة الآتية:

$$KE_{\max} = hf - \Phi = 6.0 - 2.0 = 4.0 \text{ eV}$$

## المثال 4

سَقَط إِشعاع كَهْرِمَغَناطِيسي طَوْلَ مَوْجَتِه (460 nm) عَلَى فَلَزٍ اقْتَرَانُ الشُّغْلِ لَه (2.2 eV). أَجِد الطَّاقَةُ الْحَرَكِيَّةُ الْعَظِيمُ لِلإِلْكْتَرُوْنَاتِ الْمُتَحَرِّرَةِ مِن سَطْحِ الْفَلَزِ بِوَحْدَةِ الْجُولِ (J).

المُعْطَياتُ:  $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $\Phi = 2.2 \text{ eV}$ ,  $\lambda = 460 \text{ nm} = 460 \times 10^{-9} \text{ m}$ ,  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

المطلوب:  $KE_{\max} = ?$

الحلّ:

أَجِد تَرْدُّدَ الضَّوءِ السَّاقِطِ عَلَى الْفَلَزِ:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8}{460 \times 10^{-9}} = 6.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

أَحْوَلُ وَحْدَةَ قِيَاسِ اقْتَرَانِ الشُّغْلِ مِن V إِلَى وَحْدَةِ جُولِ (J):

$$\Phi = 2.2 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.5 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ثُمَّ أَعْوَضُ فِي الْعَلَاقَةِ:

$$KE_{\max} = hf - \Phi = 6.63 \times 10^{-34} \times 6.5 \times 10^{14} - 3.5 \times 10^{-19}$$

$$= 8.1 \times 10^{-20} \text{ J}$$

## المثال 5

إِذَا كَانَتِ الطَّاقَةُ الْحَرَكِيَّةُ الْعَظِيمُ لِلإِلْكْتَرُوْنَاتِ الْمُتَحَرِّرَةِ مِن سَطْحِ النَّحَاسِ تَسَاوِي (22.6 eV) عَنْدَ سَقْطِ أَشْعَةِ فَوْقِ بَنْفَسِجِيَّةِ تَرْدُّدِهَا ( $6.60 \times 10^{15} \text{ Hz}$ ) عَلَى سَطْحِهِ. أَجِد اقْتَرَانَ الشُّغْلِ لِلنَّحَاسِ بِوَحْدَةِ (eV).

المُعْطَياتُ:  $KE_{\max} = 22.6 \text{ eV}$ ,  $f = 6.60 \times 10^{15} \text{ Hz}$ ,  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

المطلوب:  $\Phi = ?$

الحلّ:

أَجِد  $hf$  بِوَحْدَةِ (eV)

$$hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 6.60 \times 10^{15} = 4.38 \times 10^{-18} \text{ J}$$

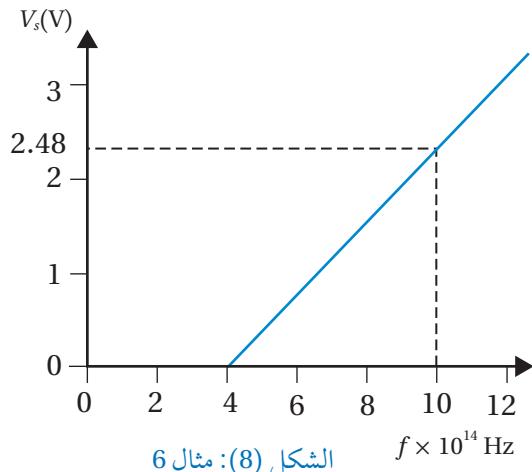
$$= 4.38 \times 10^{-18} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} = 27.3 \text{ eV}$$

ثُمَّ أَعْوَضُ فِي الْعَلَاقَةِ

$$KE_{\max} = hf - \Phi$$

$$22.6 = 27.3 - \Phi \Rightarrow \Phi = 4.70 \text{ eV}$$

## المثال 6



يمثل الرسم البياني في الشكل (8) العلاقة بين جهد الإيقاف وتردد الفوتونات الساقطة على باعث خلية كهروضوئية، مستعيناً بالبيانات المبينة على الرسم، أحسب ما يأتي:

أ. ثابت بلانك.

ب. اقتران الشغل للباعث.

ج. الطاقة الحركية العظمى (بالجول) للإلكترونات المنبعثة عند إسقاط أشعة ترددتها ( $12 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ) على الباعث.

ملاحظة: لحل الفرعين (ب) و(ج)، أستخدم ثابت بلانك الذي حسبته في الفرع (أ).

المعطيات:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

المطلوب:

$$\Phi = ?, KE_{\max} = ?$$

الحل:

أ. أجد ميل المنحنى لحساب ثابت بلانك، مراعياً وحدات القياس:

$$\text{slope} = \frac{\Delta V_s}{\Delta f} = \frac{2.48 - 0}{(10 - 4.0) \times 10^{14}} = 4.1 \times 10^{-15} \text{ V.s}$$

إن ميل الخط المستقيم يساوي  $\frac{h}{e}$  ومنه

$$h = \text{slope} \times e = 4.1 \times 10^{-15} \times 1.6 \times 10^{-19} = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

ب. ألاحظ أن تقاطع الخط المستقيم مع محور التردد هو تردد العتبة  $f_0 = 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$

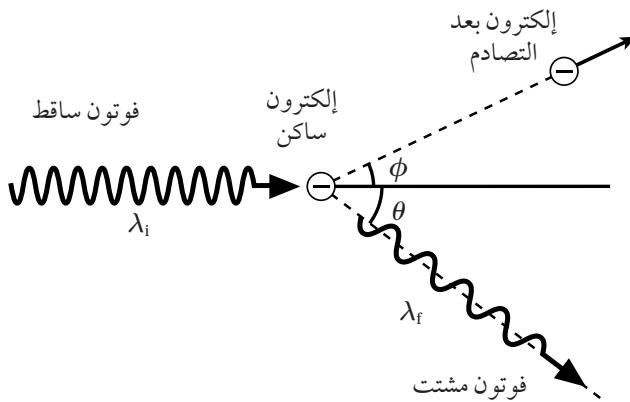
$$\Phi = hf_0 = 6.6 \times 10^{-34} \times 4.0 \times 10^{14} = 2.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$KE_{\max} = hf - \Phi = 6.6 \times 10^{-34} \times 12 \times 10^{14} - 2.6 \times 10^{-19} = 5.3 \times 10^{-19} \text{ J}$$

جـ

لتمرين

**أستخدم الأرقام:** أرادت سارة قياس تردد العتبة لفلز في تجربة الظاهره الكهروضوئية، فاستخدمت أشعة كهرومناطيسيه طول موجتها (300 nm)، ووجدت أن التيار الكهروضوئي يصبح صفرًا عند فرق جهد (2.1 V)، أجد تردد العتبة للفلز.



الشكل (9): ظاهرة كومبتون.

### ظاهرة كومبتون Compton Effect

بعد نجاح أينشتين في تفسير الظاهرة الكهربائية باستخدام النموذج الجسيمي للإشعاع الكهرمغناطيسي، جاءت ظاهرة كومبتون اختباراً آخر لهذا النموذج. أسقط كومبتون أشعة سينية على هدف من الغرافيت، ونظرًا إلى أن الطاقة الكلية للإلكترونات في الغرافيت صغيرة جدًا مقارنة بطاقة فوتونات الأشعة السينية، فإن طاقة تلك الإلكترونات تُهمل وتعُد ساكنة. لاحظ كومبتون أن طول موجة الأشعة السينية المشتتة ( $\lambda_f$ ) أكبر من طول موجة الأشعة السينية الساقطة ( $\lambda_i$ ).

لم يستطع النموذج الموجي للضوء تفسير زيادة الطول الموجي للأشعة المشتتة في هذه الظاهرة، واستطاع العالم كومبتون تفسير نتائج هذه الظاهرة بالاعتماد على قانوني حفظ الزخم الخطى والطاقة، وبافتراض أن الأشعة الكهرمغناطيسية تتفاعل مع الإلكترون بوصفها جسيمات طاقة كُل منها  $h\nu$  ومقدار الزخم الخطى لكُل منها  $\frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} = p$  وهذا يتوافق مع الطبيعة الجسيمية للأشعة الكهرمغناطيسية التي استخدمها أينشتين في تفسير الظاهرة الكهربائية. ونتيجة لتصادم الفوتون الساقط مع الإلكترون يكتسب الإلكترون طاقة، ويتحرك بمسار يصنع زاوية ( $\phi$ ) مع مسار الفوتون الساقط، في حين ينحرف اتجاه الفوتون المشتت بزاوية ( $\theta$ ) كما في الشكل (9)، ويستمر بالسرعة نفسها ( $c$ ، ولكن بطول موجي أكبر ( $\lambda_f > \lambda_i$ )، ويعُبر عن الطاقة التي اكتسبها الإلكترون ( $E_e$ ) بالعلاقة الآتية:

$$E_e = E_i - E_f$$

حيث ( $E_i$ ) طاقة الفوتون المشتت، و ( $E_f$ ) طاقة الفوتون الساقط. مرةً أخرى فشلت الفيزياء الكلاسيكية بنمذجها الموجي للضوء في تفسير هذه الظاهرة، في حين نجح في ذلك النموذج الجسيمي للضوء.

**أفخر:** لماذا لم يستخدم كومبتون الضوء المرئي في تجربته؟

**أتحقق:** في تجربة كومبتون، أقارن بين الأشعة الساقطة والأشعة المشتتة من حيث: الطول الموجي، والتردد، والسرعة.

## المثال 7

فوتون أشعة سينية تردد (4.20  $\times 10^{18}$  Hz). أجد طاقته ومقدار زخمته الخطى.

المُعْطَيات:

$$f = 4.20 \times 10^{18} \text{ Hz}, c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}, h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

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

أجد طاقة فوتون مقدار زخمته الخطى (8.85  $\times 10^{-26}$  kg m/s) وتردد.

المُعْطَيات:

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}, 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}, p = 8.85 \times 10^{-26} \text{ kg m/s}, c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

المطلوب:

$$E = ?, f = ?$$

الحلّ:

$$E = pc = 8.85 \times 10^{-26} \times 3.0 \times 10^8 = 2.7 \times 10^{-17} \text{ J}$$

$$= 2.7 \times 10^{-17} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 1.7 \times 10^2 \text{ eV}$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{2.7 \times 10^{-17}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.1 \times 10^{16} \text{ Hz}$$

سَقَطَ فُوتُون أَشْعَةِ غَامِّا طَاقَتِهِ (662 keV) عَلَى إِلْكْتَرُون سَاكِنٍ، فَاكتَسَبَ الْإِلْكْتَرُون طَاقَةً مُقَدَّرَاهَا (49 keV). أَجِدْ مَا يَأْتِي:

- أ. طَوْلُ مَوْجَةِ الْفُوتُون السَّاقِطِ.
- ب. طَاقَةِ الْفُوتُون المُشَتَّتِ.
- ج. الطَّوْلُ الْمَوْجِيُّ لِلْفُوتُون المُشَتَّتِ.

الْمُعْطَياتُ:

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}, 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}, c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}, E_i = 662 \text{ keV}, E_e = 49 \text{ keV}$$

الْمُطلُوبُ:

$$\lambda_i = ?, E_f = ?, \Delta\lambda = ?$$

الْحَلُّ:

أ. أَحْوَلْ طَاقَةِ الْفُوتُون السَّاقِطِ إِلَى وَحْدَةِ جُولٍ، ثُمَّ أَحْسَبْ الطَّوْلَ الْمَوْجِيًّا.

$$E_i = 662 \text{ keV} = 662 \times 10^3 \text{ eV} \times \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 1.1 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\lambda_i = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_i} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{1.1 \times 10^{-13}} = 1.8 \times 10^{-12} \text{ m}$$

$$E_f = E_i - E_e = 662 - 49 = 613 \text{ keV} = 613 \times 10^3 \text{ eV} \times \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 9.8 \times 10^{-14} \text{ J} \quad \text{ب.}$$

ج. أَجِدْ طَوْلَ مَوْجَةِ الْفُوتُون المُشَتَّتِ (بَعْدَ التَّصَادُمِ).

$$\lambda_f = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{9.8 \times 10^{-14}} = 2.0 \times 10^{-12} \text{ m}$$

لَمْرَدَه

أَسْتَخْدُمُ الْأَرْقَامَ: أَجِدْ مَقْدَارَ الزَّرْخَمِ الْخَطِيِّ لِكُلِّ مَا يَأْتِي:

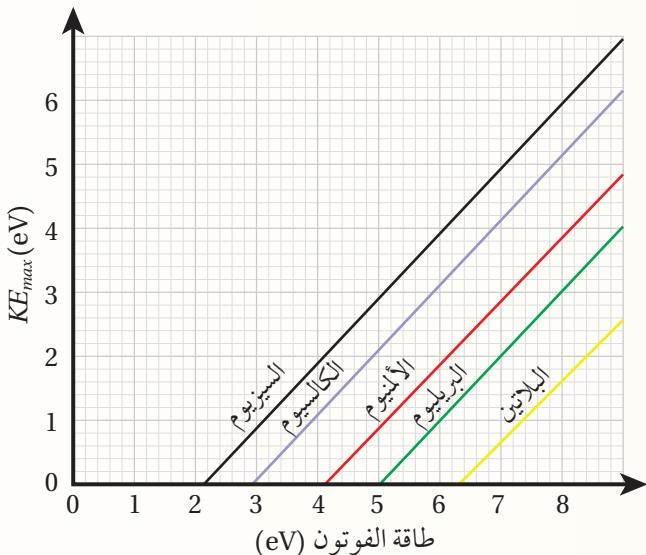
- أ. فُوتُون أَشْعَةِ مَرَئِيَّةٍ طَاقَتِهِ (J)  $(3.0 \times 10^{-19})$ .
- ب. فُوتُون أَشْعَةٍ فَوْقَ بَنْسَجِيَّةٍ تَرَدُّدُهُ (Hz)  $(5.4 \times 10^{15})$ .
- ج. فُوتُون أَشْعَةٍ سِينِيَّةٍ طَوْلُ مَوْجَتِهِ (nm)  $(2.0)$ .

# مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أوضح المقصود بكلٍّ من: الجسم الأسود، الظاهرة الكهرومغناطيسية، اقتران الشغل للفلز، تردد العتبة.
2. **استخدم الأرقام:** سقط فوتون أشعة سينية مقدار زخمها الخطبي  $(4.3 \times 10^{-23} \text{ kg m/s})$  على إلكترون حرّ، فكان مقدار الزخم الخطبي للفوتون المستثنا  $(3.2 \times 10^{-23} \text{ kg m/s})$ ، أجد الطاقة التي اكتسبها الإلكترون بوحدة (eV).
3. **استخدم الأرقام:** سقط ضوء طول موجته (300 nm) على سطح فلز تردد العتبة له  $(5.0 \times 10^{14} \text{ Hz})$ . أجد:

أ . اقتران الشغل للفلز.

ب . الطاقة الحرّيكية العظمى للإلكترونات المتحركة.



4. **أحلّ رسمًا بيانيًّا:** يمثل الرسم البياني المجاور العلاقة بين الطاقة الحرّيكية العظمى للإلكترونات المتحركة من سطح الفلز وطاقة فوتون الإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط على سطح الفلز، وذلك لفلزات عدّة.

أ . جميع الخطوط مستقيمة ومتوازية، أفسّر ذلك.

ب . أرتّب تردد العتبة للفلزات من الأصغر إلى الأكبر.

ج . إذا سقط ضوء طاقته (10 eV) على البيريليوم، أجد الطاقة الحرّيكية العظمى للإلكترونات المتحركة منه.

د . إذا سقط ضوء طول موجته (350 nm)، فمن أيّ الفلزات يستطيع تحرير إلكترونات؟ ومن أيّها لا يستطيع؟ أيّ الفلزات تتحرّر منه إلكترونات بطاقةٍ حرّيكية عظمى أكبر؟

5. **استخدم الأرقام:** سقط إشعاع كهرومغناطيسي طول موجته (80 nm) على سطح فلز اقتران الشغل له (5.1 eV)، أجد الطاقة الحرّيكية العظمى للإلكترونات المتحركة من سطح الفلز.

6. **التفكير الناقد:** بّينت التجارب أنّ زيادة شدّة الضوء الساقط على سطح فلز لا تؤدي إلى زيادة الطاقة الحرّيكية العظمى للإلكترونات المتحركة من سطحه. أناقش فشل الطبيعة الموجية للضوء في تفسير هذه المشاهدة.

7. أضيع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:

1. نجح نموذج رايلي- جينز في تفسير اشعاع الجسم الأسود في منطقة:  
أ. الترددات الكبيرة.

د. الأطوال الموجية القصيرة.

ج. الأطوال الموجية جميعها.

2. جسم ساخن يبعث بأشعة ترددتها ( $2.00 \times 10^{15}$  Hz)، الطاقة الصادرة عن هذا الجسم عند هذا التردد يمكن أن تتحدد القيمة:

ب.  $13.3 \times 10^{-19}$  J      أ.  $2.60 \times 10^{-19}$  J .

د.  $89.0 \times 10^{-19}$  J      ج.  $14.0 \times 10^{-19}$  J

3. يبين الجدول المجاور اقتران الشغل لأربعة فلزات. أقل تردد للضوء قادر على تحرير الكترونات من

أسطح الفلزات جميعها، بوحدة (Hz):

اقتران الشغل (eV)	العنصر
5.0	Be
2.4	Na
4.0	Al
4.6	Cu

أ.  $0.60 \times 10^{15}$

ب.  $0.90 \times 10^{15}$

ج.  $1.1 \times 10^{15}$

د.  $1.3 \times 10^{15}$

4. في تجربة لدراسة الظاهرة الكهربائية، أسقط ضوء مناسب على الباعث فانبعثت من سطحه الكترونات تحمل طاقة حركية. عند استخدام ضوء آخر شدته أقل وترددته أكبر، فإن الإلكترونات المتحررة في وحدة الزمن:

أ. عددها أقل، وطاقتها الحركية العظمى أكبر.

ب. عددها أكبر وطاقتها الحركية العظمى لا تتغير.

ج. عددها لا يتغير، وطاقتها الحركية العظمى أقل.

د. عددها أقل، وطاقتها الحركية العظمى أكبر.

5. سقط فوتون أشعة سينية مقدار زخمه الخطى ( $p_i$ ) على إلكترون حرّ ساكن، فكان مقدار الزخم الخطى للفوتون المشتت ( $p_f$ ، إن الطاقة التي اكتسبها الإلكترون:

ب.  $c(p_f - p_i)$       أ.  $c(p_i - p_f)$  .

د.  $\frac{p_i - p_f}{c}$       ج.  $p_i - p_f$

نموذج بور لذرة الهيدروجين:

Bohr's Model of The Hydrogen Atom

ساد الاعتقاد أن الذرة أصغر مكونات المادة، لكن، يثبت التجارب لاحقاً أن الذرة تتكون من جسيمات أصغر منها. إن تفسير بنية الذرة واستقرارها كان التحدي الأكبر للفيزياء الكلاسيكية. بداية، افترض ثومسون أن الذرة كرة مصممة موجبة الشحنة تتوزع فيها الإلكترونات سالبة الشحنة، وأن الذرة متعادلة كهربائياً، لأن مجموع الشحنة السالبة يساوي مجموع الشحنة الموجبة. لكن تجربة رذرфорد أثبتت عدم صحة هذا النموذج. ففي تجربته الشهيرة عام 1911، أسقط رذرфорد Rutherford جسيمات ألغاع على صفيحة رقيقة من الذهب، وافتراض بناءً على مشاهداته التجريبية، أن الذرة تتكون من نواة موجبة الشحنة تشغل حيزاً صغيراً جداً، تتركز فيه غالبية كتلة الذرة، تدور حوله الإلكترونات سالبة الشحنة مثل دوران الكواكب حول الشمس. ولم يكتب لهذا النموذج النجاح؛ لأنَّه لم يستطع تفسير استقرار الذرة، حيث إنَّ الإلكترون جسيم مشحون يدور حول النواة ويغير اتجاه حركته باستمرار، وبذلك يكتسب تسارعاً مركزياً، وبحسب النظرية الكهرومغناطيسية فإنه سيشع (يُفقد) طاقة بشكل متصل، ونتيجة فقدانه الطاقة، فإنه سينجذب نحو النواة وهذا يؤدي إلى انهيار الذرة. وهذا يخالف النتائج التجريبية، حيث الذرة مستقرة والطاقة التي تشعها ذات قيمة محددة وغير متصلة.

العالم بور كان مقتنعاً بصحة نموذج رذرфорد، لكنَّه اختلف معه في كيفية إشعاع الإلكترون للطاقة، فافتراض أنَّ الإلكترون يفقد الطاقة على هيئة كمات محددة من الطاقة (فوتونات) لا على شكل متصل، واستخدم بور مبدأ تكمية الطاقة، ونموذج رذرфорد إضافة إلى النموذج الجسيمي للإشعاع ليني نموذجاً للذرة عُدَّ في ما بعد من أهم الإنجازات العلمية في ذلك الوقت. تتلخص فرضيات بور لذرة الهيدروجين في ما يأتي:

1. يدور الإلكترون حول البروتون (النواة) في مسارات دائيرية تحت تأثير قوة التجاذب الكهربائي.

2. توجد مدارات محددة (مستويات طاقة) مسموح للإلكترون بأن يحتلها، وإذا بقي في مستوى الطاقة نفسه فلا يشع طاقة ولا يمتصها.

الفكرة الرئيسية:

تتكون الذرة من نواة موجبة الشحنة تتحرك حولها الإلكترونات سالبة الشحنة، تتحل مستويات طاقة غير متصلة (مكماً)، وفهمنا هذا التركيب أدى إلى تطوير تكنولوجيا متقدمة أسهمت في تسهيل سُبل الحياة، واكتشافات علمية جديدة.

نتائج التعلم:

- أشرح الأسس التي اعتمد عليها بور في بناء نموذجه لذرة الهيدروجين.
- أحسب الأطوال الموجية للأشعة الكهرومغناطيسية الناتجة عن انتقال الإلكترون بين مستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين.
- أصنف أنواع الأطيف الذري.
- أوضح الطبيعة المزدوجة للإشعاع والجسيمات المادية.
- أذكر نص فرضية دي بروي وأعبر عنها رياضياً.

أصنف تطبيقات تكنولوجيا يعتمد مبدأ عملها على انتقال الإلكترونات بين مستويات الطاقة في الذرات (الأشعة السينية وأشعة ليزر).

الظواهير والمصطلحات:

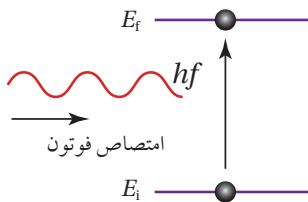
طيف الامتصاص الخطّي

Absorption Line Spectrum

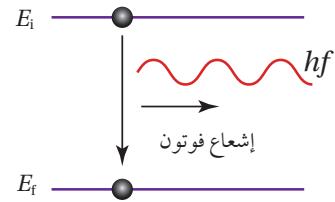
طيف الانبعاث الخطّي

Emission Line Spectrum

طاقة التأين Ionization Energy



الشكل (10/ب): امتصاص الذرة لفوتون،  
في هذه الحالة تكتسب الذرة طاقة.



الشكل (10/أ): إشعاع الذرة لفوتون،  
في هذه الحالة تفقد الذرة طاقة.

3. يشع الإلكترون طاقة أو يمتصها فقط إذا انتقل من مستوى طاقة إلى مستوى آخر. فعند انتقال الإلكترون من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقل، فإنه يشع فوتوناً طاقته تساوي الفرق بين طاقتى المستويين، أتأمل الشكل (10/أ). ويمكن أيضاً أن يمتص الإلكترون فوتوناً، وينتقل إلى مستوى طاقة أعلى عندما تكون طاقة الفوتون الممتص مساوية لفرق الطاقة بين المستويين، أتأمل الشكل (10/ب). وفي كلتا الحالتين فإن طاقة الفوتون ( $E$ ) المنبعث أو الممتص يعبر 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.

$f$ : تردد الفوتون المنبعث أو الممتص.

4. المدارات المسموح للإلكترون أن يحتلها هي تلك التي يكون فيها مدار زخم الزاوي  $L = m_e vr$  يساوي عدداً صحيحاً من مضاعفات  $\hbar$  حيث

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$L = n\hbar = m_e vr$$

حيث

$n$ : رقم المدار ويسمى الرقم الكمي الرئيس، ويأخذ قيمًا صحيحة، 1, 2, 3, ..., وهكذا.

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

$r$ : نصف قطر مدار الإلكترون.

$v$ : سرعة الإلكترون.

ففي المدار الأول ( $n=1$ ) يكون الزخم الزاوي للإلكترون  $\hbar$ ، وفي المدار الثاني  $2\hbar$  وهكذا.

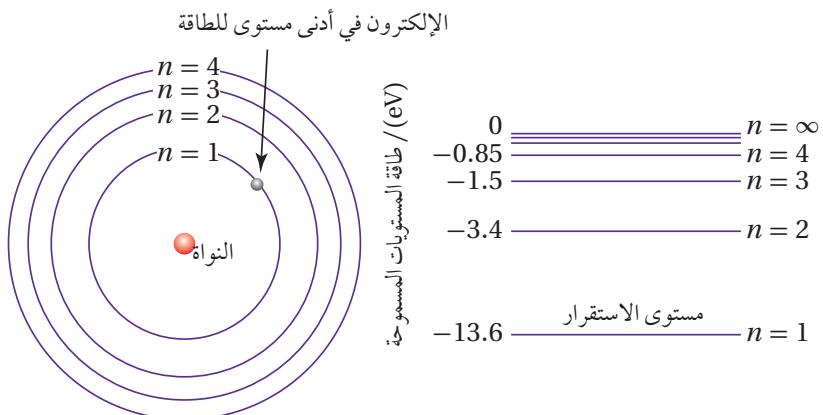
ويعبر عن طاقة الإلكترون في مستوى الطاقة ( $n$ ) في ذرة الهيدروجين بوحدة (eV) بالعلاقة الآتية:

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}$$

✓ أتحقق: ما الشرط الذي وضعه بور للزخم الزاوي للإلكترون في ذرة الهيدروجين؟

الشكل (11): مستويات الطاقة لذرّة الهيدروجين بحسب نموذج بور.

ما أصغر قيمة للطاقة يمكن أن يمتّصها إلكترون ذرة الهيدروجين موجود في مستوى الاستقرار؟



### الربط بالเทคโนโลยيا

معرفة مستويات الطاقة في الذرات المنفصلة أو المواد الصلبة، مكّن العلماء من تطوير كثيرٍ من الأجهزة التي تسهّل حياة البشر، مثل أنابيب الفلورسنت، والميكروويف، وأجهزة الهاتف المحمول والحواسوب، وتطوير تكنولوجيا الليزر المستخدمة في الطب والصناعة وتشكيل الصور ثلاثية الأبعاد (هولوغرام).

**أُنْهِر:** ماذا يحدث للإلكترون إذا زادت طاقة الفوتون الذي يمتصه على طاقة التأين؟

ألاّحظ من العلاقة السابقة أنّ مستويات الطاقة غير متصلة (منفصلة) وتأخذ قيمًا محدّدة، أيّ إنّها مكمّا، فمثلاً، طاقة المستوى الأول ( $-13.6 \text{ eV}$ ) وطاقة المستوى الثاني ( $-3.40 \text{ eV}$ ). الشكل (11) يبيّن مستويات الطاقة لذرّة الهيدروجين، حيث يُمثّل كُلّ مستوى بخطٍّ أفقيٍّ بجانبه الرقم الكميُّ الرئيُّس ( $n$ ) وطاقةُ المستوى بوحدة (eV).

ألاّحظ من الشكل (11) أنّ الإلكترون في مستوى الطاقة الأول يمتلك أقلّ طاقة وهي ( $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ ), ويسُمّى 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. فمثلاً حتى ينتقل الإلكترون من مستوى الطاقة الأول ( $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ ) إلى مستوى الطاقة الثاني ( $E_2 = -3.4 \text{ eV}$ ) يجب أن يمتص فوتونًا طاقته تساوي الفرق بين طاقتى المستوىين، أيّ ( $10.2 \text{ eV}$ ). أمّا نقل الإلكترون من مستوى الطاقة الأول ( $n = 1$ ) إلى مستوى الطاقة ( $n = \infty, E_{\infty} = 0$ ), فيتطلّب امتصاص فوتون طاقته ( $13.6 \text{ eV}$ ), وتسُمّى طاقة التأين Ionization energy وهي أقلّ طاقة لازمة لتحرير الإلكترون من الذرّة.

دون إكسابه طاقة حرّكية. فالإشارة السالبة لطاقة المستوى ( $E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$ ) تعني ضرورة تزويد الإلكترون بطاقة مقدارها ( $\frac{13.6}{n^2} +$ ) لتحريره من الذرّة.

**أَتَحَقَّق:** ما المقصود بطاقة التأين? ✓

## المثال 10

اعتماداً على الشكل (11)، أجد طاقة الفوتون المنبعث عند انتقال الإلكترون في ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثالث إلى مستوى الطاقة الثاني بوحدة eV، ووحدة J.

المعطيات:  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ,  $E_3 = -1.50 \text{ eV}$ ,  $E_2 = -3.40 \text{ eV}$

المطلوب:  $E = ?$

$$\begin{aligned} E &= |\Delta E| = |E_2 - E_3| = |-3.40 - (-1.50)| \\ &= 1.90 \text{ eV} \\ &= 1.90 \text{ eV} \times \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 3.0 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

.....

## المثال 11

أجد تردد الفوتون اللازم لنقل الإلكترون في ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الثالث.

المعطيات:  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ,  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ,  $n_i = 2$ ,  $n_f = 3$

المطلوب:  $f = ?$

الحل:

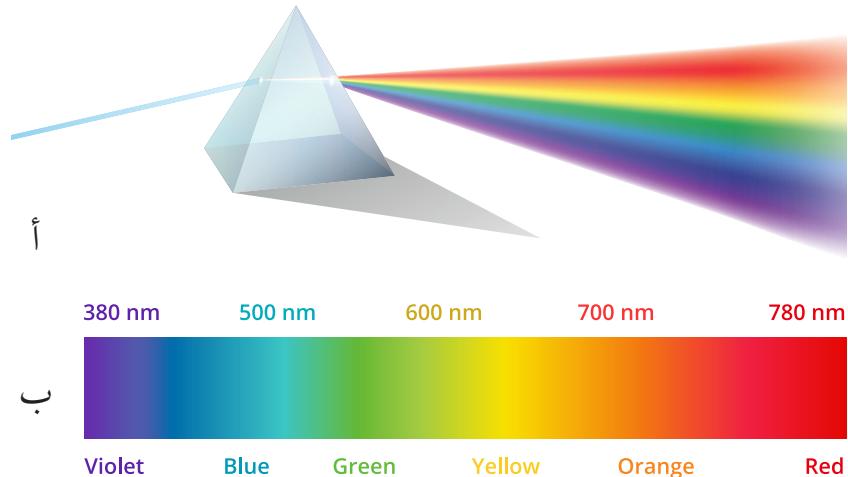
$$\begin{aligned} E &= |E_f - E_i| = \left| \frac{-13.6}{n_f^2} - \frac{-13.6}{n_i^2} \right| \\ E &= \left| \frac{-13.6}{3^2} - \frac{-13.6}{2^2} \right| = |-1.5 - (-3.4)| = 1.9 \text{ eV} = 1.9 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.0 \times 10^{-19} \text{ J} \\ f &= \frac{E}{h} = \frac{3.0 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.5 \times 10^{14} \text{ Hz} \end{aligned}$$

.....

## للمزيد

استخدم الأرقام: انتقل الإلكترون في ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة  $n_i$  إلى مستوى الطاقة الثاني، فانبعث فوتون بطاقة  $4.08 \times 10^{-19} \text{ J}$ . أجد رقم مستوى الطاقة  $n_i$ .

الشكل (12): تحليل ضوء الشمس الأبيض إلى ألوان الطيف المختلفة باستخدام منشور.



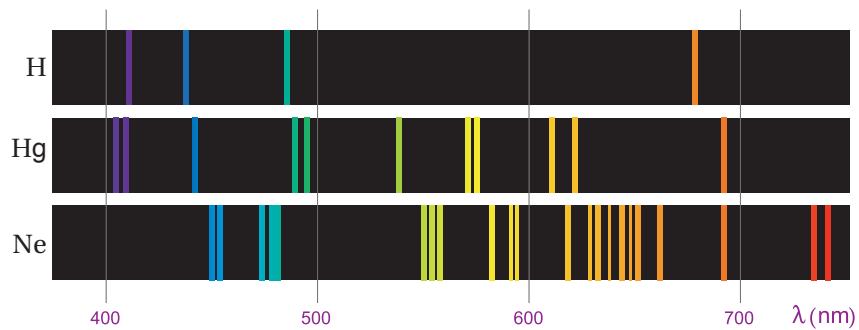
## الأطیاف الذریة Atomic Spectra

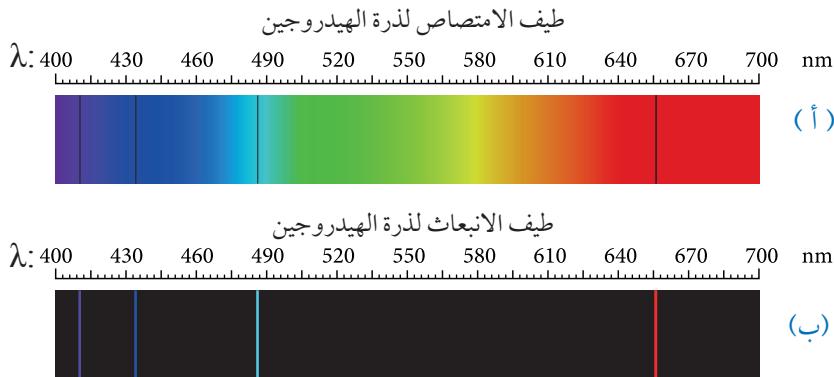
يوضح الشكل (12/أ) منشوراً يعمل على تحليل ضوء الشمس الأبيض إلى ألوان الطيف المتصل Continuous spectrum وسمى متصلة لأنّه يحتوي الأطوال الموجية كلها بدءاً من اللون الأحمر وصولاً إلى اللون البنفسجي، أتأمل الشكل (12/ب).

وبخلاف الطيف الشمسي فإنّ الأطیاف الناتجة من ذرات عنصر واحد كالهیدروجين مثلاً ليست متصلة. والشكل (13) يوضح أطیاف الانبعاث لذرات عناصر بعد إثارتها، منها عنصر الهیدروجين، كل منها يتكون من خطوط غير متصلة (منفصلة) على خلفية سوداء، يُسمى طيف الانبعاث الخطّي Emission line spectrum

لتفسير الطيف الذري غير المتصل لذرة الهیدروجين، افترض وجود الالكترون في مستوى الاستقرار. وعندما يتمتص هذا الالكترون فوتوناً ذات طاقة مناسبة ينتقل إلى مستوى طاقة أعلى وتصبح الذرة في مستوى إثارة، وعند عودة الالكترون إلى مستوى الاستقرار يشع فوتوناً طاقته ( $E$ ) تساوي الفرق بين طاقتى المستويين اللذين انتقل بينهما.

الشكل (13): طيف الانبعاث الخطّي لبعض العناصر.





الشكل (14):

(أ) طيف الامتصاص الخطّي،

(ب) طيف الانبعاث الخطّي

لذرة الهيدروجين.

وإذا مرر ضوء الشمس خلال غاز عنصر معين، فإن ذرات الغاز تتصبّط طاقات محددة (أطوالاً موجيّةً معينة) 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 تماماً الخطوط المضيئة التي ظهرت في طيف الانبعاث الخطّي لذرات العنصر نفسه، الاحظ الشكل (14/ب)؛ لأنّ الأطوال الموجيّة المحددة من الطيف التي تمتصّها ذرات عنصر معين هي الأطوال الموجيّة نفسها التي تشعّها؛ لذا يُعدّ طيف العنصر صفة مميّزة خاصة به كالبصمة للإنسان، ولا يمكن لعنصرٍ أن يكون لهما الطيف الخطّي نفسه.

### نموذج بور وطيف ذرة الهيدروجين

#### Bohr's Model and the Hydrogen Spectrum

طيف ذرة الهيدروجين من أبسط الأطيفات؛ لأنّها تحتوي إلكترونًا واحدًا فقط، ويوضح الشكل (15) الأطوال الموجيّة لطيف الانبعاث الخطّي لذرة الهيدروجين في منطقة الضوء المرئي.

لقد نجح نموذج بور في حساب الأطوال الموجيّة لطيف ذرة الهيدروجين. فعند انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة ( $n_i$ ) إلى مستوى الطاقة ( $n_f$ )، فإنّ طاقة الفوتون المنبعث (أو الممتص) بوحدة الجول هي:

✓ أتحقق: ما الفرق بين الطيف

الناتج من أشعة الشمس المرئية والطيف الناتج عند عبور أشعة الشمس خلال غاز عنصر معين؟

الشكل (15): الأطوال الموجيّة

لطيف الانبعاث الخطّي لذرة

الهيدروجين.



$$hf = |E_f - E_i| = 13.6 e \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

حيث  $e$  هي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون، وبالتعويض عن التردد  $f = \frac{c}{\lambda}$ ، 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  $1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ ، قيمة ثابت يُسمى ثابت ريدبىغ ( $R_H$ )؛ لذا فإنّ:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

حيث ( $\lambda$ ) الطول الموجي للفوتون المنبعث (او الممتص). وعلى الرغم من اتفاق نتائج نموذج بور مع النتائج التجريبية لطيف ذرة الهيدروجين والأيونات ذات الإلكترون الواحد، فإنه فشل في تفسير أطيف الذرات عديدة الإلكترونات.

**أتحقق:** أيّ الأطيف الذري نجح نموذج بور في حسابها؟ هل نجح في التنبؤ بالأطوال الموجية لأطيف الذرات عديدة الإلكترونات؟ ✓

### الربط بالتقنيات



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 الإلكترونات تلك الذرات من مستويات ذات طاقة أعلى إلى مستويات ذات طاقة أقل.

تتميز أشعة الليزر بشدة سطوعها وبامكانية توجيهها بدقة عالية إلى نقطة صغيرة دون التأثير في المناطق المحيطة.

لذلك فإن الليزر أداة فعالة في العديد من المجالات. ففي مجال الصناعة يُستخدم الليزر في قطع ونفخ المعادن والخشب والبلاستيك بدقة عالية، ويُستخدم أيضاً في عمليات اللحام نظراً لقدرته على تجميع الطاقة الضوئية الصادرة عنه في مساحة صغيرة جداً. 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.

أجد الأطوال الموجية للفوتونات المتبعة عند انتقال إلكترون ذرة الهيدروجين من مستويات الطاقة: الثالث، والرابع، والخامس، وال السادس إلى مستوى الطاقة الثاني. وأقارن الأطوال الموجية التي حصلت عليها بتلك الموجودة في الشكل (15)، وفي ضوء ذلك أصدر حكمًا على صحة نموذج بور.

$$R_H = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}, n_f = 2, n_i = 3, 4, 5, 6$$

المطلوب:  $\lambda = ?$

الحل :

أحسب طول موجة الفوتون المنبعث عند انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة الثالث إلى مستوى الطاقة الثاني من العلاقة الآتية:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right| = 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right|$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.523 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda = 6.563 \times 10^{-7} \text{ m} = 656.3 \text{ nm}$$

نكرر العملية عندما  $n_i = 4, 5, 6$

6	5	4	3	$n_i$
410.2 nm	434.1 nm	486.2 nm	656.3 nm	$\lambda$ القيم المحسوبة
410.1 nm	434.0 nm	486.1 nm	656.2 nm	$\lambda$ القيم التجريبية

نلاحظ أن الأطوال الموجية تقع كلها ضمن الأطوال الموجية للطيف المرئي، وأن القيم المحسوبة من علاقة بور قريبة جدًا من القيم التجريبية، وهذا يدل على صحة نموذج بور لذرة الهيدروجين.

لتمرين

**استخدم الأرقام:** انتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الأول، بحسب نموذج بور. أحسب طول موجة الفوتون المنبعث وتردده وطاقته وزخمه الخطبي.

## الطبيعة الموجية-الجسيمية المزدوجة

لقد تعلّمتُ أنَّ بعض الظواهر المتعلقة بالضوء، مثل الحيود والتداخل يمكن تفسيرها بافتراض أنَّ الضوء موجاتٌ كهرمغناطيسية. لكن توجد ظواهر أخرى، مثل: إشعاع الجسم الأسود، والظاهرة الكهربائية، وظاهرة كومبتون، والأطيف الذريّة لا يمكن تفسيرها إلّا بافتراض أنَّ الضوء يتكون من جسيمات (فوتونات) تمتلك زخماً خطّياً يُحسب مقداره من العلاقة الآتية:

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

فافتراض العلماء أنَّ للإشعاع الكهرمغناطيسي طبيعة موجيّة-جسيمية مزدوجة **Wave-particle duality of light**. وعلى غرار الطبيعة الموجيّة-الجسيمية للإشعاع، اقترح العالم دي بروي de Broglie عام 1923 أنَّ للأجسام الماديّة طبيعة موجيّة. واستخدم العلاقة السابقة في حساب الطول الموجي لجسم ما على النحو الآتي:

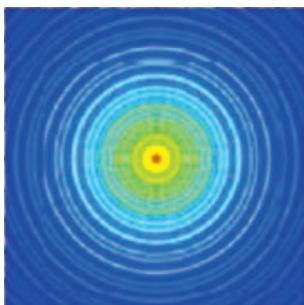
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

حيث  $\lambda$ : طول موجة دي بروي، ويُطلق عليها اسم الموجة المصاحبة للجسم.  
 $h$ : ثابت بلانك.

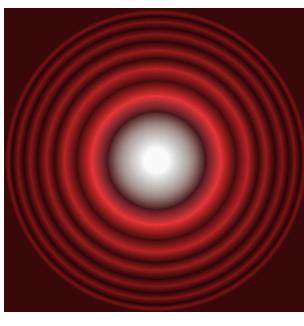
$p$ : مقدار الزخم الخطّي للجسم.

$m$ : كتلة الجسم.

$v$ : سرعة الجسم.



(أ)



(ب)

الشكل (16): نمط حيود

(أ) إلكترونات أُسقطت على بلورة من النيكل،

(ب) حزمة ضوئية أُسقطت على فتحة دائريّة.

ومن الجدير بالذكر أنَّ الموجات المصاحبة للأجسام ليست موجات ميكانيكية أو كهرمغناطيسية، وهي ذات أهميّة كبيرة في مجال فيزياء الكم. وعند حساب طول موجة دي بروي المصاحبة لجسم كبير (جاهري)، نجد أنَّها صغيرة جدًا بل أصغر بكثير من أبعاد الجسم. وفي المقابل، فإنَّ طول موجة دي بروي المصاحبة لجسيم صغير مثل الإلكترون قريب من قيمة المسافة الفاصلة بين الذرات في المواد الصلبة. بعد ثلث سنوات من وضع دي بروي لفرضيته تمكّن العالمان دافسون Davisson و جيرمر Germer من الكشف عن الطبيعة الموجيّة للإلكترونات عملياً، حيث أسقط العالمان حزمة مسرعة من الإلكترونات على بلورة من النيكل. طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترونات المسرّعة قريب من قيمة المسافة الفاصلة بين ذرات بلورة النيكل ما أدى إلى 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 دائريّة.

**أتحقق:** أذكر فرضيّة دي بروي.



في المجهر الإلكتروني تُستخدم الإلكترونات بدلاً من الضوء المرئي لتكوين صور مكثرة جداً 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 تُستخدم موجات الإلكترونات بدلاً من الضوء المرئي، حيث يكون طول موجة دي بروي للإلكترونات المسَرَعة صغير جداً؛ عادةً ما تكون الأطوال الموجية للإلكترونات أقصر 100 مرة تقريباً من الأطوال الموجية للضوء المرئي المستخدم في المجاهر الضوئية، ونتيجة لذلك، فإن المجهر الإلكتروني المزود ببعض مثالياً سيكون قادرًا على تمييز التفاصيل الدقيقة أكبر بمقدار 100 مرة تقريباً من تلك التي يميّزها المجاهر الضوئية.



### المثال 13

أجد طول موجة دي بروي المصاحبة لـ كلّ ممّا يأتي:

أ. إلكترون سرعته  $1.00 \times 10^6 \text{ m/s}$

ب. رصاصة كتلتها  $50.0 \text{ g} = 50.0 \text{ m_b}$  تتحرك بسرعة  $400 \text{ m/s}$

المُعْطَيات:  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ,  $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $v_e = 1.00 \times 10^6 \text{ m/s}$

$$m_b = 50.0 \times 10^{-3} \text{ kg}, v_b = 400 \text{ m/s}$$

المطلوب:  $\lambda_e = ?, \lambda_b = ?$

الحلّ:

$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 1.00 \times 10^6} = 7.27 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.727 \text{ nm} \quad \text{أ.}$$

الاحظ أنَّ طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون تقارب المسافة الفاصلة بين الذرات في البلورات، لذلك يمكن ملاحظة نمط الحيوانات كـ ما في تجربة دافسون وجيرمن.

$$\lambda_b = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{50.0 \times 10^{-3} \times 400} = 3.32 \times 10^{-35} \text{ m} = 3.32 \times 10^{-26} \text{ nm} \quad \text{ب.}$$

من الواضح أنَّ طول موجة دي بروي المصاحبة للرصاصة صغير جدًّا حتى مع المقارنة بالمسافات الفاصلة بين الذرات في البلورات، لذلك لا يمكن مشاهدة نمط حيوان للأجسام الجاهريَّة.

تسارع إلكترون من السكون بفرق جهد مقداره (2.7 V) ، أجد طول موجة دي بروي المصاحبة له عند نهاية مدة تسارعه.

المعطيات:  $v_i = 0$ ,  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  J.s,  $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$  kg,  $\Delta V = 2.7$  V

المطلوب:  $\lambda_e = ?$

الحلّ:

أجد مقدار السرعة النهائية 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 المصاحبة له:

$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 0.97 \times 10^6} = 7.5 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.75 \text{ nm}$$

### لتمرين

1. **استخدم الأرقام:** طول موجة دي بروي لحزمة من الإلكترونات يساوي  $(2.24 \times 10^{-10} \text{ m})$ . أجد فرق

الجهد المستخدم في تسريع الإلكترونات.

2. **استخدم الأرقام:** كرة تنس أرضي كتلتها (60 g) وقطرها (6.5 cm)، تتحرك بسرعة (25 m/s).

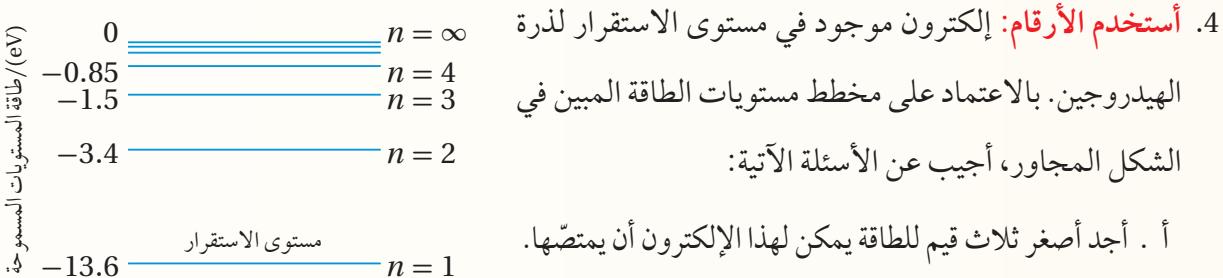
أ. أجد طول موجة دي بروي المصاحبة لها.

ب. أقارن بين طول موجة دي بروي وقطر كرة التنس.



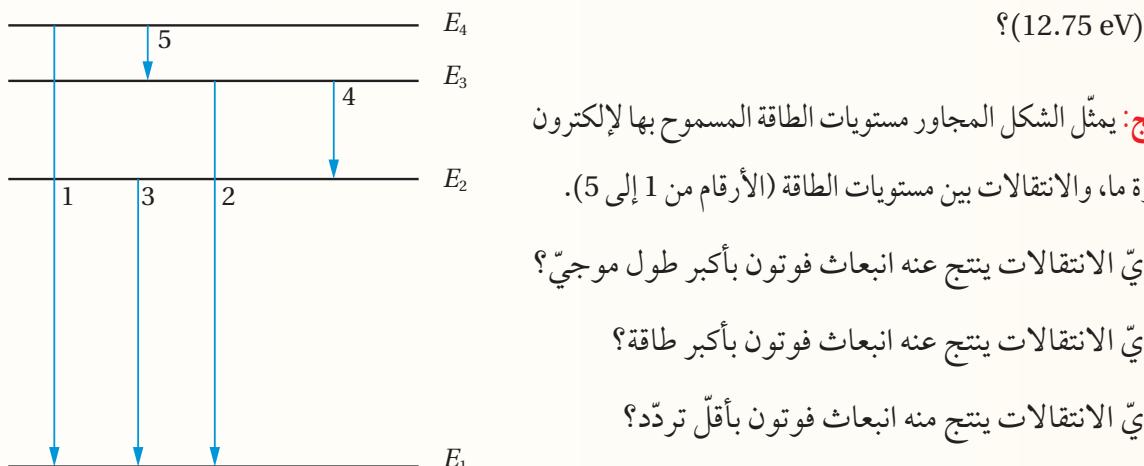
# مراجعة الدرس

- الفكرة الرئيسية: أوضح المقصود بكلٌ من: طيف الامتصاص الخطّي، طيف الانبعاث الخطّي.
- أصنف** الكميّات الفيزيائيّة الآتية: (الطول الموجيّ، التردد، الطاقة، الزخم الخطّي) من حيث ارتباطها بالطبيعة الموجيّة أو الجسيميّة للمادة.
- أستنتج**: إلكترون في مستوى الطاقة الرابع لذرّة الهيدروجين، ما الانتقالات التي يمكن أن يفقد بها إلكترون طاقته، أوضح ذلك على رسم لمستويات الطاقة.



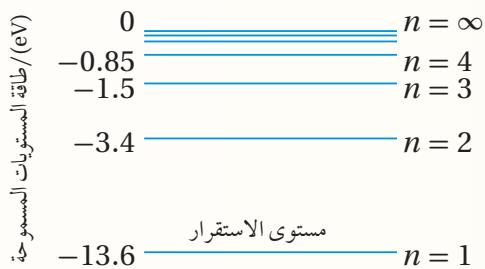
- ب. أحسب طول موجة الإشعاع اللازم لنقل إلكترون من مستوى الاستقرار إلى مستوى الطاقة الثالث.

ج. ما المستوى الذي يتقلّل إليه إلكترون إذا امتص فوتونا طاقته



6. **استخدم الأرقام**: بروتون طاقته الحركية (10 MeV)، أجد طول موجة دي برووي المصاحبة له حيث كتلة البروتون  $(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})$ .

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



\* اعتماداً على مخطط مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين

أجب عن الفقرتين الآتيتين:

1. إلكترون في ذرة الهيدروجين في مستوى الاستقرار.

إذا سقط عليه فوتون طاقته (12.1 eV)، فإن إلكترون:

أ . يمتص الفوتون ويتحرر من الذرة.

ب. يمتص الفوتون وينتقل إلى مستوى الطاقة الثالث.

ج. 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  $(6.16 \times 10^{14} \text{ Hz})$ ، فإن مستوى الطاقة

اللذين انتقل الإلكترون بينهما ليظهر هذا الخط المعتم:

أ . الأول والثاني      ب. الثاني والثالث      ج. الثالث والثالث      د. الثاني والرابع

3. الزخم الزاوي للإلكترون ذرة الهيدروجين عندما يتواجد في المستوى الثاني :

د.  $\frac{4h}{\pi}$       ج.  $\frac{2h}{\pi}$       ب.  $\frac{h}{2\pi}$       أ .  $\frac{h}{\pi}$

4. إلكترون في ذرة الهيدروجين في مستوى الاستقرار. امتص الإلكترون فوتوناً طاقته  $(20.4 \times 10^{-19} \text{ J})$

فانتقل إلى مستوى إثارة. الزخم الزاوي للإلكترون في المستوى الذي انتقل إليه:

د.  $4\hbar$       ج.  $3\hbar$       ب.  $2\hbar$       أ .  $\hbar$

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.

ج. مساوية لطول موجة دي بروي للبروتون؛ لأن لهما السرعة نفسها.

د. أقل من طول موجة دي بروي للبروتون؛ لأن شحنته سالبة.

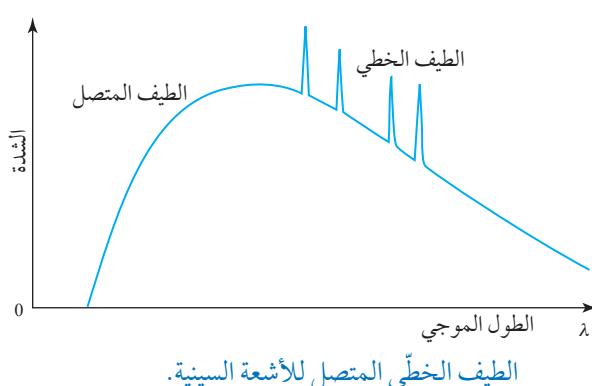
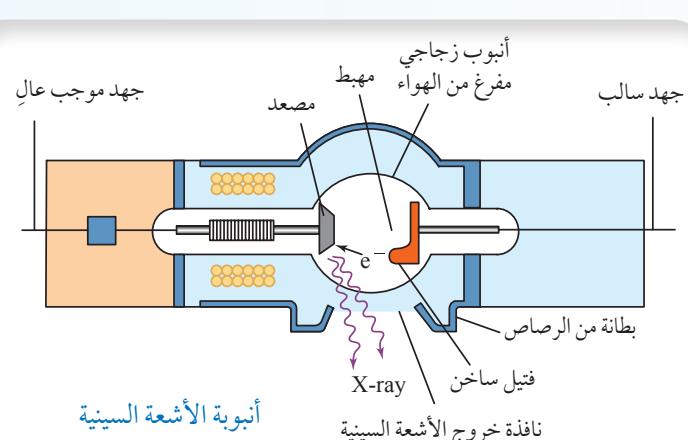
# الإثراء والتتوسيع

## الفيزياء والطب: الأشعة السينية Physics in Medicine: X-Ray

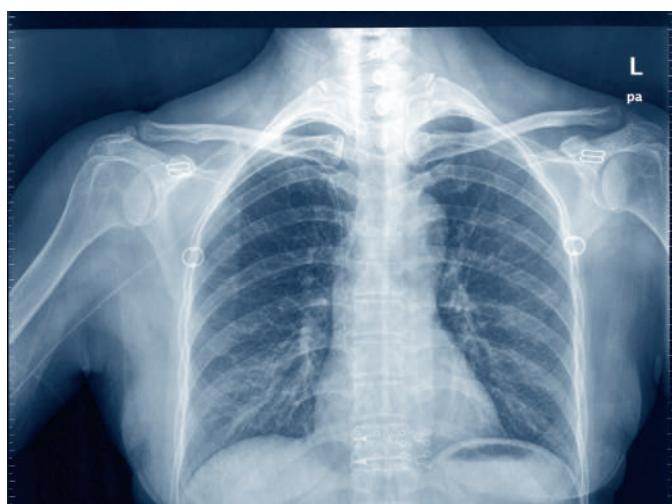
لاحظ العالم رونتعن أنّ أشعة ذات طاقة كبيرة (أطوال موجيّة قصيرة  $m^{-8} - 10^{-11} = \lambda$ ) تبعت من سطح فلزّ عند اصطدام إلكترونات ذات طاقة عالية به، أطلق عليها اسم الأشعة السينية X-ray.

ويتكون أنبوب الأشعة السينية المبيّن في الشكل المجاور من أنبوب مفرّغ من الهواء يحتوي فتيلًا فلزيًا تبعت

منه إلكترونات عند تسخينه. تسرّع الإلكترونات المنبعّة من الفتيل باستخدام فرق جهد كهربائيّ كبير لتصطدم بعدها بالمصعد، وهو مادّة فلزّية فتبعت منه الأشعة السينية. وقد وجد أنّ طيف الأشعة السينية يتكون من طيف متصل وطيف خطّي كما في الشكل المجاور. عند اقتراب إلكترونات المسرّعة من ذرات المصعد تباطأ بفعل القوّة الكهربائية، وتفقد جزءًا من طاقتها الحركية التي تظهر على هيئة أشعة كهرومغناطيسية ذات طاقة متصلة. وقد يصطدم أحد الإلكترونات المسرّعة بأحد الإلكترونات في مستويات الطاقة الداخلية لذرة المصعد فيحرّره، ونتيجة لذلك، ينتقل إلكترون من المستويات الخارجية للطاقة لملء الفراغ الذي نتج من تحرير الإلكترون في أحد مستويات الطاقة الداخلية (القريبة من النواة). ويصاحب ذلك انبعاث فوتون بطاقة محدّدة تساوي فرق الطاقة بين المستويين، ويظهر ذلك على هيئة طيف خطّي في طيف الأشعة السينية.



الطيف الخطّي المتصل للأشعة السينية.



صورة مأخوذة عن طريق الأشعة السينية للفص الصدري.

تمتاز الأشعة السينية بقدرتها على النفاذ في الأوساط الماديّة، ويعتمد ذلك على الوسط، فمثلاً، قدرتها على النفاذ خلال الكتلة العضلية تكون أكبر من قدرتها على النفاذ خلال العظام؛ ولهذا السبب استُخدمت الأشعة السينية في الطب لتصوير عظام جسم الإنسان كما في الشكل المجاور، والتحقّق من وجود كسور فيها.

# مراجعة الوحدة

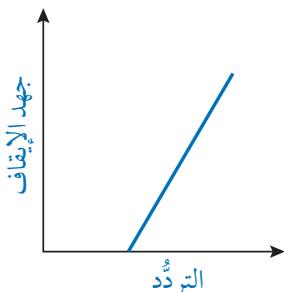
1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:
1. تكون شدة الطاقة المنبعثة من جسم أسود درجة حرارته مقاربة لدرجة حرارة الشمس:
- أكبر ما يمكن عند الأطوال الموجية الكبيرة جداً للإشعاع.
  - أكبر ما يمكن عند الأطوال الموجية القصيرة جداً للإشعاع.
  - أكبر ما يمكن في منطقة الأطوال الموجية للضوء المرئي.
  - متقاربة عند جميع الأطوال الموجية للإشعاع.
2. وفقاً لتصور الفيزياء الكلاسيكية للظاهرة الكهرومغناطيسية:
- تبعد الإلكترونات ابعاً فورياً بمجرد سقوط الأشعة على سطح الفلز.
  - تزداد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحركة بزيادة تردد الأشعة الساقطة.
  - يستغرق تحرر الإلكترونات بعض الوقت حتى تتمكن من اكتساب الطاقة اللازمة للتحرر.
  - لا تتحرر الإلكترونات من سطح الفلز عند الترددات العالية للضوء.
3. نسبة الزخم الخطى ( $p$ ) لفوتون إلى طاقته ( $E$ )؟  $\frac{p}{E}$  تساوى:
- د.  $\frac{c}{h}$       ج.  $\frac{h}{c}$       ب.  $\frac{1}{h}$       أ.  $\frac{1}{c}$
4. إذا تضاعف الطول الموجي للفوتون مرتين فإن طاقته:
- تقل إلى النصف وكذلك زخمه الخطى.
  - تبقي ثابتة ويقل زخمه الخطى إلى النصف.
  - تبقي ثابتة ويبقى زخمه الخطى ثابتاً.
  - تضاعف مرتين ويقل زخمه الخطى كذلك.
5. يُحسب الزخم الخطى ( $p$ ) للفوتون من إحدى العلاقات الآتية:
- د.  $\frac{h}{f}$       ج.  $E c$       ب.  $\frac{E}{c}$       أ.  $m v$
6. جسم متوج يُصدر إشعاعاً كهرومغناطيسياً تردد  $(1.2 \times 10^{15} \text{ Hz})$ ، إن طاقة الكمة الواحدة من هذا الإشعاع بوحدة إلكترون فولت (eV) تساوى:
- د. 3.0      ج. 5.0      ب. 7.6      أ. 9.3
7. إذا انتقل إلكترون من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الثاني في ذرة الهيدروجين، فإن الفرق في الزخم الزاوي للإلكترون بحسب نموذج بور هو:
- د.  $2\hbar$       ج.  $3\hbar$       ب.  $4\hbar$       أ.  $\hbar$
8. مقدار طول موجة الفوتون الممتص عند انتقال إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة ( $n = 2$ ) إلى مستوى الطاقة ( $n = \infty$ ) بدلالة ثابت ريديرغ ( $R_H$ ) يساوى:
- د.  $\frac{R_H}{4}$       ج.  $\frac{R_H}{2}$       ب.  $\frac{4}{R_H}$       أ.  $\frac{2}{R_H}$

# مراجعة الوحدة

9. أُسقط فوتونان مختلفان في التردد على الفلز نفسه، فانطلق إلكترونان متساويان في الطاقة الحركية. فإن ذلك يعود إلى اختلاف:

- ب. اقتران الشغل.
- أ. عمق الإلكترون في الفلز.
- د. شدة الضوء.
- ج. مساحة سطح الفلز.

10. يمثل الرسم البياني المجاور العلاقة بين جهد الإيقاف وتردد الضوء الساقط في الخلية الكهروضوئية، ميل هذه العلاقة هو:



- ب.  $\frac{e}{h}$
- أ.  $h$
- د.  $\frac{\Phi}{h}$
- ج.  $\frac{h}{e}$

\* عند سقوط  $(1.0 \times 10^8)$  فوتون في وحدة الزمن على سطح فلز اقتران الشغل له (3.3 eV)، وطاقة كل فوتون منها (6.0 eV)، أجب عن الفقرتين الآتتين:

11. أكبر عدد من الإلكترونات يمكن أن يصل إلى الجامع في وحدة الزمن يساوي:

- د.  $2.7 \times 10^6$
- ج.  $3.3 \times 10^6$
- ب.  $1.0 \times 10^4$
- أ.  $1.0 \times 10^8$

12. الطاقة الحركية العظمى للإلكترون بوحدة (J):

- د.  $4.3 \times 10^{-19}$
- ج.  $1.67 \times 10^{19}$
- ب.  $9.3$
- أ.  $2.7$

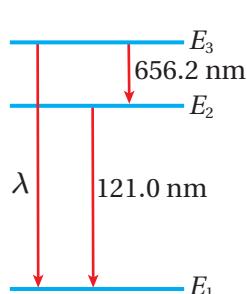
13. إحدى القيم الآتية للزخم الزاوي لإلكترون ذرة الهيدروجين لا تسمح له بالبقاء في مدارات الذرة:

- ب.  $(2.06 \times 10^{-34}) \text{ J.s}$
- أ.  $(1.06 \times 10^{-34}) \text{ J.s}$
- د.  $(4.24 \times 10^{-34}) \text{ J.s}$
- ج.  $(3.18 \times 10^{-34}) \text{ J.s}$

14. إلكترون كتلته ( $m$ ) وشحنته ( $e$ )، تسارع من السكون بفرق جهد مقداره ( $\Delta V$ ). طول موجة دي بروي المصاحبة له عند نهاية مدة تسارعه:

- د.  $\frac{h}{m\sqrt{2e\Delta V}}$
- ج.  $h\sqrt{2e\Delta Vm}$
- ب.  $\frac{h}{\sqrt{2e\Delta Vm}}$
- أ.  $\frac{\sqrt{2e\Delta Vm}}{h}$

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 ( $\lambda$ ) بوحدة (nm) للفوتون الناتج عن انتقال الإلكترون من المستوى الثالث إلى المستوى الأول يكون:



- ب.  $\lambda > 656.2$
- أ.  $\lambda < 121.0$
- د.  $\lambda = 777.2$
- ج.  $121.0 < \lambda < 656.2$

2. **أستنتج:** الأجسام كلّها في الغرفة تبعث أشعة كهرمغناطيسية، فلماذا لا نستطيع رؤية هذه الأجسام في غرفة مُعتمة؟

3. **استخدم الأرقام:** سقط ضوء طول موجته (300 nm) على سطح فلز اقتران الشغل له (2.2 eV). أجد ما يأتي:

أ. تردد العتبة للفلز.

ب. الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

4. **أستنتج:** إلكترون في مستوى الاستقرار لذرّة الهيدروجين، أوضح ما يحدث للإلكترون إذا سقط عليه فوتون طاقته:

أ. 7.0 eV

ب. 12.1 eV

ج. 20.0 eV

5. **أستنتج:** إلكترون في مستوى الطاقة الثالث لذرّة الهيدروجين، ما قيم الطاقة التي يمكن أن يخسرها الإلكترون؟

طاقة الإلكترون eV	
$n = 4$	-4.95
$n = 3$	-5.52
$n = 2$	-5.74
$n = 1$	-10.38

6. **أستنتج:** يبيّن الشكل المجاور مختطاً يوضح بعض مستويات الطاقة للإلكترون في ذرّة الرئب:

أ. أجد أعلى طاقة فوتون يمكن أن ينبعث من الانتقالات بين هذه المستويات.

ب. أجد أقل طاقة فوتون يمكن أن ينبعث من الانتقالات بين هذه المستويات.

7. **استخدم الأرقام:** ظهر خط مُعتم في طيف الامتصاص لذرّة الهيدروجين عند التردد ( $6.15 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ), معتمدًا على مستويات الطاقة لذرّة الهيدروجين، أُبّين بالحسابات بين أيّ مستويي طاقة انتقال الإلكترون ليظهر هذه الخط المُعتم.

8. **التفكير الناقد** يمثل الشكل المجاور تجربة لدراسة الظاهرة الكهربائية أجرتها العالم لينارد، وكان تردد الضوء الساقط ( $8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ). اعتمادًا على ذلك، أُجيب عما يأتي:

أ. أُبّين ماذا يحدث لقراءة الميكروأمير عن زيادة فرق الجهد.

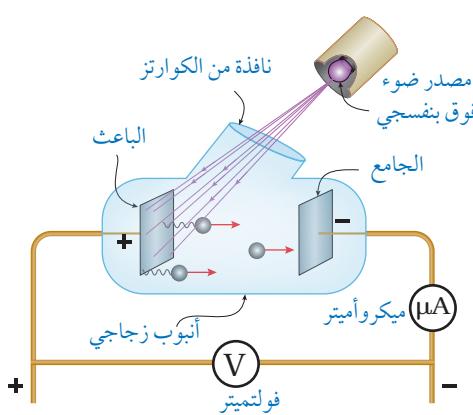
ب. عند فرق جهد (2.0 V) أصبحت قراءة الأميتر (صفرًا). فماذا يُسمّى فرق الجهد في هذه الحالة؟

ج. أُبّين تأثير زيادة شدة الضوء في قراءة الميكروأمير عندما تكون قراءته صفرًا.

د. أُبّين تأثير زيادة تردد الضوء في قراءة الميكروأمير عندما تكون قراءته صفرًا.

هـ. كيف تعارضت النتائج في (ج) و(د) مع الفيزياء الكلاسيكية؟

وـ. أحسب تردد العتبة لفلز الباوث.



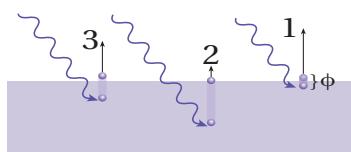
9. **أستخدام الأرقام:** يظهر في طيف امتصاص غاز الهيليوم (12) خط مُعْتَم في منطقة الضوء المرئي: أحد الخطوط يقابل الطول الموجي (686.7 nm)، أحسب الطاقة التي امتصها الإلكترون بوحدة (eV) ليتتج هذا الخط.

10. **أستخدام الأرقام:** سقط ضوء على سطح فلز، فكانت الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنشعة (2 eV)، وكان أكبر طول موجي للضوء الساقط يتطلب تحريز الإلكترونات من سطح الفلز يساوي (682 nm). أحسب ما يأتي:

- اقتران الشغل للفلز.
- فرق جهد الإيقاف.

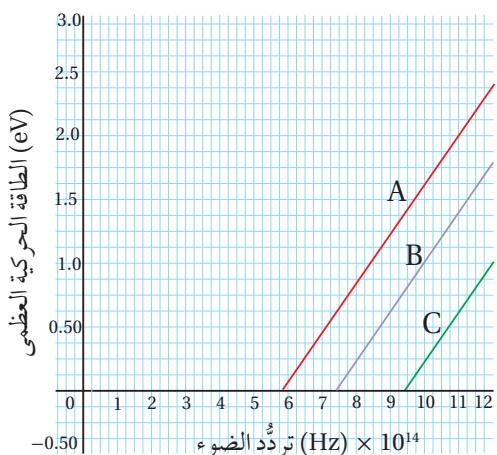
11. **أفسر:** يبيّن الشكل المجاور توضيحاً بسيطًا للتصرّر الذي وضعه أينشتين للظاهرة الكهربائية.

- ما فرضيته في ما يتعلق بالضوء؟



- ما علاقة عدد الإلكترونات المتحرّرة بشدة الضوء الساقط على الفلز؟
- أرتّب الطاقة الحركية للإلكترونات المتحرّرة (1, 2, 3) من الأصغر إلى الأكبر.
- كيف فسر أينشتين التفاوت في الطاقة الحركية للإلكترونات المتحرّرة؟

12. **أحلّ رسمًا بيانياً:** يمثل الشكل المجاور رسمًا بيانياً لتغيير الطاقة الحركية العظمى مع تردد الضوء الساقط لثلاثة فلزات مختلفة، اعتمادًا على الشكل أجب عمّا يأتي:



- أفسر توازي المنحنيات الثلاثة.
- أجد ثابت بلانك بوحداتي (eV.s) و (J.s) (أستخدم الخط A).
- أجد اقتران الشغل للفلز (A).
- إذا سقط ضوء تردد (8 × 10¹⁴ Hz)، أحدد أيّ الفلزات الثلاثة تنطلق منه الإلكترونات ضوئية. وأيها تنطلق منه الإلكترونات ذات الطاقة الحركية الأكبر.
- أرتّب اقتران الشغل للفلزات تصاعديًا من الأصغر إلى الأكبر.

13. **أستخدم الأرقام:** إذا كان الطول الموجي لفوتوны قبل الاصطدام بالكترون حُرّ ساكن ( $10^{-9} \text{ m} \times 60$ )، وبعد الاصطدام به صار ( $10^{-9} \text{ m} \times 80$ )، أحسب ما يأتي:

- الزخم الخططي للفوتوны قبل التصادم.
- الطاقة التي اكتسبها الإلكترون في أثناء عملية التصادم.

14. **أفسر:** سقطت حزمتان ضوئيتان بتردددين مختلفين ( $f_1, f_2$ ) على سطحي فلزّين مختلفين على الترتيب ( $X, Y$ ، اقتران الشغل لهما ( $\Phi_X > \Phi_Y$ )، فتحرّرت الإلكترونات لها الطاقة الحركية العظمى نفسها من سطحي الفلزّين، فأيُّ الحزمتين ترددتها أكبر؟ أفسر إجابتي.

#### أتأمل الصورة

##### الفيزياء والطاقة

توضّح الصورة أعلاه مُفاصِلاً نووياً يحول الطاقة النووية إلى طاقة كهربائية، إذ تُعدّ الطاقة النووية من مصادر الطاقة طويلة الأمد.

فما الشروط الواجب توافرها في المناطق التي تُبني فيها المفاعلات النووية؟ وما القوانين والأسس الفيزيائية التي ترتبط بهذه التكنولوجيا؟

## الفكرة العامة:

للفيزياء النووية تطبيقات كثيرة في حياتنا تشمل توليد الطاقة الكهربائية، وتشخيص الأمراض وعلاجها، وتدخل في كثير من التطبيقات الصناعية.

### الدرس الأول: تركيب النواة وخصائصها

#### Nucleus Structure and its Properties

**الفكرة الرئيسية:** تتكون النواة من بروتونات ونيوترونات. وفي الطبيعة بعض النوى تكون مستقرة، وبعضها الآخر يكون مُشعاً.

### الدرس الثاني: الإشعاع النووي الطبيعي

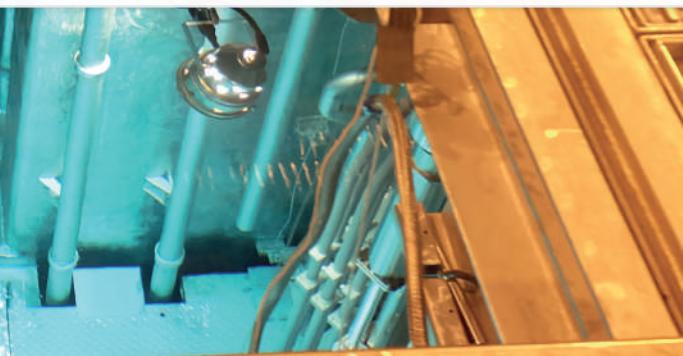
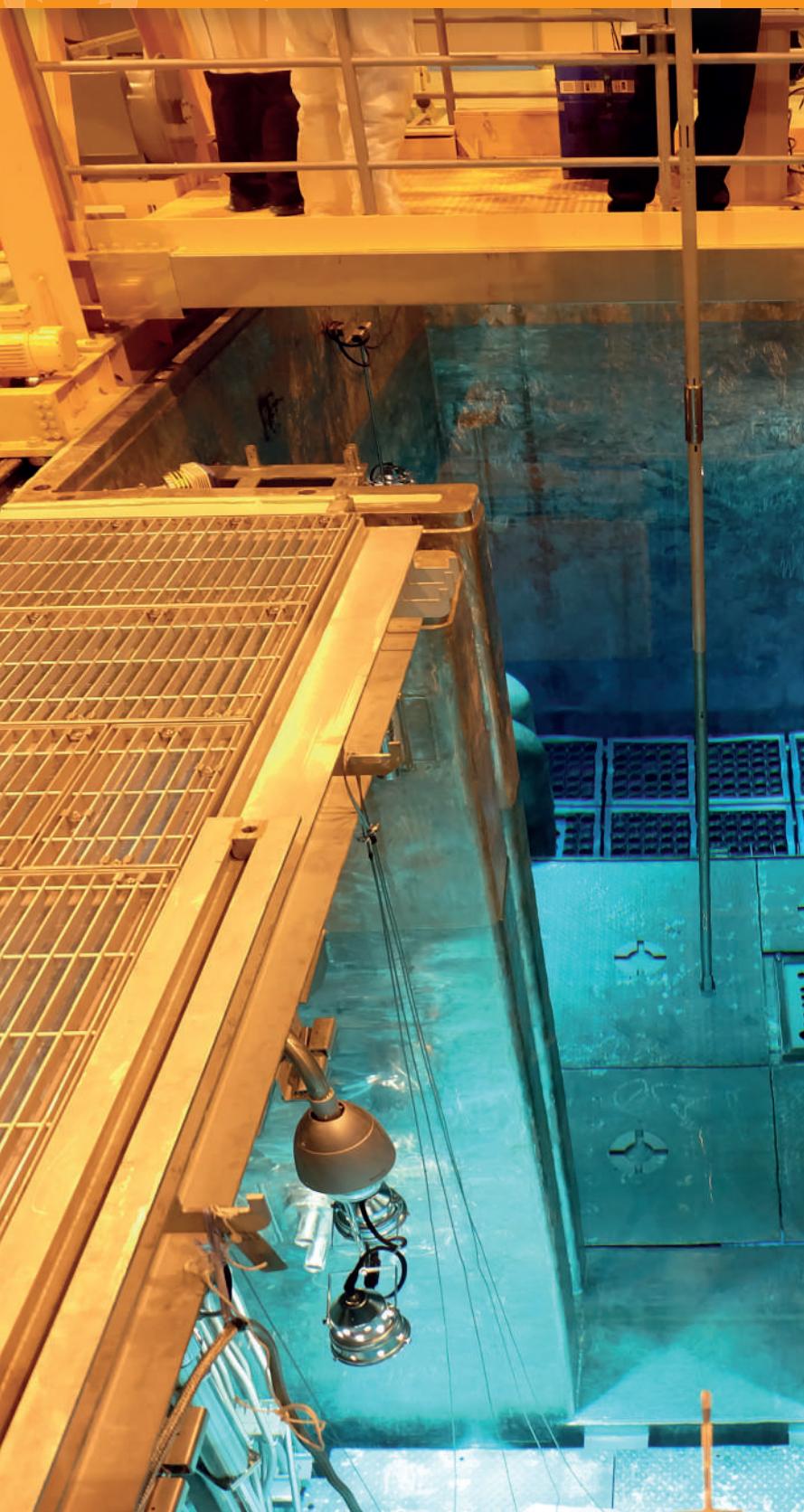
#### Natural Nuclear Radiation

**الفكرة الرئيسية:** تبعث النوى غير المستقرة إشعاعات بطيقات مختلفة، ولهذه الإشعاعات مزايا ولها أيضًا أخطار.

### الدرس الثالث: التفاعلات النووية

#### Nuclear Reactions

**الفكرة الرئيسية:** للتفاعلات النووية تطبيقات مُهمة في الحياة مثل توليد الطاقة، وإنتاج النظائر المشعة 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:**

أنفذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجتمعي:

**النموذج الأول:**

**1** أُرتب قطع الدومينو كما في الشكل (أ)، على أن تكون كل قطعة مواجهة لقطعتين من الدومينو.

**2** **أقيس:** أضرب بسبابتي الطرف العلوي للقطعة الأولى على أن تسقط نحو القطعتين المقابلتين لها، ثم أقيس الزمن اللازم لسقوط القطع جميعها، ثم أسجل الزمن في الجدول.

**3** أُكرر الخطوتين السابقتين ثلاث مرات، ثم أحسب متوسط الزمن.

**النموذج الثاني:**

**4** **أقيس:** أُرتب قطع الدومينو مرة أخرى كما في الشكل (ب) على أن تسقط القطعة الأولى قطعتي الدومينو في الصف الثاني، وتُسقط قطعة واحدة من الصف الثاني قطعتي الدومينو في الصف الثالث، وهكذا دواليك. ثم أقيس الزمن اللازم لسقوط القطع جميعها، ثم أسجل الزمن في الجدول.

**5** أُكرر الخطوة السابقة ثلاث مرات لحساب متوسط الزمن اللازم لسقوط القطع جميعها.

**التحليل والاستنتاج:**

- أقارن** بين المتوسط الزمني لسقوط القطع جميعها في النماذج.
- أستنتج:** أفترض أن كل قطعة دومينو تنتج طاقة عند سقوطها. فبأي النماذج تكون كمية الطاقة الناتجة في وحدة الزمن أكبر؟
- أتوقع:** أتخيل أن كل قطعة دومينو تسقط تمثّل انشطار نواة، فأي النماذج يمثل تفاعلاً يمكن السيطرة عليه؟

### بنية النواة Structure of the Nucleus

تتكون الذرة من نواة موجبة الشحنة تتحرك حولها إلكترونات سالبة الشحنة، ونظرًا إلى أن الذرة متعادلة كهربائيًا، فإن شحنة النواة الموجبة تساوي عدديًا شحنة الإلكترونات السالبة. وعلى الرغم من أن حجم النواة صغير جدًا مقارنة بحجم الذرة، فإن معظم كتلة الذرة تتركز في النواة على نحو ما يبيّن نتائج تجربة رذرفورد.

تتكون النواة من نوعين من الجسيمات؛ بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة، وكتلة النيوترون مقاربة لكتلة البروتون، ويُطلق اسم نيوكليون Nucleon على كل من البروتون والنيوترون.

يُطلق على عدد البروتونات داخل النواة اسم العدد الذري Atomic number ويرمز إليه بالرمز  $Z$  في حين يُسمى مجموع عدد البروتونات والنيوترونات داخل النواة العدد الكتلي Mass number ويرمز إليه بالرمز  $A$ . والعدد الذري يعبر عن شحنة النواة، ويساوي عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة. ويُعبر عن نواة أي عنصر برمزه الكيميائي، إضافة إلى عددها الذري وعددها الكتلي على النحو الآتي:



حيث  $X$  تمثل الرمز الكيميائي للعنصر.

وتتساوى نوى عنصر معين في عددها الذري، ولكنها قد تختلف في عددها الكتلي؛ بسبب اختلاف عدد النيوترونات فيها، وتُسمى نظائر Isotopes. ومثال ذلك  $^{12}_6 C$  و  $^{14}_6 C$ ، وهي ذرات للعنصر (الكربون) نفسه كونها تمتلك العدد الذري نفسه.

ونظرًا إلى صغر كتل النوى، فإن وحدة الكيلوغرام (kg) غير مناسبة للتعبير عن كتلتها؛ لذا عُرفت وحدة كتلة جديدة تتناسب مع كتل النوى تُسمى وحدة الكتلة الذرية (amu) Atomic mass unit، وتساوي  $\frac{1}{12}$  من كتلة نظير الكربون 12 (  $^{12}_6 C$  ) :

$$1 \text{ amu} = 1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

ويوضح الجدول (1) كتلة كل من البروتون والنيوترون والإلكترون، بوحدة الكيلوغرام ووحدة الكتلة الذرية (amu) حيث أضيف الإلكترون من أجل المقارنة.

أتحقق: أُعرّف العدد الكتلي والعدد الذري للنواة.

الفكرة الرئيسية:

تتكون النواة من بروتونات ونيوترونات. وفي الطبيعة بعض النوى تكون مستقرة، وبعضها الآخر يكون مشعًا.

نتائج العلم:

- 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.
- أحلل منحنى الاستقرار النووي.
- أحسب طاقة الربط النووي لكل نيوكليون ودورها في تحديد النوى الأكثر استقرارا.

المفهوم والمصطلحات:

Nucleon	نيوكليون
Isotopes	النظائر
Atomic Mass Unit	وحدة الكتلة الذرية
Stability Valley	نطاق الاستقرار
Nuclear Binding Energy	طاقة الربط النووية
Strong Nuclear Force	قوة نووية قوية

الجدول (1):

كتلة كل من البروتون والنيوترون والإلكترون.

الكتلة (amu)	الكتلة (kg)	الجسيم
0.000549	$9.1094 \times 10^{-31}$	إلكترون
1.007276	$1.672619 \times 10^{-27}$	بروتون
1.008665	$1.674929 \times 10^{-27}$	نيوترون

## خصائص النواة Properties of the Nucleus

معظم النوى شكلها كروي تقريباً، وقد أثبتت التجارب العملية أنَّ نصف قطر النواة ( $r$ ) يتناسب مع الجذر التكعيبي لعدد其 الكتلي:

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

حيث  $r_0$ : ثابت يساوي تقريباً  $1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$

وعليه، فإنَّ حجم النواة ( $V$ ) يتناسب طردياً مع عدد其 الكتلي:

$$V = \frac{4\pi}{3} r^3 = \frac{4\pi}{3} r_0^3 A$$

ونظرًا إلى أنَّ النواة تتكون من نيوكليلونات (بروتونات ونيوترونات) كتلتها متقاربة، فإنَّه يمكن التعبير عن كتلة النواة بدلالة كتلة النيوكليلون على النحو الآتي:

$$m = m_{\text{nuc}} A$$

حيث  $m_{\text{nuc}}$ : متوسط كتلة النيوكليلون وتساوي تقريباً  $(1.66 \times 10^{-27} \text{ kg})$ .

وبقسمة كتلة النواة على حجمها أجد أنَّ كثافة النواة لا تعتمد على عدد其 الكتلي، وهذا يعني أنَّ كثافة المادة النووية عند مركز النواة متساوية في النوى جميعها، وهي كثافة كبيرة جدًا تساوي تقريباً  $(2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3)$ ، فلو افترضنا أنَّ الأرض تتكون من مادة نووية فقط (نيوكليلونات) وكتافتها تساوي كثافة النواة، لكان كرت قطراها تقريباً  $180 \text{ m}$  فقط.

### المثال 1

يمثل الشكل (1) رسمًا تخطيطيًّا لنواة عنصر الكربون ورمزه  $C$ ، حيث تمثل الكرات الحمراء البروتونات، والكرات الزرقاء النيوترونات. باستخدام الشكل المجاور أجد ما يأتي: العدد الذري، الشحنة الكهربائية للنواة، عدد النيوترونات، العدد الكتلي، عدد النيوكليلونات.

المعطيات: الشكل

المطلوب:  $Z = ?$ ,  $A = ?$ ,  $N = ?$ ,  $q = ?$

الحلّ:

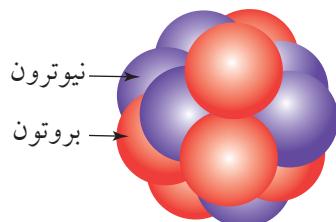
العدد الذري يساوي عدد البروتونات وهو:  $6$

الشحنة الكهربائية للنواة:  $q = Ze = 6 \times 1.6 \times 10^{-19} = 9.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

عدد النيوترونات:  $N = 6$

العدد الكتلي للنواة:  $A = Z + N = 6 + 6 = 12$ ، وهو يساوي عدد النيوكليلونات.

لذا تُكتب النواة على الشكل:  $^{12}_6 C$



الشكل (1): نواة الكربون.

**أفخر:** هل تختلف النظائر بعضها عن بعض في الخصائص الكيميائية أم الفيزيائية؟

**أتحقق:** هل تزداد كثافة النواة بزيادة العدد الكتلي أم تبقى ثابتة؟

## المثال 2

أجد لكّل من النوى الآتية العدد الذريّ والعدد الكتليّ، وعدد النيوكليلونات والنيوترونات، ثم أضعها في جدول:



المُعطيات:  $^{16}_8 O, \quad ^{17}_8 O, \quad ^{206}_{82} Pb, \quad ^{208}_{82} Pb$

المطلوب:  $Z, A, N$

عدد النيوكليلونات	$A$	$N$	$Z$	النواة
16	16	8	8	$^{16}_8 O$
17	17	9	8	$^{17}_8 O$
206	206	124	82	$^{206}_{82} Pb$
208	208	126	82	$^{208}_{82} Pb$

## المثال 3

أجد كتلة البروتون بوحدة الكتلة الذريّة.

المُعطيات: كتلة البروتون  $m_p = 1.672622 \times 10^{-27} \text{ kg}$  من جدول (1).

المطلوب:  $m_p = ?$  بوحدة  $amu$

الحلّ:

$$m_p = 1.672622 \times 10^{-27} \text{ kg} \times \frac{1 \text{ amu}}{1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg}} = 1.007276 \text{ amu}$$

## المثال 4

أجد نسبة نصف قطر النواة  $^{8A}_{Z_1} X$  إلى نصف قطر النواة  $^{A}_{Z_2} Y$ .

المُعطيات:  $A_X = A, A_Y = 8A$

المطلوب:  $\frac{r_X}{r_Y}$

الحلّ:

$$\frac{r_X}{r_Y} = \frac{r_0 \sqrt[3]{A_X}}{r_0 \sqrt[3]{A_Y}} = \frac{\sqrt[3]{A}}{\sqrt[3]{8A}} = \frac{1}{\sqrt[3]{8}} = \frac{1}{2}$$

ت تكون النواة من نيوترونات متعادلة الشحنة، وبروتونات موجبة الشحنة محصورة في حيز صغير جدًا، وتأثير البروتونات بعضها في بعض بقوة تنافر كهربائية. ولو كانت قوة التنافر الكهربائية هي القوة الوحيدة التي تؤثر في البروتونات، لانفصلت وابعد بعضها عن بعض، فما الذي يمنع النواة من التفكك؟

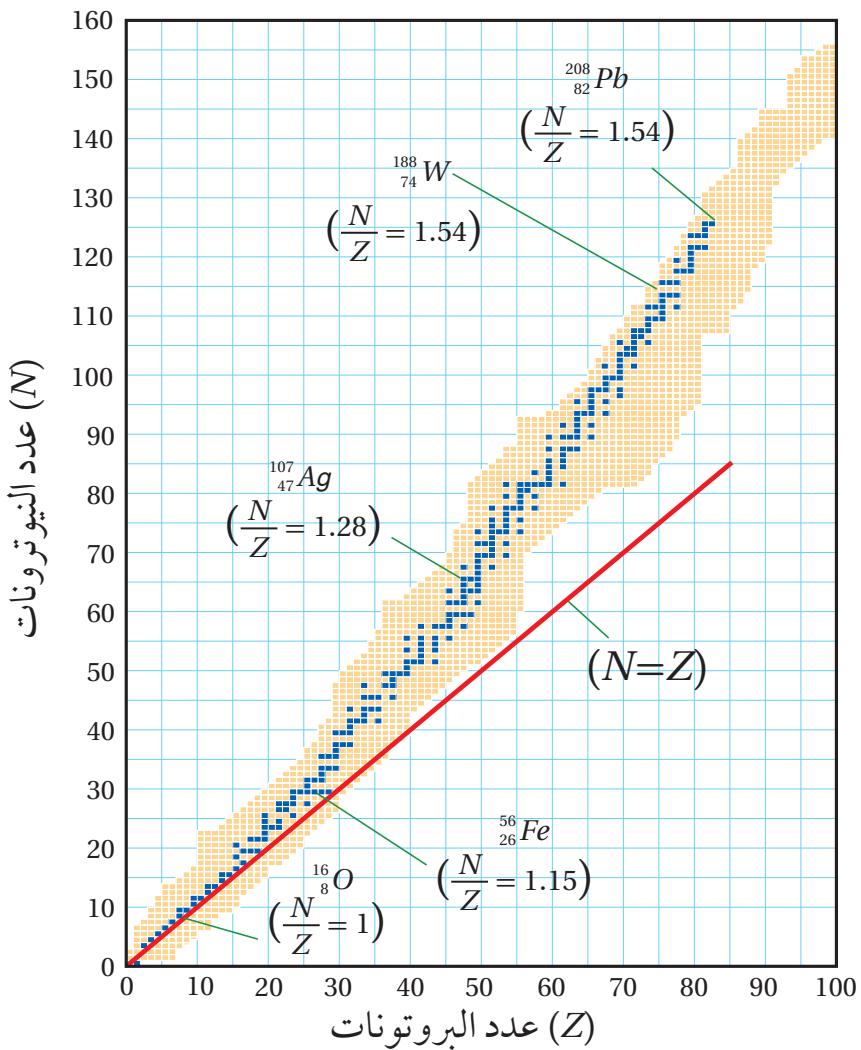
لابد من وجود قوة تجاذب بين البروتونات لتعتبر على قوة التنافر الكهربائية، وهذه القوة هي **القوة النووية القوية** Strong nuclear force. وسنكتفي في هذا الكتاب بتسميتها قوة نووية، وهي قوة تجاذب كبيرة بين النيوكليونات، ولا تعتمد على الشحنة الكهربائية؛ أي أنها تكون قوة تجاذب بين: بروتون وبروتون، بروتون ونيترون، نيترون ونيترون. والقوة النووية قصيرة المدى لا يظهر تأثيرها إلا إذا كانت النيوكليونات قريبة جدًا بعضها من بعض. فإذا زادت المسافة بين نيوكليون وآخر عن  $3 \text{ fermi}$ ، فإن القوة النووية تندفع بينهما، علمًا أن  $1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$ ، حيث تُستخدم

هذه الوحدة في الفيزياء النووية نظرًا إلى أن أبعاد النواة صغيرة جدًا. يوجد في الطبيعة العديد من النوى المستقرة التي تبقى على حالها بمرور الزمن، وتوجد أيضًا نوى أخرى غير مستقرة قد تفقد طاقة أو تشع جسيمات نووية، وتحوّل إلى نوى أخرى أكثر استقرارًا، على نحو ما سأعلم لاحقًا. فما الذي يجعل بعض النوى مستقرًا، وبعضها الآخر غير مستقر؟

إن استقرار النواة يخضع لعوامل عدّة، أحدها نسبة عدد النيوترونات إلى عدد البروتونات في النواة، باستثناء ذرة الهيدروجين التي تتكون نواتها من بروتون واحد، لا يوجد نواة مستقرة تحتوي على بروتونات فقط؛ لأن قوة التنافر الكهربائية بين البروتونات ستؤدي إلى عدم استقرار النواة، أما النيوترونات فهي متعادلة كهربائياً، لذا تسهم في زيادة قوة التجاذب النووية، ما يؤدي إلى استقرار النواة. وهذا يعني أن نسبة عدد النيوترونات إلى عدد البروتونات عامل مهم في استقرار النواة.

**أَفَكَرْ:** أيهما أكبر القوة النووية المؤثرة في نيوكليون موجود على سطح النواة أم المؤثرة في نيوكليون موجود داخل النواة؟ أفسّر ذلك.

**أَتَحَقَّقَ:** هل يمكن لنواة تحتوي على بروتونات فقط أن تكون مستقرة؟ أفسّر إجابتي.



الشكل (2): توزيع النوى بحسب عدد البروتونات والنيوترونات ونطاق الاستقرار.

عند تمثيل العلاقة بين عدد البروتونات وعدد النيوترونات للنوى ببيانياً، نحصل على الشكل (2)، حيث مثلت النوى المستقرة بنقاط زرقاء والنوى غير المستقرة مثلت بنقاط صفراء، وألاحظ من الشكل (2) أن النوى المستقرة تقع ضمن نطاق ضيق يُسمى **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  $(\frac{N}{Z})$  لهذه النوى قريبة من (1). أما النوى المستقرة التي عددها الذري  $(20 \leq Z \leq 82)$  فإن نسبة  $(\frac{N}{Z})$  لها أكبر من (1) وتزداد هذه النسبة بزيادة العدد الذري.

ولا توجد نوى مستقرة عددها الذري  $(Z > 82)$ ؛ لأن عدد البروتونات يصبح كبيراً، ما يؤدي إلى زيادة قوة التناfar الكهربائية إلى حد يؤدي إلى عدم استقرار النواة.

**أتحقق:** كيف تغير نسبة  $\frac{N}{Z}$  التي تحقق الاستقرار للنوى مع تغير العدد الذري؟

## طاقة الربط النووية 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) وتنسّم العلاقة السابقة تكافؤ (الكتلة - الطاقة).

عندما تقل كتلة جسم بمقدار  $\Delta m$  فإن هذا النقصان في الكتلة يتحول إلى طاقة يمكن حسابها باستخدام العلاقة  $E = \Delta mc^2$ . كما يمكن للطاقة أن تتحول إلى كتلة؛ فعندما تزداد كتلة جسم بمقدار  $\Delta m$  فإن الطاقة اللازمة لحدوث ذلك تعطى بالعلاقة السابقة. وهذه التغييرات يمكن ملاحظتها على مستوى الأجسام الذرية أو دون الذرية (دون الجاهريّة) على نحو ما هو موجود في التفاعلات النووية.

ونظرًا إلى أنّ سرعة الضوء كبيرة جدًا، فإنّ تغييرًا صغيرًا جدًا في الكتلة يتبع عنه مقدار كبير من الطاقة. فتعزز الكتلة بمقدار ( $1 \text{ amu} = 1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) يتبع منه طاقة مقدارها ( $1.494449 \times 10^{-10} \text{ J}$ ، وهذا يساوي (931.5 MeV) تقريبًا، أي أنّ:

$$1 \text{ amu} = 931.5 \text{ MeV}$$

وبذلك عند استخدام الكتلة بوحدة (amu)، يمكن كتابة معادلة تكافؤ (الكتلة - الطاقة) على الصورة:

$$E = \Delta m \times 931.5 \text{ MeV}$$

ومن الناحية العملية، بهذه الصورة لمعادلة تكافؤ (الكتلة - الطاقة) هي المستخدمة في الحسابات النووية.

**أتحقق:** أكتب بالرموز علاقة تكافؤ (الكتلة - الطاقة).

ترتبط النيوكليونات داخل النواة بعضها بعض بقوة التجاذب النووية القوية. ولفصل النيوكليونات بعضها عن بعض يجب تزويدها بطاقة تمكنها من التغلب على قوة التجاذب النووية. وتُعرّف طاقة الربط النووية

**Nuclear binding energy (BE)** بأنّها الطاقة التي يجب تزويدها للنواة لفصل مكوناتها (النيوكليونات) بعضها عن بعض نهائياً.

$BE/A$ (MeV)	$BE$ (MeV)	$A$	النواة
5.606	39.24	7	ليثيوم ( $^7_3 Li$ )
8.795	545.26	62	نيكل ( $^{62}_{28} Ni$ )
8.554	915.26	107	فضة ( $^{107}_{47} Ag$ )
7.875	1622.32	206	رصاص ( $^{206}_{82} Pb$ )

إن الفرق بين كتلة النواة ومجموع كتل مكوناتها مضروبًا بمرربع سرعة الضوء يساوي طاقة الربط النووية، ويُحسب فرق الكتلة من العلاقة الآتية :

$$\Delta m = Z m_p + N m_n - M$$

حيث  $M$ : كتلة النواة

كتلة البروتون  $m_p$

كتلة النيوترون  $m_n$

علمًا أن مجموع كتل مكونات النواة دائمًا أكبر من كتلة النواة.  
وتحسب طاقة الربط النووية ( $BE$ ) بوحدة (MeV) لأى نواة من العلاقة الآتية :

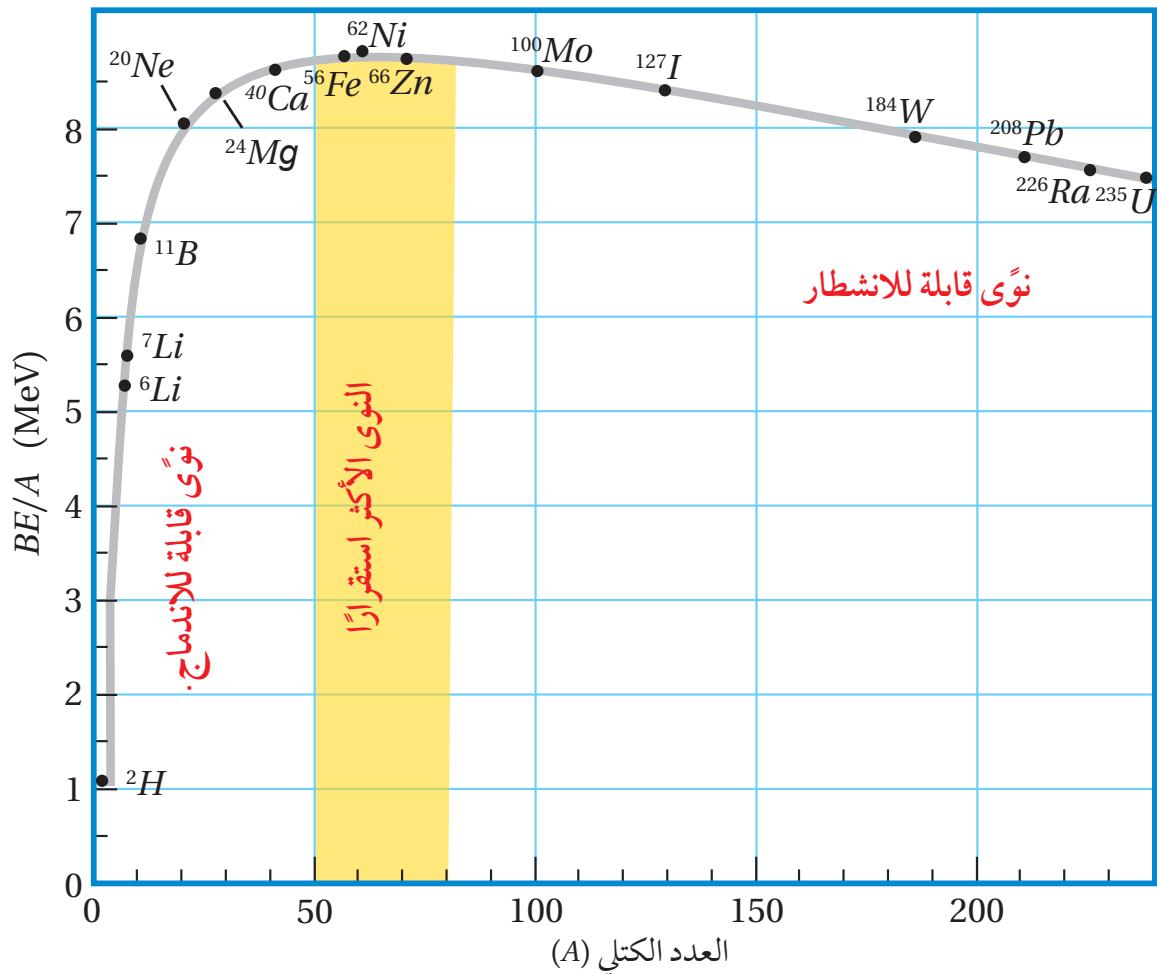
$$BE = \Delta m \times 931.5 = (Z m_p + N m_n - M) \times 931.5$$

ويبيّن الجدول (2) طاقة الربط النووية لبعض النوى، وعلى نحو ما هو متوقع، كلّما زاد عدد النيوكليونات، زادت الطاقة اللازمة لفصلها، أي زادت طاقة الربط النووية.

تعرف طاقة الربط النووية لكل نيوكليلون ( $BE/A$ ) بأنها حاصل قسمة طاقة الربط النووية على عدد النيوكليونات ( $A$ ) في النواة. وتعدّ مقياساً لمدى استقرار النواة. فنواة ( $^{62}_{28} Ni$ ) لها أكبر طاقة ربط نووية لكل نيوكليلون (8.795 MeV)؛ لذا فهي أكثر استقراراً من النوى الثلاث الأخرى المُبيّنة في الجدول (2). فكلّما زادت طاقة الربط النووية لكل نيوكليلون، زاد استقرار النواة.

أتحقق ✓

إذا كان الفرق بين كتلة نواة  
ومجموع كتل مكوناتها  
يساوي ( $1.64 \times 10^{-28}$  kg)،  
أجد طاقة الربط النووية  
للنواة بوحدة الجول (J).



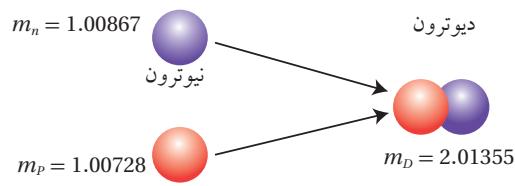
الشكل (3): منحى يمثل علاقه طاقة الربط النوويه لكل نيوكليون بالعدد الكتلي.

الشكل (3) يوضح أن طاقة الربط النووي لكل نيوكليون ( $BE/A$ ) قليلة للنوى الخفيفه مثل ( $H^2$ ) وتزايد 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 استقراراً عن طريق زيادة قيمة ( $BE/A$ ). لذلك تميل النوى الخفيفه لتكوين نوى ذات عدد كتلي أكبر وطاقة الربط لكل نيوكليون لها أكبر، أما النوى الثقيلة فتميل للانشطار وينتج عن ذلك نوى ذات عدد كتلي أقل وطاقة ربط لكل نيوكليون أكبر. إن اندماج نواتين خفيفتين أو انشطار نواة ثقيلة يحرر طاقة؛ لأن النوى الناتجة في الحالتين ذات طاقة ربط نووية لكل نيوكليون أكبر.

أتحقق: أي النوى أكثر استقراراً؟ ✓

## المثال 5



الشكل (4): اندماج النيوترون والبروتون لتكونين الديوترون.

تُسمى نواة الديتيريوم بالديوترون ( $^2H_1 \equiv D$ )، وتتكوّن من بروتون ونيوترون كما في الشكل (4)، أحسب فرق الكتلة بين كتلة الديوترون ومجموع كتلتي البروتون والنيوترون، ثم أحسب الطاقة المكافئة لها، مُعتمِداً على الجدول الآتي:

الكتلة (amu)	الجسيم أو النواة
1.00728	$m_p$
1.00867	$m_n$
2.01355	$m_D$

المعطيات: الكتل في الجدول

المطلوب:  $\Delta m = ?$ ,  $BE = ?$

الحلّ:

$$\Delta m = m_n + m_p - m_D = 2.01595 - 2.01355 = 0.00240 \text{ amu}$$

$$BE = \Delta m \times 931.5 = 0.00240 \times 931.5 = 2.24 \text{ MeV}$$

لاحظ أنّ مجموع كتلتي البروتون والنيوتون منفردين أكبر من كتلة الديوترون، فأين ذهب فرق الكتلة؟ عند اندماج البروتون والنيوتون لتكونين الديوترون يتحول فرق الكتلة إلى طاقة، وتساوي طاقة الرابط النووي للديوترون.

## المثال 6

إذا كان فرق الكتلة بين كتلة نواة ( $^{208}_{82} Pb$ ) وكتلة مكوّناتها يساوي ( $2.90 \times 10^{-27} \text{ kg}$ )، أحسب طاقة الرابط النووية للنواة بوحدة J وبوحدة MeV.

المعطيات:

$$\Delta m = 2.90 \times 10^{-27} \text{ kg}, c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}, 1 \text{ amu} = 931.5 \text{ MeV}$$

المطلوب:  $BE$  بوحدة J وبوحدة MeV

الحلّ:

بوحدة الجول

$$BE = \Delta m c^2 = 2.90 \times 10^{-27} \times (3.0 \times 10^8)^2 = 2.6 \times 10^{-10} \text{ J}$$

لحساب الطاقة بوحدة (MeV)، أحوّل الطاقة من وحدة (J) إلى وحدة (MeV) على النحو الآتي:

$$BE = 2.6 \times 10^{-10} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 1.6 \times 10^9 \text{ eV} = 1600 \text{ MeV}$$

## المثال 7

أجد طاقة الربط النووية وطاقة الربط النووية لكُل نيوكليون لنواة كُل من (الرصاص  $^{206}_{82}Pb$  والليثيوم  $^7_3Li$ )، علماً أنَّ كتل النوى مرفقة في الجدول الآتي:

$m_{^{206}_{82}Pb}$	$m_{^7_3Li}$	$m_n$	$m_p$	الجُسيم أو النواة
205.92945	7.01436	1.00867	1.00728	الكتلة (amu)

المُعطيات: الجدول،  $amu = 931.5 \text{ MeV}$

المطلوب:  $BE=?$ ,  $BE/A=?$

الحلّ:

$$\begin{aligned} BE(Pb) &= (Z m_p + N m_n - M) \times 931.5 \\ &= (82 \times 1.00728 + 124 \times 1.00867 - 205.92945) \times 931.5 \\ &= 1.7426 \times 931.5 = 1623 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\frac{BE(Pb)}{A} = \frac{1623}{206} = 7.878 \text{ MeV}$$

$$\begin{aligned} BE(Li) &= (Z m_p + N m_n - M) \times 931.5 \\ &= (3 \times 1.00728 + 4 \times 1.00867 - 7.01436) \times 931.5 \\ &= 0.04216 \times 931.5 = 39.27 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\frac{BE(Li)}{A} = \frac{39.27}{7} = 5.610 \text{ MeV}$$

# مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أوضح المقصود بما يأتي: النيوكليون، طاقة الربط النووية، نطاق الاستقرار.

2. **أستنتج:** النواة ( $X$ ) لها ثمانية أضعاف العدد الكتلي للنواة ( $Y$ ). أجد نسبة:

أ. نصف قطر النواة ( $X$ ) إلى نصف قطر النواة ( $Y$ ).

ب. حجم النواة ( $X$ ) إلى حجم النواة ( $Y$ ).

ج. كثافة النواة ( $X$ ) إلى كثافة النواة ( $Y$ ).

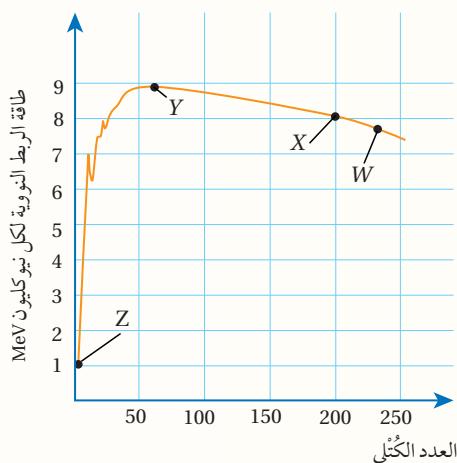
3. **استخدم الأرقام:** أجد عدد النيوترونات في نواة عنصر عدده الذري يساوي (31)، ونصف قطر نواته ( $m = 4.8 \times 10^{-15} \text{ m}$ ).

4. **استخدم الأرقام:** أحسب طاقة الربط النووية وطاقة الربط النووية لكل نيوكليون لنواتي (النيكل  $^{62}_{28}Ni$  ، والحديد  $^{56}_{26}Fe$ ) ، حيث:

$m_{^{56}_{26}Fe}$	$m_{^{62}_{28}Ni}$	$m_n$	$m_p$	الجسيم أو النواة (amu) الكتلة
55.92066	61.91297	1.00867	1.00728	

5. **أستنتج:** يمثل الجدول الآتي: طاقة الربط النووية والعدد الكتلي لبعض النوى، فأي النوى أكثر استقراراً؟

العدد الكتلي	طاقة الربط النووية	النواة
200	1600 MeV	X
56	492 MeV	Y
4	28 MeV	Z



6. **أستنتج:** يمثل المنهجي المجاور العلاقة بين طاقة الربط النووية لكل نيوكليون والعدد الكتلي لنوى العناصر ( $Z, Y, X, W$ ). اعتماداً على المنهجي ، أجب عن الأسئلة الآتية:

أ. أي هذه العناصر أكثر استقراراً؟ ولماذا؟

ب. أي هذه العناصر أكثر قابلية للانشطار ، وأيها أكثر قابلية للاندماج عند إحداث تفاعل نووي؟

ج. أحسب طاقة الربط النووية لنواة العنصر ( $X$ ).

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:

د. 0.97.

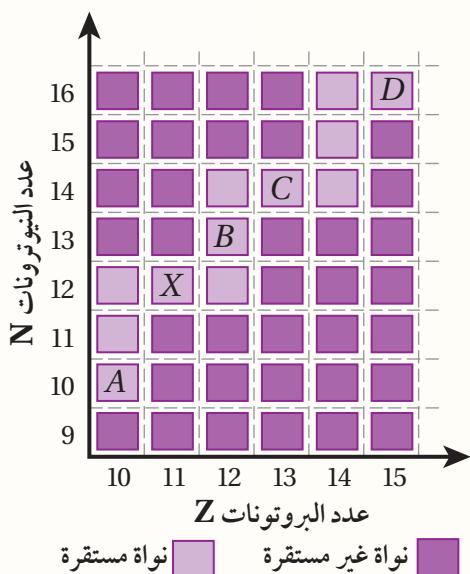
ج. 103.79.

ب. 214.77.

أ. 903.56.

2. العبارة التي تصف العلاقة بين النواتين ( $^{218}_{84}X$  ،  $^{220}_{86}Y$ ) وصفاً صحيحاً، هي:

- ب. عدد النيوترونات للنواتين متساوٍ.  
د. عدد النيوترونات للنواة ( $X$ ) أكبر.  
أ. عدد النيوكليلونات للنواتين متساوٍ.  
ج. العدد الذري للنواة ( $X$ ) أكبر.



\* معتمداً على الشكل المجاور الذي يبين جزءاً 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:

ب.  $\frac{5}{4}$       أ.  $\frac{4}{5}$

د.  $\frac{6}{5}$       ج.  $\frac{1}{1}$

4. إذا كانت طاقة الربط النووية للنواة ( $X$ ) تساوي (186.3 MeV)، فإن طاقة الربط النووية لكل نيوكليلون لهذه النواة بوحدة (MeV) تساوي:

د. 0.1200

ج. 16.94

ب. 15.50

أ. 8.100

5. النواة التي لها أكثر من نظير مستقر من بين النوى: ( $A, X, C, D$ )

د.  $D$

ج.  $C$

ب.  $X$

أ.  $A$

### الاضمحلال الإشعاعي Radioactive Decay

اكتشف العالم بيكرل عام 1896 أنّ أملاح اليورانيوم تؤثّر في الألواح الفوتوغرافية، بالرغم من تغليفها لحمايتها من الضوء ومنعه من التأثير فيها، وخلص إلى أنّ أملاح اليورانيوم تبعث تلقائياً دون الحاجة إلى تحفيز خارجيّ، نوعاً جديداً من الإشعاع. وفي نهاية القرن التاسع عشر، اكتشفت ماري كوري وزوجها بيير كوري عنصريْن جديديْن يُصدرا نوحاً مماثلاً للإشعاع الصادر عن أملاح اليورانيوم، وأطلقَا عليهما البولونيوم والراديوم.

وبيّنت التجارب أنّ هناك ثلاثة أنواع من الإشعاعات أطلقَ عليها جسيمات ألفا ( $\alpha$ ) وبيتا ( $\beta$ ) وغاما ( $\gamma$ ). وجسيمات ألفا هي نوى الهيليوم ( ${}^4_2He^{+2}$ )، أمّا جسيمات بيتا، فقد تكون بيتا السالبة ( $\beta^-$ ) وهي إلكترونات ( $e^-$ ، أو بيتا الموجبة وهي بوزيترونات ( $e^+$ )). والبوزيترون جسيم له كتلة إلكترون نفسها، لكنّه يحمل شحنة موجبة مساوية لشحنة الإلكترون ( $C = 1.6 \times 10^{-19}$ ). أمّا أشعة غاما، فهي أشعة كهرمغناطيسية (فوتونات) ذات تردد عالٍ ليس لها كتلة أو شحنة. **الاضمحلال الإشعاعي Radioactive decay** هو التحول التلقائي لنوء غير مستقرة إلى نوء أكثر استقراراً عن طريق انبعاث جسيمات مثل جسيم ألفا أو جسيم بيتا، غالباً ما يصاحب ذلك انبعاث أشعة غاما.

الإشعاعات النووية الثلاثة؛ ألفا وبيتا وغاما، تُعدّ جميعها من الإشعاعات النووية المؤينة بسبب قدرتها على تأين ذرات الوسط الذي تمرّ فيه. إنّ كتلة جسيمات ألفا نحو أربعة أضعاف كتلة البروتون تقريباً، وشحنتها ضعفاً شحنة البروتون، وهذا يجعل تفاعلاً لها مع ذرات الوسط الذي تمرّ فيه كبيراً مقارنة بتفاعل جسيمات بيتا وأشعة غاما، فتفقد طاقتها بسرعة؛ لذا فإنّ قدرتها على تأين ذرات الوسط الذي تمرّ فيه أكبر من قدرة جسيمات بيتا وأشعة غاما، في حين أنّ قدرتها على النفاذ أصغر. وفي المتوسط، تعبّر جسيمات ألفا في الهواء مسافة (3.7 cm) تقريباً قبل أن

الفكرة الرئيسية :

تبعد النوى غير المستقرة إشعاعات بطاقة مختلفة، وهذه الإشعاعات مزايا ولها أيضاً أخطار.

نتائجُ التعلم :

أقارن بين جسيمات ألفا وبيتا وأشعة غاما اعتماداً على تفاعلاتها مع الأوساط الماديّة.

أصف التغيرات التي تطرأ على خصائص النواة عند انبعاث أحد الإشعاعات النوويّة منها (ألفا أو بيتا أو غاما).

أحلل رسوماً بيانياً لتناقص عدد النوى المشعة مع الزمن وأربطه بعمر النصف للنظير المشع.

أوضح المقصود بالنشاطية الإشعاعية وأعبر عنها بمعادلة رياضية.

أحلل سلاسل الاضمحلال الإشعاعي مبيناً عدد الجسيمات المنبعثة ونوعها.

المفاهيم والمصطلحات :

الاضمحلال الإشعاعي

Radioactive Decay

عمر النصف

Half-Life

النشاطية الإشعاعية

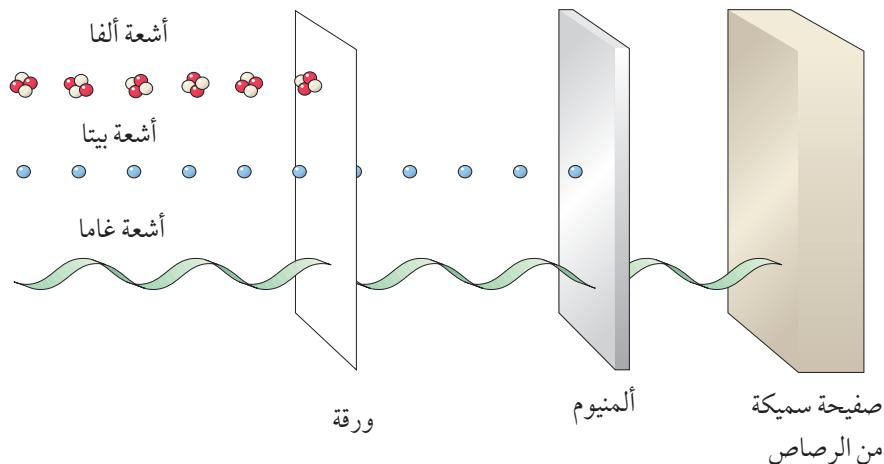
Activity

سلالس الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي

Natural Radioactive Decay Series

الشكل (5): قدرة الأشعة النووية ألفا وبيتا وغاما على النفاذ.

لماذا اخترقت أشعة غاما الورقة والألمنيوم في حين لم تخترق ألفا الورقة؟



تمتص طاقتها كاملة. ويمكن أيضًا امتصاص طاقة جسيم ألفا كاملة باستخدام حاجز رقيق من الورق. أما أشعة غاما، فهي الأقل قدرة على التأين والأكثر قدرة على الاختراق؛ لأنّها لا تحمل شحنة كهربائية، وليس لها كتلة. ولمقارنة قدرة الإشعاعات النووية الثلاثة على اختراق الأوساط المادّية أتمّل الشكل (5). ويمثّل الجدول (3) مقارنة بين خصائص الإشعاعات النووية.

يُطلق على انبعاث جسيمات ألفا أو انبعاث جسيمات بيتا أو انبعاث أشعة غاما أضمحلالًا. في ما يأتي سأعرّف المزيد عن هذه الأضمحلالات الثلاثة.

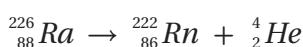
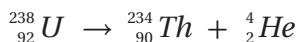
الجدول (3): خصائص الإشعاعات النووية.

غاما	بيتا	الفا	نوع الأشعة
ليس لها شحنة	$-e$ أو $+e$	$+2e$	الشّحنة
صفر	$0.0005 \text{ amu}$	$4.0015 \text{ amu}$	الكتلة
كبيرة (بضعة ملليمترات من الألمنيوم)	متوسطة (ستمتات عدّة من الرصاص)	قليله (تمتص باستخدام حاجز رقيق من الورق)	القدرة على النفاذ
قليله	متوسطة	كبيرة	القدرة على التأين

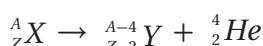
**أتحقق:** أقارن بين الإشعاعات النووية ألفا وبيتا وغاما من حيث قدرة كل منها على التأين، وقدرتها على الاختراق.

## اضمحلال ألفا Alpha Decay

جسيمات ألفا ( $\alpha$ ) تبعث في الغالب من النوى الثقيلة ( $Z > 82$ ) غير المستقرة، ويخرج نوأة جديدة تختلف في عددها الذري وعددها الكتلي عن النواة الأم، على نحو ما هو موضح في ما يأتي:



فجسيم ألفا ابعت من نوأة نظير اليورانيوم ( $^{238}_{92} U$ ) غير المستقر (النوأة الأم) ليخرج من ذلك نوأة نظير الثوريوم ( $^{234}_{90} Th$ ). وعندما يغادر جسيم ألفا النواة، فإنّها تخسر بروتونين ونيوترونين؛ لذا فإنّ العدد الذري للنواة الناتجة يقلّ 2، في حين يقلّ عددها الكتلي بمقدار 4 مقارنة بالنواة الأم كما في المعادلتين السابقتين. ويمكن التعبير عن معادلة اضمحلال ألفا بالمعادلة الآتية:



الاحظ أن مجموع العدد الذري للنوى والجسيمات الناتجة من اضمحلال يساوي العدد الذري للنواة المضمحلة، وكذلك مجموع العدد الكتلي للنوى والجسيمات الناتجة من اضمحلال يساوي العدد الكتلي للنواة المضمحلة.

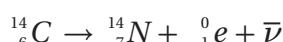
**أتحقق:** أبين ما التغيير الذي يطرأ على كلّ من العدد الذري والعدد الكتلي للنواة الأم عند اباعث جسيم ألفا منها.

تحوي أجهزة إنذار الدخان مصدرًا إشعاعيًّا صغيرًا يطلق جسيمات ألفا، وعادةً ما يكون نظير الأمريسيوم 241. حيث تعمل جسيمات ألفا على تأمين جزيئات الهواء داخل جهاز الإنذار، وهذا يؤدي إلى مرور تيار كهربائي. وعندما يمتصّ الدخان بعض جسيمات ألفا، فإنه يقلّل من عدد الأيونات في الهواء ويقلّ التيار الكهربائي، فينطلق جهاز إنذار الحريق، وأتمّل الشكل.



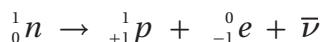
## اضمحلال بيتا Beta Decay

إنّ النوى التي تقع فوق نطاق الاستقرار تمتلك فائضًا من النيوترونات، ويلزمها تقليل عدد النيوترونات وزيادة عدد البروتونات لتقترب نسبة ( $\frac{N}{Z}$ ) فيها من نسبة الاستقرار، ويحدث ذلك عن طريق إشعاع جسيم بيتا السالبة ( $\beta^-$ )، وهو إلكترون ( $e^-$ ) ومثال ذلك التفاعل الآتي:

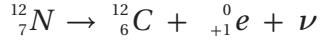


الاحظ أنّ العدد الذري للنواة الناتجة قد زاد بمقدار (1)، في حين بقي العدد الكتلي ثابتاً مقارنة بالنواة الأم. والرمز ( $\bar{\nu}$ ) يمثل جسيماً يُسمّى ضديد النيوتروينو، وهو جسيم متعادل الشّحنة، وكتلته متناهية الصغر.

وينتاج جسيم بيتا السالبة من تحلل أحد نيوترونات النواة (وهي نواة الكربون  $^{14}_6C$  في هذا المثال) وتحوله إلى بروتون، وجسيم بيتا السالبة، وضديد النيوتروين  $(\bar{\nu})$  على نحو ما في المعادلة الآتية:

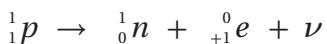


أما النوى التي تقع أسفل نطاق الاستقرار، فإنّها تمتلك فائضاً من البروتونات، ولكي تصل إلى حالة الاستقرار يتطلّب ذلك تقليل عدد البروتونات وزيادة عدد النيوترونات، ويتحقق ذلك بإشعاع جسيم بيتا الموجبة ( $\beta^+$ ) وهو بوزترون ( $^{+1}_0e$ ). ومثال ذلك التفاعل الآتي:



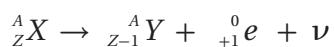
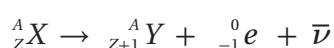
الاحظ أنّ العدد الذري للنواة الناتجة يقلّ بمقدار (1) عن النواة الأم، في حين بقي العدد الكُتّلّي ثابتاً. ويُطلق على الجسيم ( $\nu$ ) النيوتروينو، وهو جسيم متعادل الشّحنة ذو كتلته متناهية الصغر.

وينتاج جسيم بيتا الموجبة من تحلل أحد بروتونات النواة الأم (وهي  $^{12}_7N$  في هذا المثال) وتحوله إلى نيوترون وجسيم بيتا الموجبة ونيوتروينو على نحو ما في المعادلة الآتية:



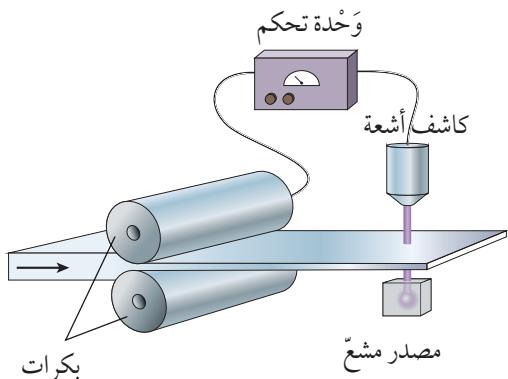
وتجدر الإشارة إلى أنّ النواة لا تحتوي إلكترونات أو بوزترونات، وهذه الجسيمات تنشأ لحظة تحول بروتون إلى نيوترون، أو العكس عند حدوث اضمحلال بيتا، وتغادر النواة مباشرة.

ويمكن التعبير عن معادلتي اضمحلال بيتا السالبة وبيتا الموجبة بالمعادلتين الآتىين:



### الربط بالเทคโนโลยيا

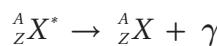
تُستخدم الأشعة النووية في التحكم في سُمك المواد المصنعة كما في الشكل. حيث يوضع أسفل الشريط مصدر مشعّ، وستُستقبل الأشعة بعد نفاذها من الشريط عن طريق كاشف يُرسل بدوره إشارة إلى جهاز التحكم عن مقدار الأشعة التي وصلت إليه، والتي تعتمد على سمك الشريط.



## اضمحلال غاما Gamma Decay

تعلّمْتُ أنَّ الإلكترونات تتوزَّعُ في مستويات طاقة في الذرة، كذلك تتوزَّعُ النيوكليلونات في مستويات طاقة في النواة بداعٍ من مستوى الاستقرار Ground state وهو المستوى الأقل طاقة للنواة.

عند إشعاع النواة جسيمات ألفا أو بيتا، تُنْتج نواة جديدة قد تكون في حالة إثارة، وللانتقال إلى حالة أكثر استقراراً، يمكن لهذه النواة أن تخلص من الفائض في طاقتها عن طريق إصدار أشعة غاما، وهي أشعة كهرومغناطيسية (فوتونات) ذات تردد كبير جدًا، وليس لها شحنة أو كتلة؛ لذلك لا يتغيَّر العدد الذري أو العدد الكُلُّي للنواة عند انبعاثها. ويمكن التعبير عن اضمحلال غاما بالمعادلة الآتية:

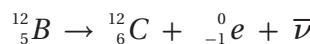


حيث  ${}_{Z}^{A}X^*$  : النواة في حالة إثارة.

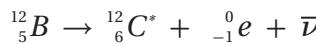
${}_{Z}^{A}X$  : النواة في حالة الاستقرار.

$\gamma$  : أشعة غاما المنبعثة.

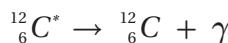
وطاقة أشعة غاما المنبعثة تساوي فَرق الطاقة بين حالة الإثارة وحالة الاستقرار للنواة الناتجة. ومن الأمثلة على ذلك، نواة البورون  ${}_{5}^{12}B$ ، حيث تُعد نواة البورون من باعثات بيتا السالبة؛ لأنَّها تمتلك عدَّاً من النيوترونات أكبر من عدد البروتونات، وعدها الذري أقل من 20؛ لذا فهي تتموضع فوق نطاق الاستقرار. ويبيَّن الشكل (6) رسمًا تخطيطيًّا لتغييرات الطاقة عند اضمحلال نواة البورون ( ${}_{5}^{12}B$ ) بطريقتين: الطريقة الأولى تُنْتج نواة الكربون-12 في حالة الاستقرار بحسب المعادلة الآتية:



حيث يتحرَّر 13.4 MeV من الطاقة نتيجة لهذا اضمحلال، والطريقة الثانية ينتج منها نواة الكربون-12 في حالة إثارة وطاقتها 4.4 MeV كما هو مبيَّن في المعادلة الآتية:

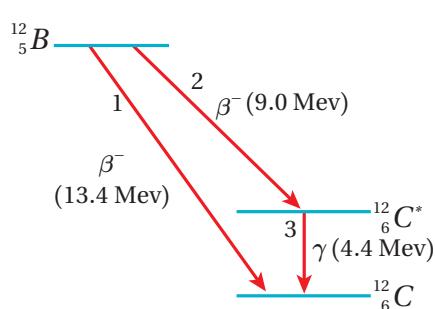


حيث  ${}_{6}^{12}C^*$  نواة الكربون المثار، ويتحرَّر مقدار من الطاقة يساوي 9.0 MeV نتيجةً لهذا اضمحلال. وتخلص ذرة الكربون المثار ( ${}_{6}^{12}C^*$ ) من الطاقة الفائضة بإطلاق أشعة غاما طاقتها تساوي 4.4 MeV لتصل إلى حالة الاستقرار بحسب المعادلة الآتية:



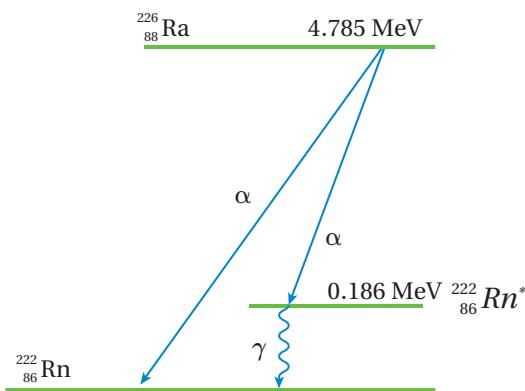
## الربط بالเทคโนโลยيا

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 عنصِرٌ نقاط الضعف في اللحام على اللوحة الفوتوغرافية بطريقة مشابهة لصورة الأشعة السينية للعظم المكسور.



الشكل (6): اضمحلال نواة البورون-12 بطريقتين.

أتحقق: أبِّين ما يحدُث لـكُلِّ من العدَّين الذري والكُلُّي للنواة عند انبعاث أشعة غاما منها.



الشكل (7): اضمحلال نواة الراديوم-226.

يمثل الشكل (7) اضمحلال نواة الراديوم ( $^{226}_{88}\text{Ra}$ ) إلى نواة الرادون ( $^{222}_{86}\text{Rn}$ ). عند الكشف عن جسيمات ألفا، وجد أنها توجد على هيئة بطاقيتين مختلفتين.

أ. ما مقدار طاقتى جسيم ألفا؟

ب. ما مقدار طاقة أشعة غاما؟

ج. أكتب معادلة اضمحلال أشعة غاما.

د. أكتب معادلة اضمحلال ألفا الذي ينتج منه طاقة أكبر.

المعطيات: الشكل (7).

المطلوب:  $E_\gamma$ ,  $E_\alpha$ , معادلة اضمحلال غاما، معادلة اضمحلال التي تُنتج جسيم ألفا بطاقة أكبر.

الحل:

أ. طاقتى جسيم ألفا هما:

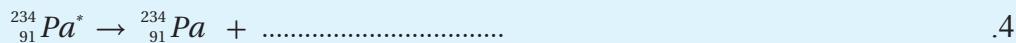
ب. طاقة أشعة غاما

ج. معادلة اضمحلال غاما

د. معادلة اضمحلال ألفا الذي ينتج منه طاقة أكبر

لتمرين

أكمل المعادلات النووية الآتية:



**المواد والأدوات:** 50 قطعة نقدية معدنية.

**إرشادات السلامة:** عدم اللعب بالقطع، أو رميها باتجاه الزملاء/ الزميلات.

**خطوات العمل:**

أنفذ الخطوات الآتية بالتعاون مع أفراد مجموعتي:

- أقي القطع النقدية معًا على سطح الطاولة، ثم أحصي عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى، وأرمز إليها بالرمز ( $N$ )، ثم أدون ذلك في الجدول.  
(تُعدُّ القطعةُ التي ظهرت فيها الكتابةُ إلى الأعلى نواةً مضمحةً، والقطعةُ التي ظهرت فيها الصورة إلى الأعلى نواةً مشعةً).

- أجمع القطع النقدية التي ظهرت فيها الصورة للأعلى (المشعة) ثم ألقها مرة أخرى، وأحصي عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى، ثم أدون ذلك في الجدول.

- أكرر الخطوة السابقة حتى يصبح عدد القطع النقدية التي ظهرت فيها الصورة للأعلى أقلً من أربع قطع.  
ثم أدون النتائج في الجدول.

**التحليل والاستنتاج:**

- ما العلاقة بين مقدار النقص في عدد القطع النقدية التي ظهرت فيها الصورة للأعلى ( $\Delta N$ ) وعدد القطع النقدية التي أُلقيت في كل محاولة.

- أمثل بيانًا** النتائج المرصودة في الجدول بوضع عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى على محور  $z$ ، وعدد المحاولات على محور  $x$ .

- استنتاج:** أقسّم عدد الصور في كل محاولة على عدد الصور في المحاولة التي تسبّبها. هل يمكن استنتاج نمط رياضي يربط  $\left(\frac{N}{N_0}\right)$  بعدد المحاولات ( $n$ )؟

- استنتاج:** إن احتمال الحصول على صورة أو كتابة في رمي القطع النقدية يساوي  $\left(\frac{1}{2}\right)$ ، وهذا يعني توقع الحصول على نصف العدد من الصور في كل محاولة، وهذا يشبه عمر النصف في الأضمحلال الإشعاعي  $(t_{1/2})$ ، أستنتاج العلاقة بين عدد المحاولات وعمر النصف وزمن الأضمحلال.

- أتوقع:** إذا بدأت بعدد قطع يساوي (1000)، فما عدد القطع المتبقى لدى بعد محاولتين؟

## عمر النصف Half-life

الجدول (4): عمر النصف لبعض النظائر المشعة.

العنصر	عمر النصف
$^{238}_{92} U$	$4.47 \times 10^9$ y
$^{235}_{92} U$	$7.04 \times 10^8$ y
$^{232}_{90} Th$	$1.41 \times 10^{10}$ 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

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** ( $t_{1/2}$ ). يُبيّن الجدول (4) بعض النظائر المشعة وعمر النصف لكل منها.

في التجربة (1)، يمكن معاملة المحاولة الواحدة لالقاء القطع النقدية معاملة عمر نصف واحد، فبعد كل محاولة يقل عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى إلى النصف تقريرًا، أي بعد كل عمر نصف، فإن عدد النوى المشعة يقل إلى النصف. فلو بدأنا بعينة عدد النوى المشعة فيها ( $N_0 = 600$ ), وعمر النصف لها ( $t_{1/2} = 2$  days), فإن عدد النوى المشعة المتبقية بعد مرور يومين يصبح ( $N = 300$ ), وبعد مرور أربعة أيام، أي بعد مرور عمري نصف ( $2t_{1/2}$ ), فإن عدد النوى المشعة المتبقية يصبح ( $N = 150$ ) نواة، وهكذا كما يوضح الشكل (8).

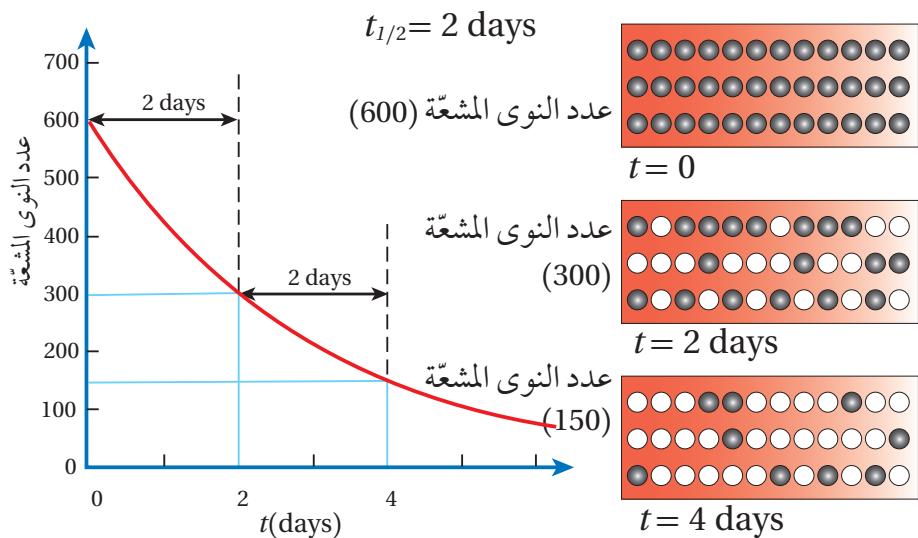
يمكن ربط عمر النصف بعدد النوى المشعة المتبقية على النحو الآتي:

$$N_0 \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{2} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{4} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{8} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{16} \dots \dots \dots$$

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 المشعة مع الزمن.



حيث  $(t_{1/2})$  عمر النصف،  $(N_0)$  عدد النوى المشعة عند لحظة  $(0)$ ،  $(N)$  عدد النوى المشعة 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 المشعة، فيقل عدد النوى التي تضمحل في الثانية الواحدة. وتعبر النشاطية الإشعاعية **Activity** عن عدد الأضمحلات في الثانية الواحدة، ويرمز إليها بالرمز  $(A)$ . وتناسب النشاطية الإشعاعية طردياً مع عدد النوى المشعة عند لحظة زمنية معينة، فعند الزمن  $(t)$  تحسب النشاطية الإشعاعية من العلاقة:

$$A = \lambda N$$

حيث  $(\lambda)$  : ثابت التنااسب، ويسمى ثابت الأضمحلال، و  $(N)$  عدد النوى المشعة عند اللحظة نفسها، وعند الزمن  $(0)$ ، فإن  $(A_0 = \lambda N_0)$ ، وهي النشاطية الإشعاعية الابتدائية. تفاصس النشاطية الإشعاعية بوحدة بيكرل  $(\text{Bq})$  وتساوي أضمحلالاً واحداً في الثانية، أو بوحدة كوري  $(\text{Ci})$  حيث  $(1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq})$ .

عند مرور زمن يساوي عمر النصف على العينة المشعة، فإن النشاطية الإشعاعية لها تقليل إلى النصف. ويمكن الربط بينهما على النحو الآتي:

$$A_0 \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{2} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{4} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{8} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{16} \dots \dots \dots$$

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 الأضمحلال بالعلاقة الآتية:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

يلاحظ من هذه العلاقة أن عمر النصف يتنااسب عكسياً مع ثابت الأضمحلال؛ فعندما يكون ثابت الأضمحلال كبيراً، يكون عمر النصف صغيراً.

✓ **أتحقق:** أُعْرِف النشاطية الإشعاعية وعمر النصف.

## المثال 9

يُستخدم الغاليوم - 67 في التسخين الطبي. إذا علمت، أن ثابت الأضمحلال له ( $2.4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )، وقشت النشاطية الإشعاعية لعينة منه فكانت (4680 Bq)، فأجد الزمن اللازم حتى تصبح النشاطية الإشعاعية (1170 Bq).

المُعطيات:  $A_0 = 4680 \text{ Bq}$ ,  $\lambda = 2.4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ,  $A = 1170 \text{ Bq}$

المطلوب:  $t = ?$

الحل:

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \Rightarrow \frac{1170}{4680} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

$$\frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \Rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

$$\frac{t}{t_{1/2}} = 2 \Rightarrow t = 2t_{1/2} = \frac{2 \times 0.693}{\lambda} = \frac{1.39}{2.4 \times 10^{-6}} = 5.8 \times 10^5 \text{ s}$$

وهذا يعني أن

## المثال 10

يُستخدم نظير الكوبالت - 60 في تعقيم الأجهزة الطبية وفي علاج مرض السرطان. عمر النصف لنظير الكوبالت (60<sup>Co</sup>) يساوي (5.27 y)، قشت النشاطية الإشعاعية لعينة منه عند لحظة زمنية معينة فوجدتها (0.200  $\mu\text{Ci}$ ). أجد ما يأتي:

أ. عدد النوى المشعة في العينة.

ب. النشاطية الإشعاعية بعد زمن يساوي ثلاثة أضعاف عمر النصف.

المُعطيات:  $A_0 = 0.200 \mu\text{Ci}$ ,  $t_{1/2} = 5.27 \text{ y}$

المطلوب:  $N_0 = ?$ ,  $A(t = 3t_{1/2}) = ?$

الحل:

أ. نحول النشاطية الإشعاعية من وحدة  $\mu\text{Ci}$  إلى وحدة  $\text{Bq}$

$$A_0 = 0.200 \mu\text{Ci} = 0.200 \times 3.7 \times 10^{10} \times 10^{-6} = 7.4 \times 10^3 \text{ Bq}$$

ثم أحول عمر النصف إلى وحدة (s)

$$t_{1/2} = 5.27 \text{ y} = 5.27 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 166 \times 10^6 \text{ s}$$

وأجد  $\lambda$  من العلاقة

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{166 \times 10^6} = 4.18 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

ثم أعرض في العلاقة

$$A_0 = \lambda N_0$$

$$7.4 \times 10^3 = 4.18 \times 10^{-9} N_0$$

$$N_0 = 1.8 \times 10^{12} \text{ nuclei}$$

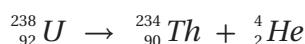
ب. بعد مرور زمن بقدر عمر نصف واحد تقل النشاطية الإشعاعية للنصف، وتصبح ( $0.100 \mu\text{Ci}$ )، وبعد مرور عمر نصف ثانٍ تصبح النشاطية الإشعاعية ( $0.050 \mu\text{Ci}$ )، وبعد عمر نصف ثالث تصبح النشاطية الإشعاعية ( $0.025 \mu\text{Ci}$ ).

### لتمرين

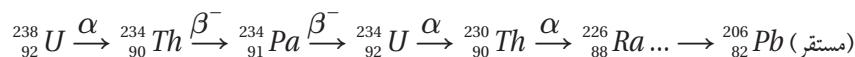
**استخدم الأرقام:** يُستخدم اليود المشع في علاج سرطان الغدة الدرقية، فإذا كان عمر النصف له (8 days) تقريرًا، أجد الزمن اللازم حتى يضمحل (75%) من عينة محددة منه.

### سلسل الأضمحلال الإشعاعي الطبيعي Natural Radioactive Decay Series

اليورانيوم ( $^{234}_{92} \text{U}$ ) عنصر مشع يضمحل ليتتج منه نظير الثوريوم ( $^{234}_{90} \text{Th}$ )، بحسب التفاعل الآتي:



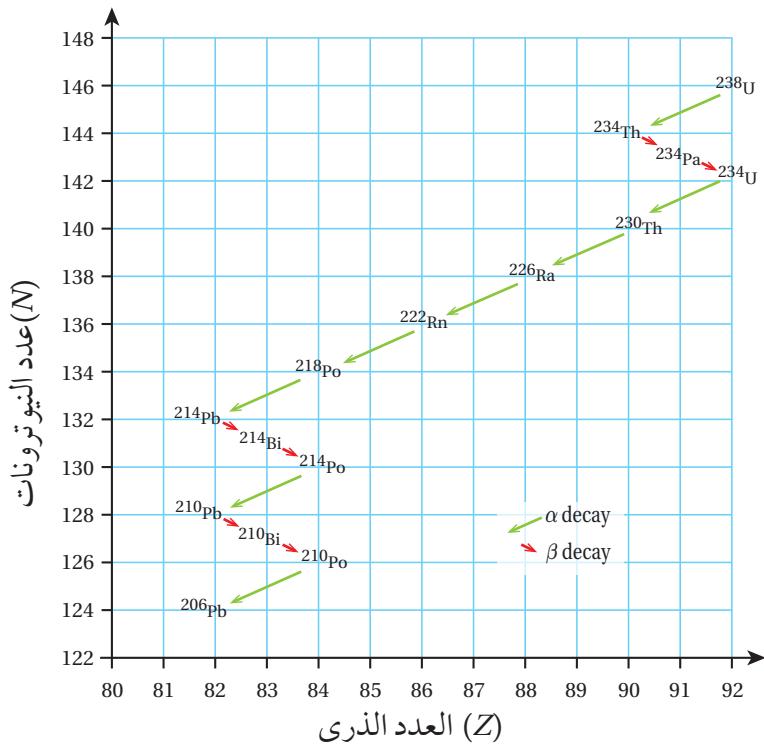
لكن نظير الثوريوم ( $^{234}_{90} \text{Th}$ ) مشع أيضًا، ويضمحل ليتتج منه نظير مشع جديد ( $^{234}_{91} \text{Pa}$ )، وتنتمي سلسلة الأضمحلالات عن طريق إشعاع جسيمات ألفا أو بيتا حتى تنتهي بعنصر مستقر على النحو الآتي:



تسمى مجموعة الأضمحلالات التلقائية التي تبدأ بعنصر مشع ثقيل (موجود في الطبيعة)، وتنتهي بعنصر مستقر عبر أضمحلالات عددة لألفا وبيتا **سلسلة الأضمحلال الإشعاعي الطبيعي Natural radioactive decay series**. وسلسل

الأضمحلال الإشعاعي الطبيعي ثالث سلسل، هي: سلسلة اليورانيوم وتبدأ بنظير اليورانيوم ( $^{238}_{92} \text{U}$ )، وسلسلة الثوريوم وتبدأ بنظير الثوريوم ( $^{232}_{90} \text{Th}$ )، وسلسلة الأكتينيوم وتبدأ بنظير اليورانيوم ( $^{235}_{92} \text{U}$ ). وجميع هذه السلسل تبدأ بنظير ثقيل

غاز الرادون المشعّ أحد النظائر في سلسلة اليورانيوم. يستقصي الجيولوجيون نسبة الرادون في المياه الجوفية والترابية للتنبؤ بالنشاط الزلزالي. فزيادة تركيزه قد تكون علامة على وقوع زلزال قریب. ويستطيع الجيولوجيون تقدير عمر الصخور من معرفة نسبة الرصاص إلى اليورانيوم  $^{238}$  في الصخور.

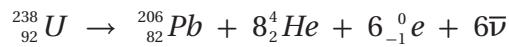


الشكل (9): سلسلة اضمحلال اليورانيوم.

تحتوي أجسام الكائنات الحية على نظير الكربون المشع ( $^{14}_6C$ )، ونسبة لنظير الكربون المستقر ( $^{12}_6C$ ) ثابتة في أجسام الكائنات الحية خلال وجودها على قيد الحياة. وب مجرد موت الكائن الحي تقلّ هذه النسبة. وبمعرفة هذه النسبة يستطيع علماء الآثار حساب زمن وفاة الكائن الحي.

مشعّ عمر النصف له كبير، وتنتهي بأحد نظائر الرصاص المستقر. وتسمّى كل سلسة باسم النظير المشعّ الذي له أطول عمر نصف فيها.

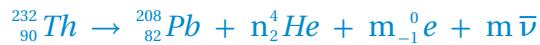
ونظرًا إلى أنّ اليورانيوم  $^{238}_{92}U$  له أكبر عمر نصف ( $4.47 \times 10^9$  y) بين النظائر المشعّة في سلسلة اليورانيوم، فقد سُمِّيت باسمه. ويمكن التعبير عن هذه السلسلة بيانًا على منحنى ( $N-Z$ ) كما في الشكل (9). ويمكن التعبير عن هذه السلسلة أيضًا بالمعادلة الآتية:



لاحظ من المعادلة السابقة أنّ العددين الذريّ والكتّلّي محفوظان.

**أتحقق:** ما المقصود بسلسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي? ✓

يمكن التعبير عن سلسلة اضمحلال الثوريوم بالمعادلة:



أجد عدد جسيمات بيتا السالبة ( $m$ ), وعدد جسيمات ألفا ( $n$ ) في المعادلة السابقة.

## المعطيات: المعادلة النووية.

المطلوب:  $n = ?$ ,  $m = ?$

## الحلّ:

أُطْبِقْ مِبْدأ حِفْظِ الْعَدْدِ الْكُتُلِيِّ لِحِسَابِ (n)

$$\sum A_{before} = \sum A_{after}$$

$$232 = 208 + 4n + 0(m)$$

$$n = \frac{232 - 208}{4} = 6$$

ثم أطّبِقْ مبدأ حفظ العدد الذري لحساب (m)

$$\sum Z_{before} = \sum Z_{after}$$

$$90 = 82 + 2 \times 6 - m$$

$$m = 4$$

لَمْ يَرْأَ

**استنتاج:** تمثل المعادلة الآتية جزءاً من سلسلة اليورانيوم:



أ . ما اسم الجُسيمين ( $g$ ) و  $(h)$  ؟

بـ. إذا أنيعت 6 جسيمات ألفا وجسيماً بيتا السالبة للوصول إلى النواة ( ${}^A_Z X$ )، أجد  $Z$  و  $A$ .

## مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أوضح المقصود بالاضمحلال الإشعاعي وعمر النصف والنشاطية الإشعاعية.

أ. أنس:

أ. إشعاع النواة لجسيم ألفا أو جسيم بيتا قد يصاحبه ابعاث أشعة غاما.

ب. ابعاث جسيمات بيتا السالبة من النواة بالرغم من عدم احتواء النواة إلكترونات.

3. **استخدم الأرقام:** يدرس أسامة نظيرًا مشعًا في مختبر الإشعاع في جامعته. قاس نشاطيته الإشعاعية فوجدها (400) اضمحلال لكل دقيقة، وبعد ثلات ساعات أصبحت (100) اضمحلال لكل دقيقة. أجد عمر النصف للنظير المشع بالدقيقة.

4. **استخدم الأرقام:** نظير مشع نشاطيته الإشعاعية الآن (800 Bq)، وثابت الاضمحلال له ( $4 \ln(2) \text{ days}^{-1}$ )، فما المدة الزمنية اللازمة حتى تصبح نشاطيته الإشعاعية (100 Bq)؟

5. **استخدم الأرقام:** عينة من نظير الثوريوم ( $^{228}_{90} \text{Th}$ ) تحتوي على ( $2.53 \times 10^{21} \text{ atoms}$ )، وثابت الاضمحلال له يساوي ( $1.15 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ )، أجد:

أ. عمر النصف للثوريوم ( $^{228}_{90} \text{Th}$ ).

ب. النشاطية الإشعاعية لهذه العينة.

6. **استنتاج:** الفلور - 18 ( $^{18}_{9} \text{F}$ ) نظير مشع معدّ صناعيًا، عمر النصف له (110 min)، يستخدم في التصوير الطبي حيث يضمحلّ ليعطي أحد نظائر الأكسجين وبوزيترون. أعدّت سارة عينة منه تحتوي ( $2.1 \times 10^{16} \text{ atoms}$ ) لتصوير أحد المرضى.

أ. أكتب معادلة موزونة لاضمحلال الفلور.

ب. أحسب ثابت الاضمحلال له.

ج. ما عدد النوى المشعة بعد مضي (220 min)؟

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

1. الأضمحلال النووي الذي يكون فيه العدد الكتلي للنواة الأم لا يساوي العدد الكتلي للنواة الناتجة هو

أضمحلال:

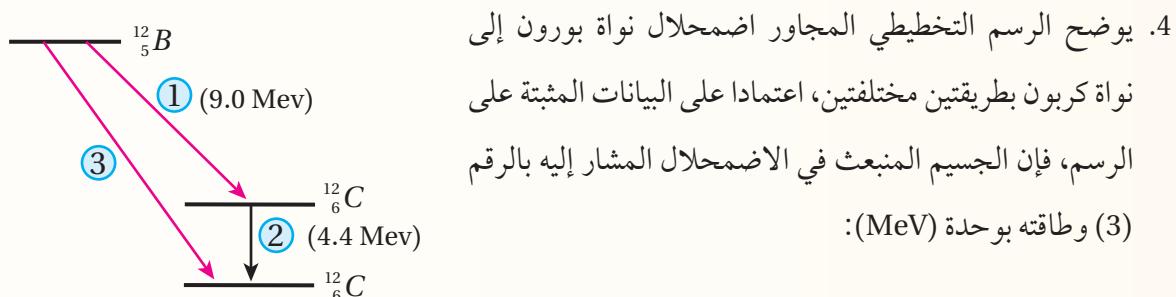
- أ. ألفا      ب. بيتا الموجب      ج. بيتا السالبة      د. غاما

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      ج. ذات تردد منخفض      د. سرعتها تساوي سرعة الضوء

3. نواة مشعة تحتوي على (84) بروتون و (126) نيوترون. النواة بعثت بجسيم ألفا، ونتج من الأضمحلال نواة جديدة هي الرصاص، أي من الآتية يمثل النواة الناتجة:

- أ.  $^{214}_{86}Pb$       ب.  $^{210}_{84}Pb$       ج.  $^{208}_{82}Pb$       د.  $^{206}_{82}Pb$



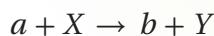
- أ. بيتا موجب وطاقته (4.6).      ب. بيتا سالب وطاقته (4.6).  
 ج. بيتا موجب وطاقته (13.4).      د. بيتا سالب وطاقته (13.4).

5. إذا كان عمر النصف للناظير (X) مثليّ عمر النصف للناظير (Y)، فإن ثابت الأضمحلال للناظير (X) يساوي:

- أ. مثليّ ثابت الأضمحلال للناظير (Y).      ب. ثابت الأضمحلال للناظير (Y).  
 ج. ربع ثابت الأضمحلال للناظير (Y).      د. نصف ثابت الأضمحلال للناظير (Y).

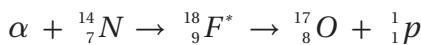
### التفاعل النووي Nuclear Reaction

يحدث **تفاعل نووي** Nuclear reaction عند اصطدام نواتي ذرتين، أو اصطدام جسيم نووي مثل، البروتون أو النيترون بروابط ذرّة أخرى، وقد ينبع من ذلك نواة جديدة أو أكثر. ولإحداث تفاعل نووي بين جسيم نواف، تقدّم النواة بذلك الجسيم وعندما يقترب منها مسافة كافية، يبدأ عندئذ تأثير القوة النووية. ويمكن التعبير عن التفاعل النووي بالصورة الآتية:



حيث يُسمى الجسيم (a) القذيفة Projectile في حين تُسمى (X) النواة الهدف Target، و (b) الجسيم الناتج من التفاعل النووي، و (Y) النواة الناتجة.

في بعض التفاعلات النووية، تمتّص النواة الهدف القذيفة لتشكل نواة مركبة Compound nucleus (CN) التي لا تثبت أن تضمّح لتعطى نوّي وجزيئات من الممكّن أن تختلف عن تلك الداخلة في التفاعل. ومن الأمثلة على ذلك، ما قام به رذرفورد عام 1919 عندما قذف نواة النيتروجين ( $^{14}_{7}N$ ) بجزيئات ألفا ( $\alpha$ )، ونتج من ذلك تحرّر بروتون على النحو الآتي:



لقد بدأ هذا التفاعل بنواة النيتروجين ( $^{14}_{7}N$ ) المستقرة مع جسيم ألفا ( $\alpha$ ) لتكوين نواة مركبة وهي نظير الفلور ( $^{18}_{9}F^*$ ) غير المستقر، التي لا تثبت أن تضمّح ليتّبع منها نواة مستقرة ( $^{17}_{8}O$ ) بروتون ( $^1_1p$ ). ومن الأمثلة الأخرى على القذائف النووية، البروتونات ونواة الديتريوم، والنيترونات. إنّ شحنة جسيئات ألفا والبروتونات موجبة، لذا تُسرّع حتى تمتلك طاقة حرّكية كافية تُمكّنها من التغلّب على قوة التناحر الكهربائية مع النواة الهدف. أمّا النيترونات المتعادلة كهربائياً، فلا تتأثّر بقوّة تناحر كهربائية؛ لذا تُعدّ من القذائف المهمّة في إنتاج النظائر المشعّة، التي تُستخدم في العديد من مجالات الحياة.

### الفكرة الرئيسية:

للتفاعلات النووية تطبيقات مهمّة في الحياة، مثل توليد الطاقة، وإنتاج النظائر المشعّة التي تُستخدم في تشخيص الأمراض وعلاجها، وفي كثير من التطبيقات الصناعية.

### تَاجِاتُ التَّعْلِمِ:

- أُفّسِر إمكانية حدوث الاندماج النووي بين نواتين حقيقيتين، وإمكانية حدوث الانشطار للنوى الثقيلة.
- أُستخدم رسوماً توضيحية في شرح كيفية توليد المفاعل النووي الطاقة الكهربائية.
- أذكر استخدامات النظائر المشعّة في مجالات الحياة المختلفة، وفوائدها ومضارها.
- أُبّين الآثار الإيجابية والآثار السلبية الناجمة عن استخدام الطاقة النووية.
- أذكر أنّ الطاقة النووية أحد مصادر الطاقة البديلة، ثم أُبّين استخداماتها السلمية.
- أحسب الطاقة الناتجة من تفاعل نووي انشطاري أو اندماجي.

### المفاهيم والمصطلحات:

Nuclear Reaction	التفاعل النووي
Compound Nucleus	النواة المركبة
Chain Reaction	التفاعل المتسلسل
Uranium Enrichment	تخصيب اليورانيوم
Critical Mass	الكتلة الحرجة
Nuclear Fission	الانشطار النووي
Nuclear Fusion	الاندماج النووي

تحسب الطاقة الممتصة أو المتحرّرة من التفاعل ( $Q$ ) من الفرق في الكتلة بين كتل النوى والجسيمات الداخلية 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 **مُتّبِغاً** للطاقة Exoergic وإذا كانت قيمة ( $Q$ ) سالبة يكون التفاعل **ماصاً** للطاقة Endoergic.

**أفّخر:** في التفاعلات النووية تُسرّع القذيفة وتُوجّه نحو النواة الهدف. فما المجالات المستخدمة في تسريع القذيفة وتوجيهها نحو النواة الهدف؟ وما دور كل منها؟

✓ **أتحقق:** أوضح المقصود بالتفاعل النووي.

## المثال 12

في التفاعل النووي الآتي:  ${}^1_0n + {}^{10}_5B \rightarrow {}^7_3Li + {}^4_2He$

أحسب الطاقة الناتجة من التفاعل بوحدة الإلكترون فولت. علمًا أن كتل الجسيمات والنوى مُبيّنة في الجدول الآتي:

${}^1_0n$	${}^{10}_5B$	${}^4_2He$	${}^7_3Li$	النواة أو الجسيم
				الكتلة ( $amu$ )
1.0087	10.0103	4.0015	7.0144	

المُعطيات: الكتل في الجدول

المطلوب:  $Q = ?$

الحل:

$$\begin{aligned}
 Q &= [m_a + m_x - (m_b + m_y)] \times 931.5 \\
 &= 1.0087 + 10.0103 - (4.0015 + 7.0144) \\
 &= 0.0031 \times 931.5 = 2.88 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

## الانشطار النووي Nuclear Fission

الانشطار النووي Nuclear fission هو انقسام نواة ثقيلة لنوتين أو أكثر، أصغر

منها في الكتلة. فعند قذف نواة نظير اليورانيوم 235-بنيوترون بطيء تنشطر إلى نوى ذات عدد كتلي أقل إضافة إلى ثلاثة نيوترونات (أو اثنين) فمثلاً، عند قذف نواة ( $^{235}_{92}U$ )

بنيوترون بطيء تنشطر إلى نوتين، هما: ( $^{141}_{56}Ba$ ) و ( $^{92}_{36}Kr$ )، ويتجزأ 3 نيوترونات سريعة، وتمتلك النوى الناتجة من هذا الانشطار طاقات ربط نووية لكل نيكيليون أكبر منها في النواة المنشطرة، كما في الجدول (5)، ويصاحب ذلك نقص في الكتلة يتحول إلى طاقة. ويمكن التعبير عن هذا الانشطار بالمعادلة النووية الآتية:



حيث نواة ( $^{236}_{92}U^*$ ) المثارة تمثل النواة المركبة في هذا التفاعل.

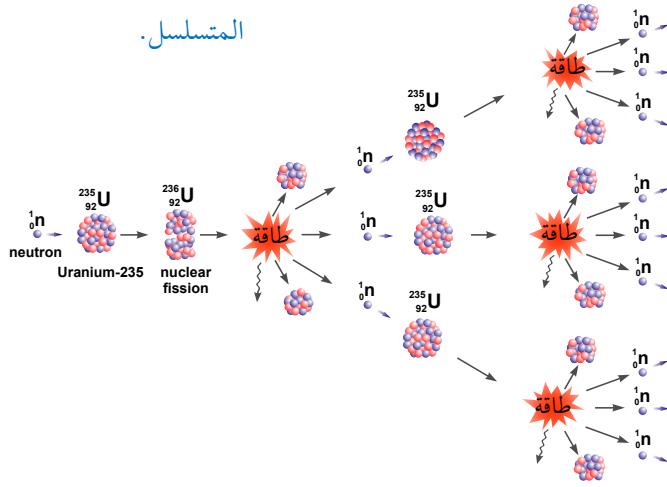
إن إنشطار كل نواة  $^{235}_{92}U$  ينتج منه طاقة تساوي (200 MeV) تقريباً، أو ما يعادل ( $10^{11} J \times 3.2$  )، أما الطاقة الناتجة من إنشطار (1 kg)، فتساوي ( $10^{12} J \times 82$  ). وهذه الطاقة تكفي لتزويد نحو (45) ألف منزل تقريباً مدة شهر، يستهلك كل منها طاقة كهربائية بمقدار (500 kWh).

النيوترونات الثلاثة الناتجة قد تسقط على ثلاثة نوى يورانيوم ( $^{235}_{92}U$ ) ما يؤدي إلى إنشطاراتها وانتاج تسعة نيوترونات جديدة قد تؤدي إلى إشطارات تسعة نوى يورانيوم ( $^{235}_{92}U$ ) وإنتاج سبع وعشرين نيوتروناً، وعندما تستمرة هذه العملية بشكل متتابع يسمى هذا النوع من التفاعل **تفاعلً مُتسلسلاً Chain reaction** على نحو ما يظهر في الشكل (10).

كي يكون التفاعل المتسلسل ممكناً من الناحية العملية يجب تحقق شروط عدّة، أهمّها توافر اليورانيوم المخصب Enriched uranium. حيث يحتوي اليورانيوم الخام (0.71%) تقريباً من اليورانيوم ( $^{235}_{92}U$ ) المستخدم في التفاعل المتسلسل، ونحو (99.27%) تقريباً من اليورانيوم ( $^{238}_{92}U$  )، ونسبة قليلة جداً من منظائر أخرى. ونظراً إلى أنّ نسبة ( $^{235}_{92}U$ ) قليلة، يجب معالجة اليورانيوم الخام لزيادة نسبة النظير ( $^{235}_{92}U$ ) الذي يستخدم في الوقود النووي.

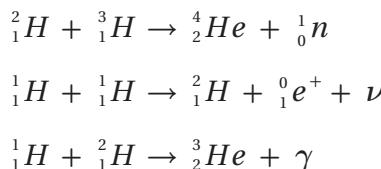
إن عملية زيادة نسبة اليورانيوم ( $^{235}_{92}U$ ) في عينة من اليورانيوم تسمى **تخصيب اليورانيوم Uranium Enrichment**. إضافةً إلى ذلك، يجب توفير الحد الأدنى من الكتلة التي تضمن استمرار حدوث التفاعل، وتسمى **الكتلة الحرجة Critical mass** وهي أقل كتلة من الوقود النووي تضمن استمرار حدوث التفاعل المتسلسل. كما يجب إبطاء سرعة النيوترونات المنبعثة لتتمكن من إحداث تفاعلات إنشطار جديدة.

الشكل (10): التفاعل المتسلسل.



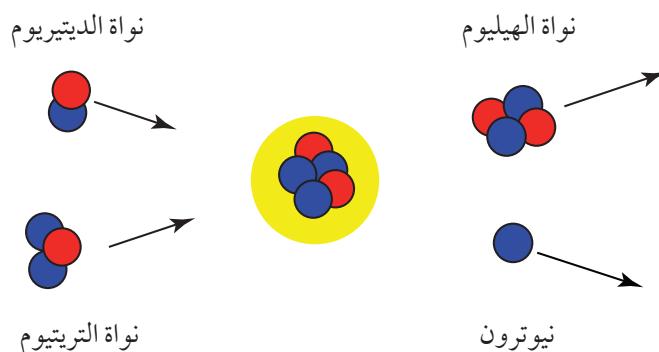
## الاندماج النووي Nuclear Fusion

يُسمى التفاعل الذي تندمج فيه نواتان خفيفتان لتكوين نواة كتلتها أقلّ من مجموع كتلتي النوأتين المندمجتين، ولها طاقة رَبْط نووية لكل نيوكليلون أكبر مما لهما، بتفاعل **الاندماج النووي Nuclear fusion** يحدث الاندماج النووي للنوى الخفيفه. فمثلاً، قد تندمج نوأنا نظيري الهيدروجين؛ الديتيريوم ( $^2_1H$ ) والتربيتوم ( $^3_1H$ ) لتكوين نواة الهيليوم ( $^4_2He$ ) ونيوترون كما في الشكل (11). يوضح الجدول (6) طاقة الربط النووية لكل نيوكليلون لكل منها. الاحظ من الجدول أنّ اندماج نوأتي الديتيريوم ( $^2_1H$ ) والتربيتوم ( $^3_1H$ ) نتج منه نواة الهيليوم ( $^4_2He$ ) ذات طاقة رَبْط نووية لكل نيوكليلون أكبر منها لكل من نوأتي الديتيريوم والتربيتوم. ويصاحب عملية الاندماج نَفَصُ في الكتلة ينتج منه تحرّر طاقة كبيرة. من الأمثلة على تفاعلات الاندماج النووي:



مثل هذه التفاعلات النووية هي مصدر الطاقة التي تصلنا من الشمس، حدوثها يحتاج إلى درجات حرارة عالية جدًّا، لذا تُسمى هذه التفاعلات التفاعلات النووية الحرارية Thermonuclear fusion reactions إنّ درجة الحرارة العالية ترود النوأتين بطاقة حركية كافية للتغلب على قوة التنافر الكهربائية بين النوأتين عند اقترابهما من بعض لمسافة تبدأ عندها القوة النووية بالتأثير.

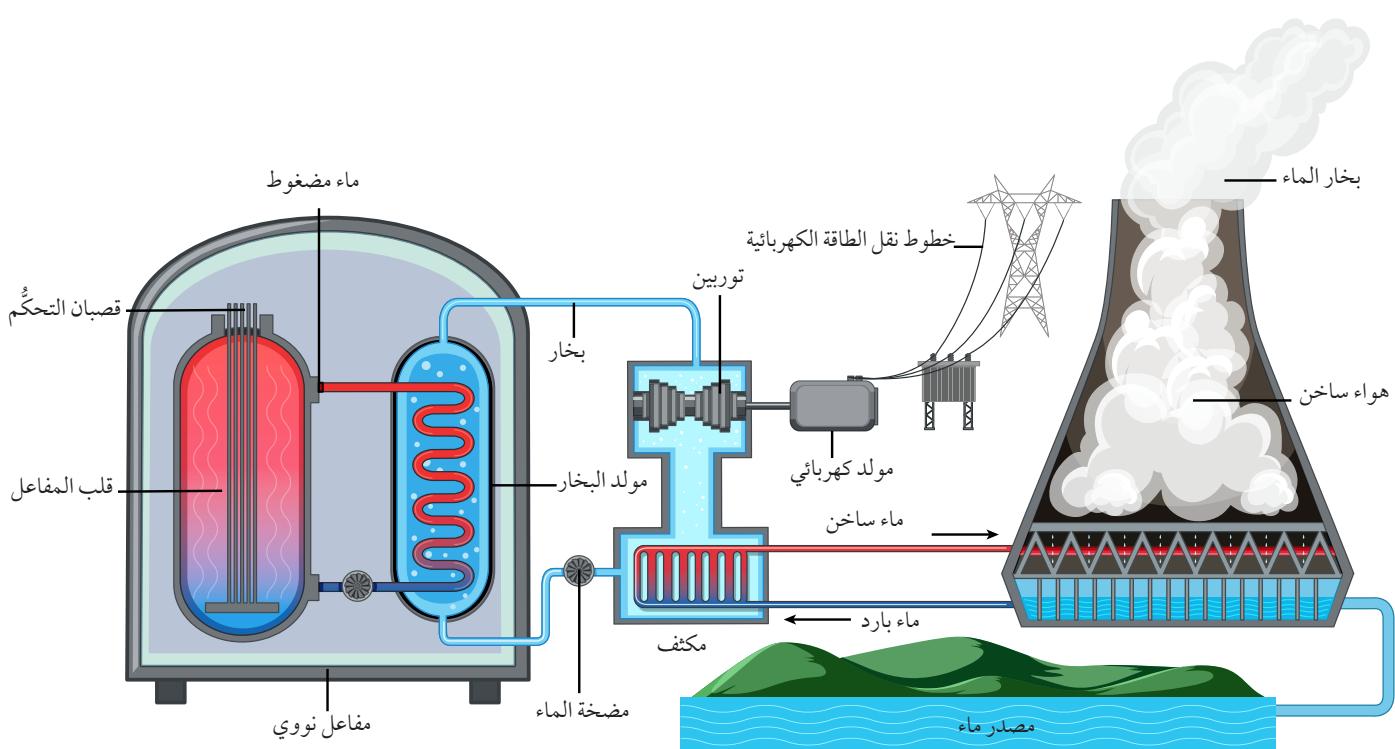
✓ **أتحقق:** ما أهمية درجة الحرارة العالية لتفاعل النووي الاندماجي؟



الجدول (6): طاقة الربط النووية لكل نيوكليلون.

$\frac{BE}{A}$ (MeV)	النواة
1.11	$^2_1H$
2.83	$^3_1H$
7.07	$^4_2He$

الشكل (11): اندماج نوأتي الديتيريوم والتربيتوم لتشكيل نواة الهيليوم.



الشكل (12): رسم تخطيطي لمحطة طاقة نووية تستخدم مفاعل الماء المضغوط.



الشكل (13): قضبان الوقود النووي.

### الربط بالفضاء

مكنت 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 فويager 1 التي أطلقت عام 1977 لدراسة النظام الشمسي الخارجي التي ماتزال ترسل بيانات إلى يومنا هذا.

## المفاعل النووي Nuclear Reactors

يُسمى النظام الذي يهيئ الظروف المناسبة لاستمرار حدوث التفاعل المتسلسل والسيطرة عليه المفاعل النووي. الشكل (12) يبيّن الأجزاء الرئيسية لمفاعل نووي يُستخدم الماء في عملية التبريد، يُسمى مفاعل الماء المضغوط .Pressurized water reactor

ويتكوّن المفاعل النووي الموضح في الشكل من الأجزاء الأساسية الآتية:

1. **الوقود النووي Nuclear fuel:** تكون مادة الوقود النووي على الغالب من اليورانيوم المخصب، وهي على هيئة أقراص يوضع بعضها فوق بعض في أنابيب طويلة لتشكيل قضبان الوقود النووي كما في الشكل (13).

2. **قضبان التحكم Control rods:** تُصنع من مواد لديها مقدرة عالية على امتصاص النيوترونات، مثل الكادميوم-113 والبورون-10. فعند إدخال عدد مناسب منها بين حزم الوقود النووي تمتّص بعض النيوترونات وهذا يُعطي التفاعل المتسلسل، وبذلك يُتحكّم في الطاقة الناتجة من المفاعل.

3. **المواد المُهَدّة Moderators:** وهي مواد ذات أعداد كُتُلية صغيرة، مثل الماء الثقيل، والماء العادي، والغرافيت. وظيفتها ابطاء النيوترونات الناتجة من الانشطار؛ لتمكّن من إحداث تفاعلات انشطارية جديدة. علمًا أنّ احتمالية انشطار نواة اليورانيوم ( $^{235}_{92}U$ ) تزداد كلما كانت الطاقة الحرارية للنيوترونات الممتصّة أقل.



4. نظام التبريد **Cooling system**: تُستخدم أبراج تبريد لتزويد المفاعل والمكثف بالماء البارد باستمرار لتبريد المفاعل النووي، أتَمَّل الشكل (14).

5. مولَّد بخار الماء **Steam generator**: يُحول الماء الساخن والمضغوط القادم من قلب المفاعل إلى بخار ماء يُستخدم في إدارة توربينات متصلة بمولَّدات كهربائية لتوليد الطاقة الكهربائية.

أَتَحَقَّ: أُعْدَد أَجْزَاءِ المَفَاعِلِ النُّوَوِيِّ الرَّئِيْسِيَّةَ. 

الشكل (14): أبراج التبريد يتصاعد منها بخار الماء.

افتُتح المفاعل النووي الأردني للبحوث والتدريب برعاية ملكية سامية عام 2016 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 العلمي، وإنتاج النظائر المشعة للاستخدامات الطبية، إضافة إلى التدريب والتأهيل على التكنولوجيا الإشعاعية والتلوّيّة.



الربط بالتقنيات



## تطبيقات على الفيزياء النووية Applications of Nuclear Physics

للفيزياء النووية تطبيقات عدّة في مختلف نواحي الحياة، منها:

### التعقب Tracing

ت تكون المُتعقبات من نظائر مشعة تُحقن في الجسم للكشف عن خلل وظيفي في أحد أعضائه. ، فمثلاً، يُستخدم اليود -131 المشع في الكشف عن خلل في عمل الغدة الدرقية، حيث يشرب المريض كمية قليلة من محلول يوديد الصوديوم المشع، ويُشخص الخلل في عمل الغدة الدرقية بمعرفة كمية اليود المشع المتبقية فيها مع مرور الزمن. من التطبيقات الطبية الأخرى حقن وريد في القدم بسائل يحتوي الصوديوم المشع، وقياس الزمن اللازم حتى يصل السائل المشع إلى عضو معين في الجسم، وذلك باستخدام جهاز للكشف عن الإشعاع. والزمن المقاس يمكن من معرفة ما إذا كان هناك تضيق أو انسداد في الأوردة أو الشرايين. وفي التطبيقات الطبية يُعرض المريض لجرعات إشعاعية متدرجة ومحسوبة بدقة بحيث لا تؤثر سلباً فيه.

### 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 بحبات 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 المواد Materials Analysis

يمكن تحديد العناصر التي تكون عينة معينة بطرق كيميائية، وهذا عادة يتطلب استخدام كمية كبيرة نسبياً من تلك العينة. يمكن التغلب على ذلك بقذف كمية قليلة من العينة المراد معرفة تركيبها بالنيوترونات، ويتربّ على ذلك تحول العناصر التي امتصت النيوترونات إلى عناصر مشعة، وتُحدّد هوية تلك العناصر بالكشف عن نوع الإشعاعات الصادرة عن العينة المشعة وقياس طاقتها.

### حفظ المواد الغذائية Food Preserving

تطبيقات الفيزياء النووية في مجال الأطعمة تشهد اهتماماً متزايداً لقدرة الإشعاعات النووية على تعطيل عمل البكتيريا وقتلها؛ لذلك تُعرض المواد الغذائية المراد تخزينها مدةً طويلة لأشعة غاما أو حزم من الإلكترونات ذات طاقة مرتفعة لقتل البكتيريا، ومن ثم تُحفظ في علب مغلقة؛ مُنعاً لوصول بكتيريا جديدة إليها.

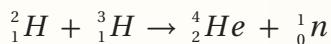
### الربط بالحياة

يمكن استخدام التعقب الإشعاعي في مراقبة تدفق السوائل والغازات خلال الأنابيب في تحديد أماكن التسرب. وترصد أدوات التعقب الزراعية تدفق المغذيات عبر النباتات.

# مراجعة الدرس

1. الفكرة الرئيسية: أُوضِّح المقصود بتفاعلِي الانشطار النووي والاندماج النووي.

2. للتفاعلين النوويين الآتيين، أجبِّ عَمَّا يَأْتِي:



عُلِّمَ أَنَّ كَتْلَ النُّوَى بِوَحْدَةِ (amu) مُوضَّحةٌ فِي الجَدْوِلِ الآتِيِّ:

${}_{92}^{235}U$	${}_{56}^{144}Ba$	${}_{36}^{89}Kr$	${}_0^1n$	${}_{2}^4He$	${}_{1}^3H$	${}_{1}^2H$
234.9934	143.8922	88.8979	1.0087	4.0015	3.0155	2.0136

أ. أيِّ التفاعلِين اندماج نووي وأيِّهما انشطار نووي؟

ب. **استخدم الأرقام:** أحسب الطاقة الناتجة من التفاعل لكلا التفاعلِين.

ج. **استخدم الأرقام:** أحسب الطاقة الناتجة لـكل نيكليون لكلا التفاعلِين. أيِّهما أكبر؟

3. **أقارن:** أعدِّد أوجهِ التشابه وأوجهِ الاختلاف بين تفاعلِي الاندماج والانشطار.

4. **أفسِّر:** ما أهميَّة استخدامِ كُلِّ ممَّا يَأْتِي في المفَاعلِ النوويِّ؟

أ. القصبان التي تحتوي الكادميوم.

ب. مُهَدِّدَاتِ النيوترونات.

5. **التفكير الناقد:** لماذا يُعَدُّ استخدام تفاعلات الاندماج النووي، إنْ أُمِكِن في توليد الطاقة، أَقْلَ خطرًا على البيئة من استخدام تفاعلات الانشطار النووي؟

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:

$${}_{7}^{14}N + {}_{2}^{4}\alpha \rightarrow {}_{9}^{18}F^*$$
، ولكي تصبح نواة الفلور مستقرة، فإنها تحول إلى نواة الأكسجين ( ${}_{8}^{17}N$ ) باعثة أحد الجسيمات الآتية:

- أ. بوزيترون.      ب. نيوترون.      ج. بروتون.      د. إلكترون.

2. في التفاعل النووي الآتي: 
$${}_{0}^1n + {}_{5}^{10}B \rightarrow {}_{3}^7Li + {}_{2}^4He$$

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).  
ج. 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 المتكوّنة مقارنة بمجموع كتل النوأتين المندمجتين، وطاقة الرابط لكل نيوكليون لهذه النواة :

- أ. كتلة أكبر، وطاقة ربط أقل لكل نيوكليون.      ب. كتلة أكبر، وطاقة ربط أكبر لكل نيوكليون.  
ج. 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      ج. 0.15      د. -0.15

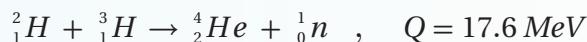
5. تُعرض بعض المواد الغذائية لأشعاعات نووية لتخزينها لفترات طويلة دون أن تفسد. إحدى هذه الإشعاعات:

- أ. نيوترونات منخفضة الطاقة.      ب. نيوترونات عالية الطاقة.  
ج. إلكترونات منخفضة الطاقة.      د. إلكترونات عالية الطاقة.

## المفاعل النووي الاندماجي Nuclear Fusion Reactor

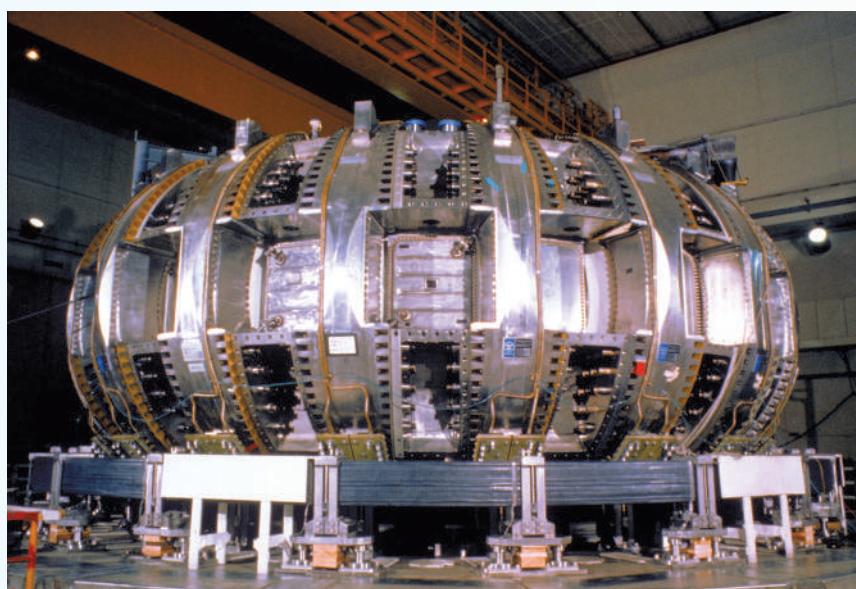
تُعد كمية الطاقة الكبيرة المترددة من الاندماج النووي محفزاً للعلماء لتسخير هذه الطاقة في أغراض مفيدة، وتبذل كثيرون من الجهود حالياً لتطوير مفاعل نووي اندماجي مستدام يمكن التحكم فيه. ومن مزاياه: توافر الوقود النووي الديتيريوم ( $^2H$ ) والتربيتوم ( $^3H$ )، وإنتاج طاقة كبيرة مقارنة بتفاعلات الانشطار النووي، وتكون عدد قليل نسبياً من المنتجات الثانوية المشعة مقارنة بتفاعلات الانشطار النووي. فوقود اليورانيوم بعد انشطاره يحتوي نسبة عالية من المواد المشعة التي يجب التخلص منها، وتتطلب إجراءات صارمة عند نقل اليورانيوم المخصب لا تلزم عند نقل الوقود المستخدم في الاندماج النووي.

وتُتيح النجوم طاقتها من تفاعلات الاندماج النووي بدورة تسمى دورة البروتون-بروتون، وتحدث هذه التفاعلات عند درجة حرارة عالية جداً وكثافة عالية جداً للبروتونات. وُجِد أن التفاعل الأنسب للاستخدام في مفاعلات الاندماج هو تفاعل الديتيريوم ( $^2H$ ) والتربيتوم ( $^3H$ ).



ويتوافر الديتيريوم بكميات كبيرة في البحيرات والمحيطات وهو غير مكلف. أمّا التربيتوم، فإنه مشع (تسلق  $t_{1/2} = 12.3 \text{ y}$ ) حيث يخضع لاضمحلال بيتا السالبة لينتج ( $^2He$ ). ولهذا السبب لا يوجد التربيتوم طبيعياً بكميات كبيرة، ويجب إنتاجه صناعياً.

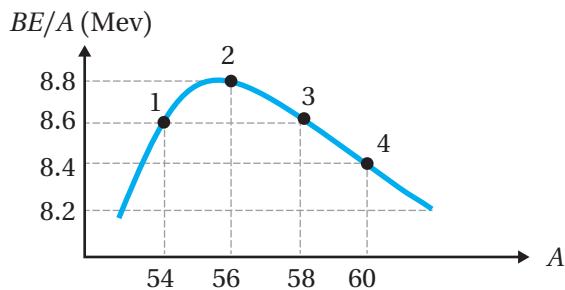
للحصول على الطاقة من الاندماج النووي يجب توافر درجات حرارة عالية (نحو  $10^8 \text{ K}$  تقريباً) تؤدي إلى تأمين الذرات وتكوين نظام من الإلكترونات والأيونات الموجبة يُسمى بلازما. وبالإضافة إلى درجات الحرارة العالية، يجب التأثير بضغط كبير للحصول على كثافة عالية من الأيونات. إن درجات الحرارة المرتفعة تؤدي إلى نقصان في كثافة الأيونات وهذا يسبب إحدى المشكلات الرئيسية التي تواجه إنتاج الطاقة من تفاعلات الاندماج



النووي. وقد استطاع العلماء تحقيق تفاعل اندماج الديتيريوم ( $^2H$ ) والتربيتوم ( $^3H$ ) مدة زمنية قصيرة جداً باستخدام مفاعل اندماجي، يُعرف باسم توكماك (tokamak). حيث تحفظ البلازما داخل مجال مغناطيسي.

# مراجعة الوحدة

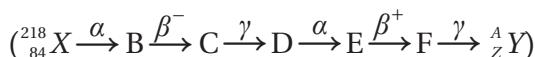
1. أضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة لكل جملة مما يأتي:
- أ. النيوترونيو جسيم يَتَجَزَّءُ من عملية:
- ب. تحلل النيوترون إلى بروتون وإلكترون.
- ج. اضمحلال غاما.
- د. خروج جسيم ألفا من النواة.
2. النواة غير المستقرة تتحوّل تلقائياً إلى نواة كتلتها:
- أ. أقلّ وطاقة ربط أكبر لكل نيوكليون.
- ب. أكبر وطاقة ربط أقلّ لكل نيوكليون.
- ج. أكبر وطاقة ربط أكبر لكل نيوكليون.
3.  $(^{A_Z}X)$  نواة نظير عنصر غير مستقر موجودة ضمن سلسلة اضمحلال. خلال عددٍ من التحولات أُطْلِقت أربعة جسيمات بيتا السالبة وجسيم ألفا واحداً، وعليه، فإن النواة الناتجة تكون:
- أ.  $^{A-4}_{Z+2}Y$
- ب.  $^{A-2}_{Z-4}Y$
- ج.  $^{A+2}_{Z+4}Y$
- د.  $^{A+4}_{Z-2}Y$
4. عدد جسيمات ألفا وعدد جسيمات بيتا السالبة المنبعثة من سلسلة تحولات تضمحل خاللها نواة  $(^{92}_{U})$  إلى نواة  $(^{238}_{92}U)$  على الترتيب هي:
- أ. 2 ألفا ، 3 بيتا.
- ب. 3 ألفا ، 4 بيتا.
- ج. 2 ألفا ، 2 بيتا.
- د. 3 ألفا ، 2 بيتا.
5. تحتوي أجهزة إنذار الدخان مصدراً إشعاعياً عادةً ما يكون نظير الأمريسيوم -241، الأشعة النووية التي يطلقها هي:
- أ. غاما.
- ب. بيتا السالبة.
- ج. بيتا الموجبة.
- د. ألفا.
6. إن حجم النواة يتنااسب:
- أ. طردياً مع عددها الكُتُلِي.
- ب. عكسيًا مع عددها الكُتُلِي.
- ج. طردياً مع مكعب عددها الكُتُلِي.
- د. طردياً مع الجذر التكعيبي لعددها الكُتُلِي.
7. تهدف عملية تخصيب اليورانيوم إلى إنتاج وقود نووي يحتوي نسبة عالية من:
- أ.  $^{238}_{92}U$
- ب.  $^{234}_{92}U$
- ج.  $^{232}_{92}U$
- د.  $^{235}_{92}U$
8. نسبة نصف قطر النواة  $(^{27}_{13}Al)$  إلى نصف قطر النواة  $(^{64}_{29}Cu)$  تساوي:
- أ.  $\frac{3}{4}$ .
- ب.  $\frac{27}{64}$ .
- ج.  $\frac{8}{3}$ .
- د.  $\frac{64}{27}$ .
9. نسبة حجم النواة  $(^{27}_{13}Al)$  إلى حجم النواة  $(^{64}_{29}Cu)$  تساوي:
- أ.  $\frac{3}{8}$ .
- ب.  $\frac{27}{64}$ .
- ج.  $\frac{8}{3}$ .
- د.  $\frac{64}{27}$ .
10. تُبَطَّأُ النيوترونات في المفاعلات النووية بواحد مما يأتي:
- أ. الماء الثقيل.
- ب. الكادميوم.
- ج. اليورانيوم.
- د. غاز الهيدروجين.
11. إذا كانت كتلة نواة نظير الليثيوم  $(^{7}_3Li)$  تَقْلُّ بمقدار 0.042 amu عن مجموع كتل مُكَوِّناتها، فإن متوسط طاقة الرابط النووية لكل نيوكليون (MeV) لها تساوي:
- أ. 3.910.
- ب. 5.589.
- ج. 1.412.
- د. 7.120.



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).  
ج. (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) الالازمة لذلك:
- أ. 2.  
ب. 30.  
ج. 60.  
د. 120.

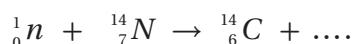
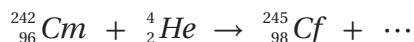
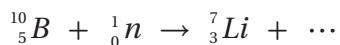
14. تمر النواة (X) في سلسلة من الاضمحلالات الإشعاعية متحولة إلى النواة (Y) على النحو الآتي:



- العدد الذري (Z) والعدد الكتلي (A) للنواة (Y) هما:  
 $A = 211, Z = 80$        $A = 210, Z = 84$        $A = 210, Z = 80$        $A = 210, Z = 82$       أ.  
 د.      ب.      ج.

15. تنتج النجوم طاقتها من تفاعلات تسمى دورة البروتون-بروتون، وتحدث عند درجات حرارة:  
 أ. عالية، وكثافة منخفضة للبروتونات.  
 ب. منخفضة، وكثافة عالية للبروتونات.  
 ج. عالية و كثافة عالية للبروتونات.  
 د. منخفضة و كثافة منخفضة للبروتونات.

2. أكمل المعادلات النووية الآتية:



# مراجعة الوحدة

3. **استخدم الأرقام:** عينة من البولونيوم ( $^{210}_{84}Po$ ) تحتوي ( $2.80 \times 10^{18}$  atoms) ثابت الأضمحلال للبولونيوم يساوي ( $5.80 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ )، أجد ما يأتي:

أ. عمر النصف للبولونيوم ( $^{210}_{84}Po$ ).

ب. النشاطية الإشعاعية.

ج. عدد النوى المتبقية من البولونيوم ( $^{210}_{84}Po$ ) بعد مرور مدة زمنية مقدارها أربعة أمثال عمر النصف.

4. **استخدم الأرقام:** عينة من الأمريسيوم ( $^{241}_{95}Am$ ) تحتوي ( $1.25 \times 10^{15}$  atoms) ونشاطيتها الإشعاعية ( $1.70 \mu\text{Ci}$ ) ثابت الأضمحلال للأمريسيوم ( $^{241}_{95}Am$ ).

5. **استخدم الأرقام:** يمثل الشكل المجاور عينة من الكوبالت ( $^{60}_{27}Co$ ) تُستخدم في المختبرات لدراسة طبيعة إشعاع غاما، بالاستعانة بالمعلومات المثبتة على الشكل، أجد:

أ. عمر النصف.

ب. النشاطية الإشعاعية للعينة.

ج. تاريخ تصنيع العينة.

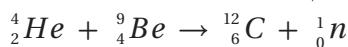
د. النشاطية الإشعاعية عام 2025، بعد مرور زمن يساوي ثلاثة أمثال عمر النصف.

6. **استنتج:** إذا كانت طاقة الربط النووية لنواة ( $^{23}_{11}Na$ ) تساوي (186.66 MeV)، ولنواة ( $^{23}_{12}Mg$ ) تساوي (181.82 MeV)، أي النوتين أكثر استقراراً؟ أفسر إجابتي.

7. **استخدم الأرقام:** إذا كانت طاقة الربط النووية لكل نيكليون لنواة الفوسفور ( $^{30}_{15}P$ ) تساوي (8.35 MeV)، أجد ما يأتي:

أ. طاقة الربط النووية لنواة الفسفور ( $^{30}_{15}P$ ).  
ب. كتلة نواة الفسفور ( $^{30}_{15}P$ ).

8. **استخدم الأرقام:** قُدِّفت نواة ( $^{9}_{4}Be$ ) بجسيم ألفا، وفقاً لتفاعل النواة الآتي:



فإذا علمت أن كتل النوى الداخلة في التفاعل تزيد بمقدار (0.00612 amu) على كتل المواد الناتجة من التفاعل، واعتتماداً على كتل النوى والجسيمات في الجدول الآتي أجيبي عمّا يأتي:

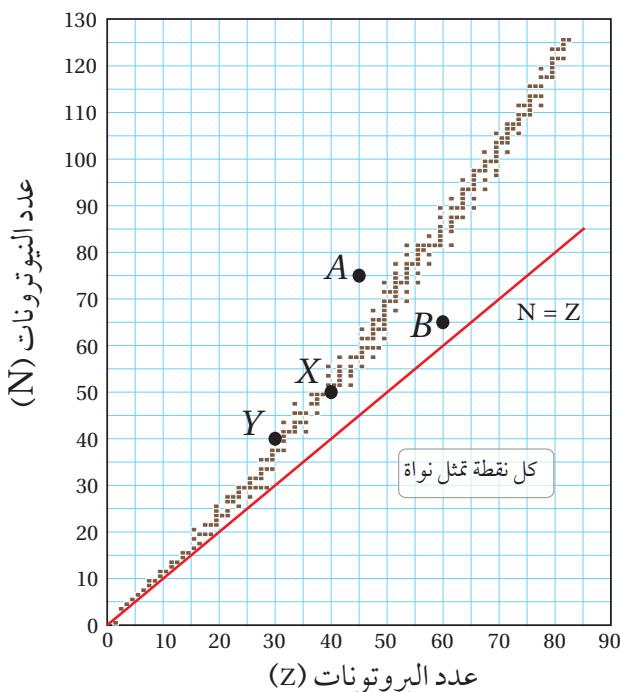
$^{1}_{0}n$	$^{1}_{1}P$	$^{4}_{2}He$	$^{12}_{6}C$	النواة أو الجسيم
1.0087	1.0073	4.0015	11.9967	الكتلة (amu)

أ. هل التفاعل النووي مُنْتِج للطاقة أم ماضٌ لها؟

ب. أحسب كتلة نواة ( $^{9}_{4}Be$ ).

ج. أحسب طاقة الربط النووية لكل نيكليون لنواة ( $^{12}_{6}C$ ) بوحدة (MeV).

9. **أستنتاج:** يمثل الرسم البياني المبين في الشكل منحنى الاستقرار النووي.



أ. أحسب نصف قطر النواة (X).

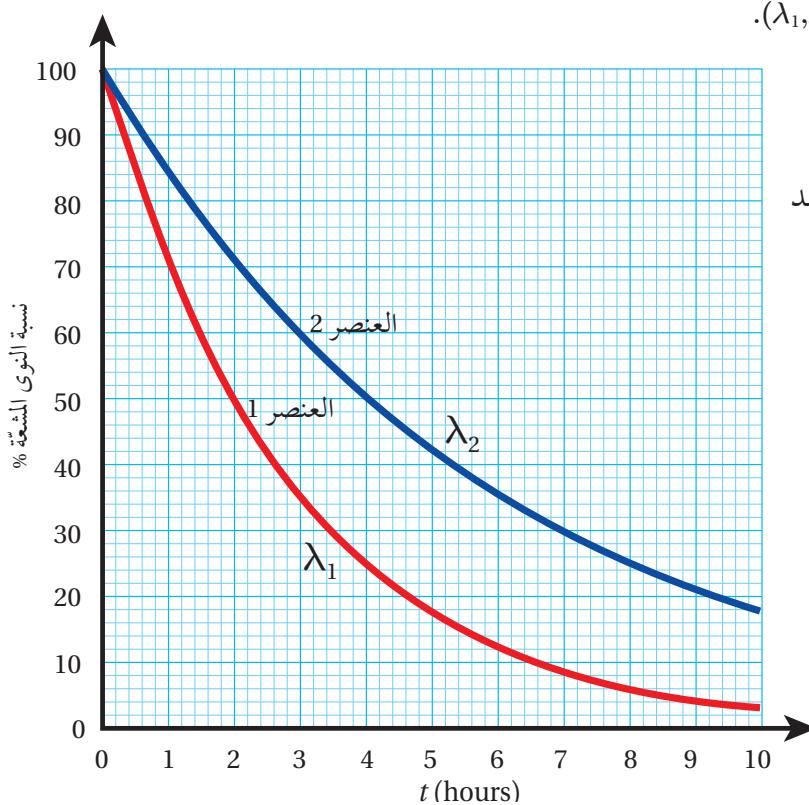
ب. أحسب طاقة الرابط النووية للنواة (Y)، علماً أنّ كتلتها تساوي (70.0012 amu).

ج. أيهما يملك طاقة ربط نووية لكل نيوكليلون أعلى (X) أم (Y)؟ ولماذا؟

د. كيف أُفسّر أنّ عدد النيترونات أكبر من عدد البروتونات للنواة (X).

ه. أسمّي من الشكل نوتين مستقرتين ونوتين غير مستقرتين.

10. **أحلّ رسمًا بيانيًا:** يمثل الشكل رسمًا بيانيًّا يوضح العلاقة بين النسبة  $\times 100\% = \frac{N}{N_0}$  مع الزمن لنظيري عنصرين مشعّين، ثابتُ الأضمحلال لكُلِّ منهما ( $\lambda_1, \lambda_2$ ).



أ. ما عمر النصف لكُلِّ منهما؟

ب. ما نسبة عدد النوى المشعة المتبقية بعد مرور 10 ساعات لكُلِّ من النظيرين؟

ج. أيهما أكبر ( $\lambda_1$ ) أم ( $\lambda_2$ )؟

## مسرد المصطلحات

- إشابة **Doping**: زيادة الموصلية الكهربائية لأشباه الموصلات، بالإضافة بعض المواد إليها تُسمى **شوائب impurities**.
- اقتران الشغل للفلز **Work Function**: أقل طاقة للأشعة الكهرومغناطيسية تكفي لتحرير الإلكترونات من سطح الفلز دون إكسابها طاقة حركية.
- اضمحلال إشعاعي **Radioactive Decay**: التحول التلقائي لنوى غير مستقرة إلى نوى أكثر استقراراً عن طريق انبعاث جسيمات مثل جسيم ألفا أو جسيم بيتا، غالباً ما يصاحب ذلك انبعاث أشعة غاما.
- الإلكترونات التكافؤ **Valence Electrons**: الإلكترونات الموجودة في آخر مستوى طاقة للذرّة، وهي المسؤولة عن تحديد كثيّرٍ من خصائص المادة، مثل التوصيل الكهربائي والتوصيل الحراري.
- الإلكترونات الضوئية **Photoelectrons**: الإلكترونات المنبعثة من سطح فلز عند سقوط إشعاع كهرومغناطيسي بتردد مناسب عليه.
- اندماج نووي **Nuclear Fusion**: التفاعل الذي تندمج فيه نوافر خفيفاتان لتكوين نواة كتلتها أقل من مجموع كتلتيهما.
- انشطار نووي **Nuclear Fission**: التفاعل الذي تتنقسم فيه نواة ثقيلة إلى نوافر أو أكثر، أصغر منها في الكتلة.
- تخصيب اليورانيوم **Enrichment**: عملية رفع نسبة نظير اليورانيوم ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) مقارنة مع نسب نظائر اليورانيوم الأخرى.
- تدفق مغناطيسي **Magnetic Flux**: يُعبّر عنه رياضياً بأنه ناتج الضرب القياسي لمتجه المجال المغناطيسي ومتجه المساحة.
- تردد طبيعي لدارة **(RCL)**: تردد خاص بالدارة تعتمد قيمته على كل من مواسطة المواسع ومحاثة المحت، عندما يتساوى تردد مصدر فرق الجهد في الدارة معه تحدث حالة الرنين، وتكون عندئذ قيمة التيار الفعال أكبر ما يمكن.

- **تردد العتبة** **Threshold Frequency**: أقل تردد للأشعة الساقطة يتطلبه تحرير إلكترونات ضوئية من سطح فلز دون إكسابها طاقة حرارية.
- **تفاعل متسلسل** **Chain Reaction**: تبعث نيوترونات نتيجة انشطار النواة في تفاعل الانشطار النووي، وهذه النيوترونات تتصبّها نوئي أخرى التي بدورها تتشطر، وتنتج نيوترونات جديدة تؤدي إلى انشطار مزيد من النوى ، وعليه، يستمر التفاعل.
- **تفاعل نووي** **Nuclear Reaction**: اصطدام نواتي ذرتين، أو اصطدام جسيم نووي، مثل البروتون أو النيوترون بنواة ذرّة أخرى، وقد ينتج من ذلك نواة جديدة أو أكثر.
- **تيار متزدّد** **Alternating Current**: تيار يسري في دارة كهربائية مغلقة يتغيّر مقداره واتجاهه بالنسبة إلى الزمن وفقاً لعلاقة جيبية.
- **جسم أسود** **Black Body**: جسم مثالي يمتص الأطوال الموجية للأشعة الكهرومغناطيسية جميعها ويشعّها، ويعتمد انبعاث الأشعة منه على درجة حرارته فقط.
- **جهد الإيقاف** **Stopping Potential**: فرق الجهد الذي تكون عنده قراءة التيار الكهربائي صفرًا.
- **حث ذاتي** **Self Induction**: يُعرَّف بأنه تولّد قوّة دافعة كهربائية حثّية ذاتية في دارة مغلقة نتيجة تغيّر التدفق المغناطيسي، بسبب تغيّر مقدار تيار الدارة نفسها.
- **سلسلة الأضمحلال الإشعاعي الطبيعي** **Natural Radioactive Decay Series**: مجموعة الأضمحلالات التلقائية التي تبدأ بعنصر مشع ثقيل، وتنتهي بعنصر مستقرّ باضمحلال ألفا أو بيتا .
- **طاقة تأين** **Ionization Energy**: أقل طاقة يتطلبها تحرير إلكترون من الذرّة دون إكسابه طاقة حرارية.
- **طاقة ربط نووية** **Nuclear Binding Energy**: الطاقة التي يجب تزويدها للنواة لفصل مكوناتها (نيوكليونات) بعضها عن بعض نهائياً.
- **طيف امتصاص خطّي** **Absorption Line Spectrum**: ظهور خطوط معتمة منفصلة على خلفية مضيئة بعد إمرار ضوء الشمس خلال غاز عنصر معين.
- **طيف انبعاث خطّي** **Emission Line Spectrum**: ظهور خطوط مضيئة على خلفية معتمة بعد تحليل الضوء المنبعث من ذرات العناصر المثار.

- ظاهرة كهرومغناطيسية: ظاهرة انبعاث الإلكترونات من سطح فلز عند سقوط إشعاع كهرومغناطيسى بتردد مناسب عليه.
- عدد ذري: عدد البروتونات في النواة ويساوي عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة.
- عدد كثلي: عدد البروتونات والنيوترونات في النواة.
- عمر النصف: الزمن اللازم لاضمحلال نصف عدد النوى المشعة.
- فرق جهد متردد: فرق جهد يتغير في المقدار والاتجاه بالنسبة إلى الزمن وفقاً لعلاقة جيبية.
- قانون فارادي في الحث: ينص على أن: "مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في دارة كهربائية يتناسب طردياً مع المعدل الزمني لتغير التدفق المغناطيسي الذي يخترقها".
- قانون لنز: ينص على أن: «يكون اتجاه التيار الحثي المتولد في دارة مغلقة بحيث يولّد مجالاً مغناطيسياً يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له».
- قوة دافعة كهربائية حثية: فرق الجهد الكهربائي المتولد بين طرفي سلك يقطع خطوط مجال مغناطيسي أو في ملف عند تغير التدفق المغناطيسي الذي يخترقه.
- قوة نووية قوية: هي قوة التجاذب بين النيوكليونات في النواة.
- قيمة فعالة لفرق الجهد المتردد: ناتج قسمة القيمة العظمى لفرق الجهد على  $(\sqrt{2})$ .
- قيمة فعالة للتيار المتردد: ناتج قسمة القيمة العظمى للتيار المتردد على  $(\sqrt{2})$ .
- كتلة حرجة: أقل كتلة من الوقود النووي تضمن استمرار حدوث التفاعل المتسلسل، وتضمن عدم تسرب النيوترونات خارجه.
- معامل الحث الذاتي: (محاثة Inductane المحت): نسبة القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة بين طرفي محث إلى المعدل الزمني للتغير في مقدار التيار الكهربائي المار فيه، وهو مقياس لممانعة المحث لتغير مقدار التيار الكهربائي المار فيه، ووحدة قياسه هي  $(V.s/A)$ ، ونسمى هنري  $H$  بحسب النظام الدولي للوحدات.

- **معاوقة محثية Inductive Reactance:** الممانعة التي يبديها المحت لمرور التيار المتردد في الدارة، وتساوي حاصل ضرب معاوقة المحت في التردد الزاوي لفرق الجهد.
- **معاوقة مواسعية Capacitive Reactance:** الممانعة التي يبديها المواسع لمرور التيار المتردد في الدارة، وتساوي مقلوب حاصل ضرب المعاوقة في التردد الزاوي لفرق الجهد.
- **مواد عازلة Insulators:** مواد لا توصيل التيار الكهربائي، حيث ترتبط إلكترونات التكافؤ لها بالذرات بقوة كبيرة، لذلك لديها عدد قليل من الإلكترونات الحرّة، وهذا يجعلها مادة عازلة للكهرباء.
- **مواد موصلة Conductors:** مواد توصيل التيار الكهربائي، ولا ترتبط إلكترونات التكافؤ بذراتها بقوة كبيرة؛ وبذلك تحوي المواد الموصولة كثيراً من الإلكترونات الحرّة، وهذا يجعلها موصلات جيدة للتيار الكهربائي.
- **مواد شبه موصلة Semiconductors:** مواد تقع بين المواد الموصولة للكهرباء والمواد العازلة من حيث قدرتها على توصيل الكهرباء.
- **نشاطية إشعاعية Activity:** عدد الأضمحلالات في الثانية الواحدة لعينة مشعة.
- **نطاق الاستقرار Stability Valley:** النطاق الذي توجد ضمنه النوى المستقرة في منحنى (N-Z).
- **نظائر Isotopes:** نوى تتساوى في عددها الذري، وتختلف في عددها الكُلّي بسبب اختلاف عدد النيوترونات، وهي ذرات للعنصر نفسه تختلف أنوبيتها في عددها الكُلّي.
- **نواة مركبة Compound Nucleus:** النواة التي تتشكل من امتصاص النواة الهدف للقذيفة في التفاعلات النووية، التي وما تلبث أن تضمح لتعطي نواة أو أكثر.
- **نيوكليون Nucleon:** تسمية تطلق على كلّ من البروتون أو النيوترون.
- **وحدة كتلة ذرية Atomic Mass Unit:** تساوي  $\frac{1}{12}$  من كتلة نظير الكربون - 12 ( $^{12}_6 C$ ).