الفيزياء

الصف الثاني عشر - كتاب الطالب

الفصل الدراسي الثاني

12

فريق التأليف

د. موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

أ.د. محمود إسماعيل الجاغوب
خلدون سليمان المصاروه

د. إبراهيم ناجي غبار
موسى محمود جرادات

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج

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

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

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

قـرّرت وزارة التربيـة والتعليـم تدريـس هـذا الكتـاب في مـدارس المملكـة الأردنية الهاشـمية جميعهـا، بناءً عـلى قرار المجلـس الأعلى للمركـز الوطني لتطوير المناهج في جلسـته رقـم (2022/7)، تاريـخ 2022/11/8 م، وقرار مجلس التربية والتعليـم رقم (2022/111)، تاريـخ 2022/12/6 م، بـدءًا من العام الـدراسي 2022 / 2023 م.

© HarperCollins Publishers Limited 2022.
- 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 - 507 - 8

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2023/5/2615)

بيانات الفهرس الأولية للكتاب:

عنوان الكتاب	الفيزياء/ كتاب الطالب الصف الثاني عشر الفصل الدراسي الثاني
إعداد / هيئة	الأردن. المركز الوطني لتطوير المناهج
بيانات النشر	عمان: المركز الوطني لتطوير المناهج ، 2023
رقم التصنيف	375.001
الواصفات	**/ تطوير المناهج/ / المقررات الدراسية/ / مستويات التعليم/ / المناهج/**
الطبعة	الأولى

يتحمَّل المُؤلِّف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مُصنَّفه، ولا يُعبِّر هذا المُصنَّف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية.

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

الطبعة الأولى (التجريبية)
أُعيدت طباعته

منهاجي
متعة التعليم الهادف

1443 هـ / 2022 م
1445 هـ / 2024 م

قائمة المحتويات

الموضوع ..... **الصفحـة**

المقدّمة 5

الوحدة الخامسة: الحثّ الكهرمغناطيسي وأشباه الموصلات **7**

تجربة استهلاليّة: طرائق توليد تيّار كهربائيّ حثّيّ 9

الدرس الأول: التدفّق المغناطيسي والحثّ الكهرمغناطيسي 10

الدرس الثاني: دارات التيار الكهربائي المتردّد 29

الدرس الثالث: أشباه الموصلات 42

الوحدة السادسة: الفيزياء الحديثة **59**

تجربة استهلاليّة: استقصاء إشعاع الجسم الأسود 61

الدرس الأول: الطبيعة الجُسيميّة للضوء 62

الدرس الثاني: التركيب الذرّي 78

الوحدة السابعة: الفيزياء النوويّة **97**

تجربة استهلاليّة: استقصاء التفاعل المتسلسل 99

الدرس الأول: تركيب النواة وخصائصها 100

الدرس الثاني: الإشعاع النوويّ 112

الدرس الثالث: التفاعلات النوويّة 127

مسرد المصطلحات 142

قائمة المراجع 146

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدّمة

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

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

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

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

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

والله وليُّ التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج

الوحدة 5

الحثُّ الكهرمغناطيسي وأشباه الموصلات

Electromagnetic Induction and Semiconductors

أتأمّلُ الصورةَ

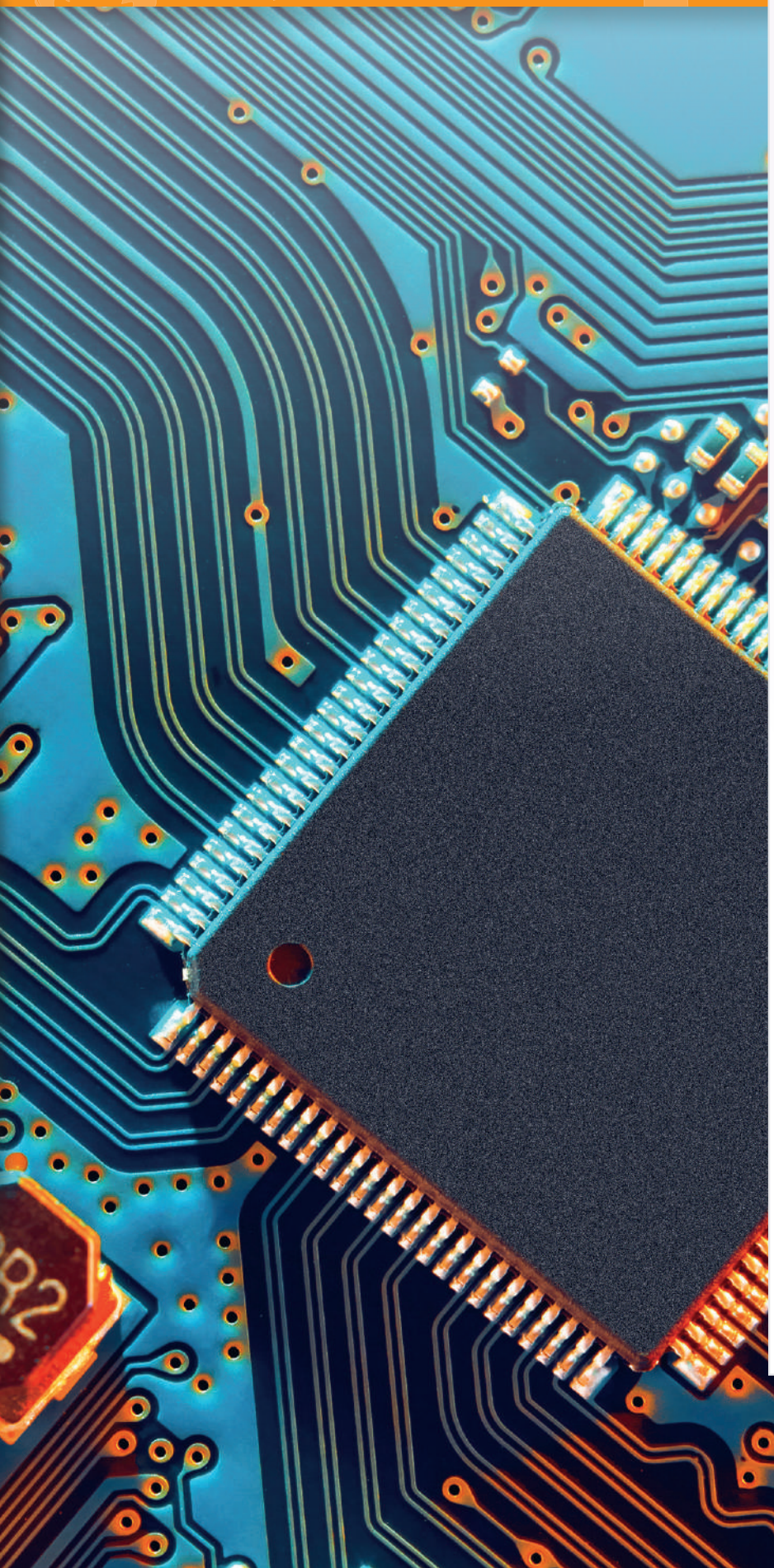
الحثّ الكهرمغناطيسي

تُستخدم المولّدات الكهربائيّة في محطات الطاقة الكهربائيّة لتزويدنا بالطاقة الكهربائيّة. ومهما كان مصدر الطاقة المستخدَمة في تشغيل هذه المحطات، سواء الفحم كان أم الرياح أم الوقود النوويّ أم غيرها، فإنّ توليد الطاقة الكهربائية يعتمد على الحثّ الكهرمغناطيسي. ويُستثنى من ذلك الخلايا الشمسيّة، التي تُحوّل ضوء الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائيّة.

فما الحثّ الكهرمغناطيسيّ؟ وكيف تُزوّدنا المولّدات الكهربائيّة بالطاقة الكهربائيّة؟

الفكرةَ العامةُ:

يعتمد مبدأ عمل تقنيات كهربائيّة عدّة على الحثّ الكهرمغناطيسي، منها: المولّدات الكهربائيّة، والمحوّلات الكهربائيّة، وذاكرة الحاسوب، وغيرها. وأدّى اكتشاف الخصائص الكهربائيّة لأشباه الموصلات إلى إحداث ثورة تقنية نلمس آثارها في حياتنا اليوميّة.



الدرسُ الأولُ: التدفّق المغناطيسي والحثّ الكهرمغناطيسي

Magnetic Flux and Electromagnetic Induction

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

الدرسُ الثاني: دارات التيار الكهربائيّ المتردّد

Alternating Electric Current Circuits

الفكرةُ الرئيسةُ: ظهرت محطات توليد الطاقة الكهربائيّة نهاية القرن التاسع عشر، وكان بعضها يولّد تيارًا مستمرًّا، وبعضها الآخر يولّد تيارًا متردّدًا. لكن الآن، يمكن القول إنّ المحطات جميعها تولّد تيارًا متردّدًا، وبوجود أجهزة كهربائيّة كثيرة تعمل على التيار المستمر، اقتضت الحاجة إلى أجهزة تحوّل أيًّا من التيّارين إلى الآخر.

الدرس الثالث: أشباه الموصِلات

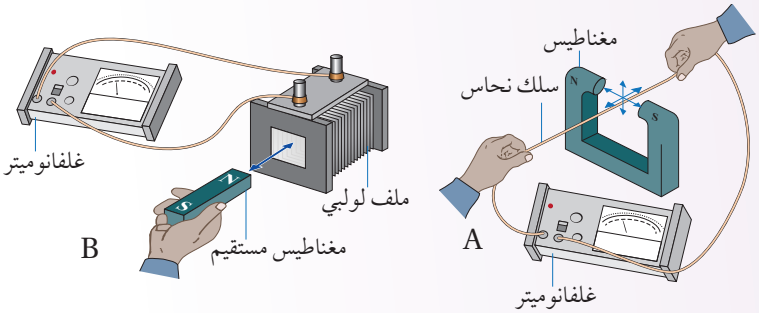
Semiconductors

الفكرة الرئيسة: نتج من تطور علم أشباه الموصِلات تصميم مكوّنات إلكترونية جديدة أسهمت في إحداث قفزة نوعيّة في عالم الاتصالات والمعلومات.

طرائق توليد تيّار كهربائيّ حثّيّ

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

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



خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أُنفِّذ الخطوات الآتية:

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

التحليل والاستنتاج:

1. **أستنتج:** في أيّ الحالات تولّد تيار كهربائيّ في السلك عند تحريكه بين قطبي المغناطيس؟ وفي أيّها لم يتولّد تيار كهربائيّ؟ ماذا أستنتج؟
2. **أُقارن:** هل انحرف مؤشّر الغلفانوميتر بالاتجاه نفسه في الحالات التي تولّد فيها تيار كهربائيّ في السلك؟ أُفسّر إجابتي.
3. **أستنتج:** استنادًا إلى ملاحظاتي في الخطوتين 4 و5، متى يتولّد تيار كهربائيّ في الملف؟ وهل يعتمد اتجاهه على اتجاه حركة المغناطيس؟ أُفسّر إجابتي.
4. **أتوقّع:** هل يتولّد تيار كهربائيّ إذا ثبّتُّ السلك أو الملفّ، وحرّكتُ المغناطيس؟

الدرس 1

التدفّق المغناطيسي والحثّ الكهرمغناطيسي

Magnetic Flux and Electromagnetic Induction

الفكرة الرئيسة:

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

نتاجات التعلّم:

- أصف التدفّق المغناطيسي عبر سطح عن طريق التعبير عنه بمعادلة.
- أُنفّذ استقصاءً عمليًّا؛ لأستنتج طرائق توليد قوة دافعة كهربائية حثّيّة في دارة كهربائيّة باستخدام مجال مغناطيسي.
- أُوظّف قانوني فارادي ولنز في الحثّ؛ لأحسب مقدار القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة وأحدّد اتجاه التيار الحثي في دارة كهربائيّة.
- أُطوّر علاقة رياضيّة؛ لأتوصّل إلى العوامل التي تحدّد معامل الحثّ الذاتيّ لملفّ لولبيّ.
- أُصمّم نموذجَ محول كهربائيّ يعمل على خفض الجهد الكهربائيّ أو رفعه.
- أشرح آلية عمل المحول الكهربائيّ، ودوره في رفع كفاءة نقل الطاقة الكهربائيّة من مكان إنتاجها إلى أماكن استهلاكها.

المفاهيم والمصطلحات:

التدفّق المغناطيسي Magnetic Flux

القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة Induced Electromotive Force

قانون فارادي في الحثّ Faraday's Law of Induction

قانون لنز Lenz's Law

الحثّ الذاتيّ Self Induction

معامل الحثّ الذاتيّ Coefficient of Self Induction

التدفّق المغناطيسي Magnetic Flux

يمكن استخدام بطاريّة لإضاءة مصباح يدويّ، لكن إضاءة شارع أو مدينة تحتاج إلى مصدر طاقة كهربائيّة ذي قدرة أكبر، يعتمد في عمله على الحثّ الكهرمغناطيسي، الذي يرتبط بمفهوم التدفّق المغناطيسي.

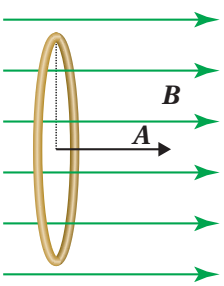
يوضّح الشكل (1) ملفًّا دائريًّا من لفّة واحدة مقدار مساحته (A)، موضوعًا في مجال مغناطيسيّ منتظم يخترقه عموديًّا على مستوى المساحة، أيْ إنّ المجال المغناطيسي $(\boldsymbol{B})$ يوازي متّجه المساحة $(\boldsymbol{A})$. ولمّا كان التدفق المغناطيسي عبر مساحة محدّدة يتناسب طرديًّا مع عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق هذه المساحة، ومقدار المجال المغناطيسي يتناسب مع عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق عموديًّا وحدة المساحة، فإنّه يمكن التعبير عن **التدفّق المغناطيسي** **Magnetic flux** (Φ_B) رياضيًّا بأنّه ناتج الضرب القياسي لمتّجه المجال المغناطيسي $(\boldsymbol{B})$ ومتّجه المساحة $(\boldsymbol{A})$، ويُعبَّر عن مقداره بالعلاقة الآتية:

$$\Phi_B = \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{A} = BA \cos\theta$$

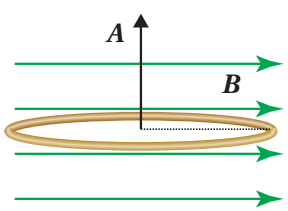
حيث (θ) هي الزاوية المحصورة بين متّجَهي المجال المغناطيسي والمساحة عندما يبدأ المتجهان من النقطة نفسها، أمّا مقدار متّجه المساحة، فيساوي مساحة سطح الملفّ، واتّجاهه يكون عموديًّا على السطح.

وأُلاحظ من العلاقة السابقة أنّ التدفّق المغناطيسي كميّة قياسيّة، يُقاس بوحدة $(T.m^2)$، تسمّى ويبر (Wb) بحسب النظام الدوليّ للوحدات.

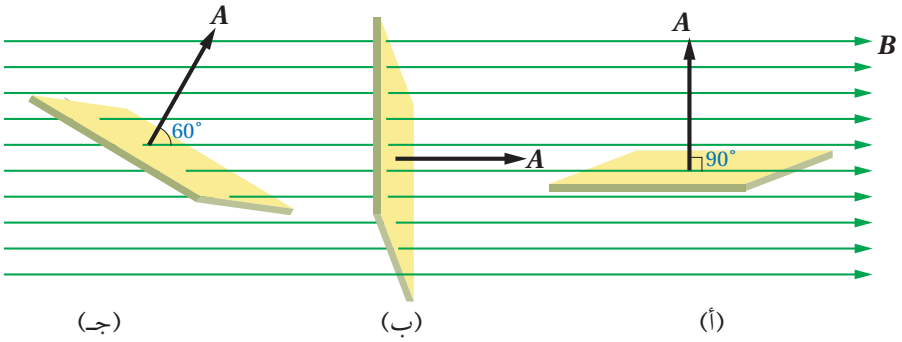
في الشكل (1)، خطوط المجال المغناطيسي موازية لمتّجه المساحة $(\theta = 0^\circ)$، فيكون مقدار التدفّق المغناطيسي $(\Phi_B = BA)$، وهي أكبر قيمة



الشكل (1): مجال مغناطيسي منتظم يخترق عموديًّا المساحة A المحصورة بالملف.



الشكل (2): التدفّق المغناطيسيّ عبر الملفّ يساوي صفرًا؛ لأنّ $(\theta = 90^\circ)$، و $\cos 90^\circ = 0$.



الشكل (3): سطح يصنع زوايا مختلفة مع اتجاه خطوط المجال المغناطيسي.

ممكنة. أمّا في الشكل (2)، فإنّ خطوط المجال المغناطيسي عموديّة على متّجه المِساحة (خطوط المجال موازية لسطح الملف)؛ ($\theta = 90^\circ$)؛ لذا لا تخترق الملفّ، والتدفّق المغناطسي عبر مساحة الملفّ يساوي صفرًا.

أستنتج ممّا سبق، أنّ التدفّق المغناطيسيّ عبر مساحة محدّدة يعتمد على: مقدار المجال المغناطيسي، ومقدار المساحة التي أحسب التدفّق عبرها، وجيب تمام الزاوية المحصورة بين متّجهي المجال المغناطيسيّ والمِساحة.

✓ **أتحقّق:** يوضّح الشكل (3) ثلاثة سطوح متماثلة موضوعة في المجال المغناطيسي نفسه. فأيُّ السطوح يخترقه أكبر تدفّق مغناطيسي؟ وأيّها يخترقه أقلّ تدفّق مغناطيسيّ؟

المثال 1

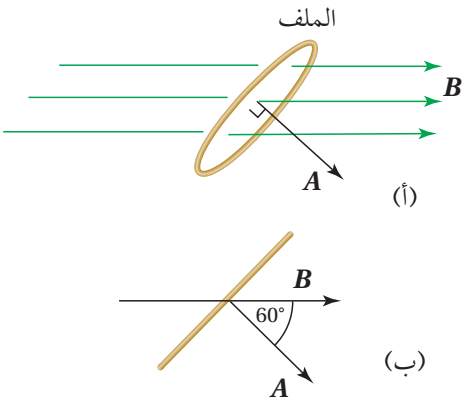
حلقة دائريّة مساحتها ($3.0 \times 10^{-4}\ m^2$)، موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (120 mT) كما في الشكل (4/ أ). ويوضّح الشكل (4/ ب) منظرًا جانبيًّا للحلقة، حيث الزاوية المحصورة بين متّجهي المجال المغناطيسي والمساحة (60°).

أحسب التدفّق المغناطيسيّ عبر الحلقة:

أ . كما في الشكل (4/ أ).

ب. عندما يكون مستوى الحلقة عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي.

جـ. عندما يكون مستوى الحلقة موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسي.



الشكل (4):
(أ) حلقة دائريّة مغمورة في مجال مغناطيسي.
(ب) الزاوية بين متّجهي المجال المغناطيسيّ والمِساحة.

المُعطيات: $A = 3.0 \times 10^{-4}\ m^2,\ B = 120 \times 10^{-3}\ T,\ \theta_1 = 60^\circ,\ \theta_2 = 0^\circ,\ \theta_3 = 90^\circ.$

المطلوب: $\Phi_B = ?$

الحلّ:

أ . الزاوية بين متّجهي المجال المغناطيسي والمِساحة (60°)، وأحسب التدفّق المغناطيسيّ على النحو الآتي:

$$\Phi_B = BA\cos\theta$$
$$= 120 \times 1\,0^{-3} \times 3.0 \times 10^{-4} \times \cos 60^\circ$$
$$= 1.8 \times 1\,0^{-5}\ \text{Wb}$$

ب . عندما يكون مستوى الحلقة عموديًّا على اتجاه المجال المغناطيسي تكون الزاوية بين متّجهي المجال المغناطيسي والمِساحة (0°)، وأحسب التدفّق المغناطيسي على النحو الآتي:

$$\Phi_B = BA\cos\theta$$
$$= 120 \times 10^{-3} \times 3.0 \times 1\,0^{-4} \times \cos 0^\circ$$
$$= 3.6 \times 10^{-5}\ \text{Wb}$$

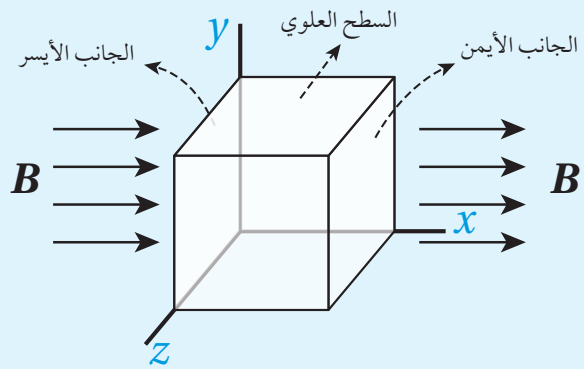
جـ. عندما يكون مستوى الحلقة موازيًا لاتجاه المجال المغناطيسي تكون الزاوية بين متّجهي المجال المغناطيسيّ والمِساحة (90°)، وأحسب التدفّق المغناطيسي على النحو الآتي:

$$\Phi_B = BA\cos\theta$$
$$= 120 \times 10^{-3} \times 3.0 \times 10^{-4} \times \cos 90^\circ = 0$$

يكون التدفّق المغناطيسيّ صفرًا؛ لأنّ $\cos 90^\circ = 0$.

تمرين

مكعب طول ضلعه (2.0 cm)، موضوع في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (1.5 T) كما في الشكل (5). أحسب التدفّق المغناطيسيّ الكلي عبر المكعّب.



الشكل (5): سطح مغلق على شكل مكعب في مجال مغناطيسي منتظم.

الحثّ الكهرمغناطيسيّ Electromagnetic Induction

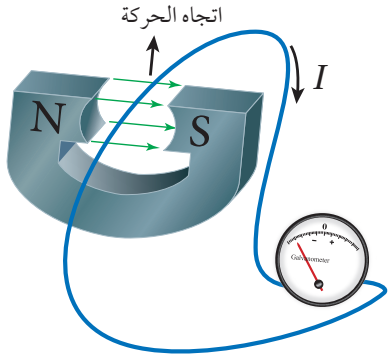
درستُ في الوحدة السابقة أنّ مرور تيّار كهربائيّ في موصِل يولّد حوله مجالًا مغناطيسيًّا. فهل يُمكن عكس هذه العملية؛ أيْ هل يُمكن توليد تيار كهربائي في موصل باستخدام مجال مغناطيسيّ؟

اكتشف العالمان الأمريكي جوزيف هنري والإنجليزي مايكل فارادي عام (1831م) بشكل مستقل أنّه يُمكن توليد تيار كهربائي في دارة كهربائيّة مغلقة عند تغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يخترقها، وتُسمّى هذه العملية الحثّ الكهرمغناطيسيّ، ويُسمّى التيار الكهربائيّ المتولِّد في هذه الحالة **التيار الكهربائيّ الحثّيّ** Induced current. وما نفّذته في التجربة الاستهلاليّة، شبيه بالتجارب التي نفّذها العالمان هنري وفارادي، ومنها أستنتج أنه يمكن توليد تيار كهربائي حثّي في دارة مغلقة عند:

1. تحريك سلك موصل إلى الأعلى وإلى الأسفل في دارة كما في الشكل (6)، بحيث يقطع الموصل خطوط المجال المغناطيسي.
2. تقريب مغناطيس من ملف أو إبعاده عنه كما في الشكل (7).

إنّ مرور تيار كهربائي في دارة يتطلب مصدر فرق جهد، مثل البطارية. فكيف تولّد التيار الكهربائي في الحالتين السابقتين دون وجود بطارية؟ لأعرف الإجابة؛ أدرس القوة الدافعة الكهربائية الحثّية.

✓ **أتحقّق:** ما المقصود بالتيار الكهربائيّ الحثّيّ؟



الشكل (6): يتولّد تيار كهربائيّ حثّي في سلك عند تغيّر التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترق الدارة المغلقة التي يُعدّ السلك جزءًا منها.

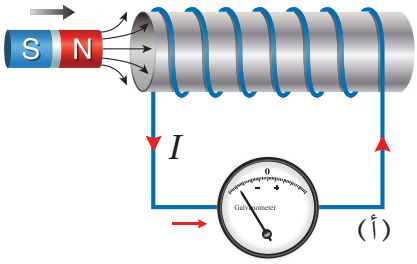
هل يتولّد تيار كهربائي حثّي في السلك عند تحريكه بموازاة طوله؟

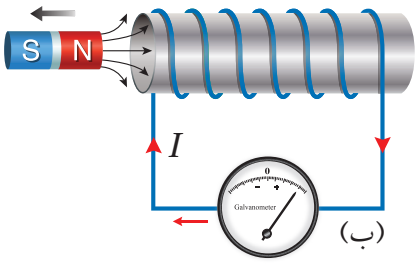
القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّية Induced Electromotive Force

القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة في ملفّ موصل

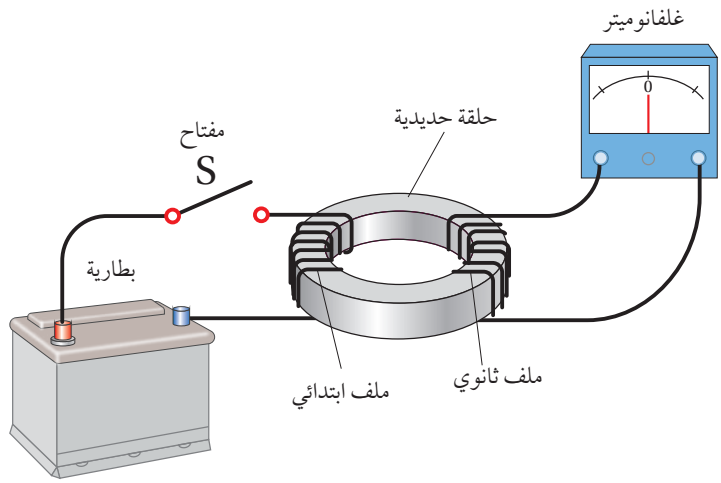
تتولّد **قوّة دافعة كهربائيّة حثّيّة Induced electromotive force** (ε) وتيّار كهربائيّ حثّي في ملفّ عند تغيّر التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترقه. وتغيّر التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترق الملفّ ينتجُ عن تغيّر في أيٍّ من مقدار المجال المغناطيسيّ، أو المِساحة التي يخترقها المجال المغناطيسيّ، أو الزاوية المحصورة بين اتّجاهي المجال المغناطيسيّ والمِساحة.

يوضّح الشكل (7) ملفًّا موصولًا بغلفانوميتر، ومغناطيس مستقيم. عند تحريك المغناطيس نحو الملف، ينحرف مؤشّر الغلفانوميتر في اتّجاه معيّن، دالًّا على تولّد قوة دافعة كهربائية حثّية وسريان تيار كهربائي حثّي في الملف، أتأمّل الشكل (7/ أ). أمّا عند إبعاد المغناطيس عن الملف، فإنّ مؤشّر الغلفانوميتر ينحرف في اتّجاه معاكس لاتّجاه انحرافه في الحالة السابقة، دالًّا على تولّد قوّة دافعة كهربائيّة حثّية، وسريان تيار كهربائيّ حثّي في الملف باتجاه معاكس. أتأمّل الشكل (7/ ب). وأحصل على النتائج نفسها عند تثبيت المغناطيس وتحريك الملف.





الشكل (7): يتولّد تيار كهربائيّ حثّي في أثناء حركة المغناطيس مقتربًا من ملفّ (أ)، أو مبتعدًا عنه (ب).



الشكل (8): يتولّد تيار كهربائي حثّي في الملفّ الثانويّ عند تغيّر مقدار تيار الملفّ الابتدائيّ.

يُمكن أيضًا توليد قوّة دافعة كهربائيّة حثّيّة، وتيار كهربائيّ حثّي بتنفيذ تجربة مماثلة لتجربة العالم فارادي، كما في الشكل (8). إذا لُفّ سلكٌ حول جزء من حلقة حديديّة، ثم وُصِّل طرفاه بمفتاح (S) وبطارية، مكوّنًا الملفّ الابتدائيّ Primary coil، ثم لُفّ سلكٌ آخر حول جزءٍ آخر من الحلقة نفسها، ووُصِّل طرفاه بغلفانوميتر فقط، مكوّنًا الملفّ الثانويّ Secondary coil. لحظة إغلاق المفتاح (S) ينحرف مؤشر الغلفانوميتر المتصل بالملف الثانوي باتجاه معين، ثم يعود إلى الصفر. ويتكرر ذلك لحظة فتح المفتاح، لكن انحراف المؤشر يكون باتجاه معاكس للحالة السابقة. ولا ينحرف مؤشر الغلفانوميتر عند ثبات مقدار التيار الكهربائي في الملف الابتدائي.

وأُفسّر المشاهدات السابقة، أنّه عند إغلاق المفتاح (S) ينمو تيار كهربائيّ في الملفّ الابتدائيّ مولّدًا مجالًا مغناطيسيًّا يخترق الملفّ الثانويّ، فيتغيّر التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترقه من صفر إلى قيمة معيّنة خلال مدّة نمو التيار، وهذا التغيّر في التدفّق المغناطيسيّ مع الزمن يولّد قوّة دافعة كهربائية حثّيّة وتيارًا كهربائيًّا حثّيًّا في الملفّ الثانويّ. الأمر نفسه يحدث عند فتح دارة الملفّ الابتدائيّ، إذ يتلاشى التيار الكهربائيّ المارّ فيه، وتبعًا لذلك يتناقص التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترق الملفّ الثانويّ، فتتولّد فيه قوة دافعة كهربائية حثّيّة وتيار كهربائيّ حثّي خلال مدة تلاشي تيار الملفّ الابتدائيّ.

أُفكّر: في الشكل (7)، هل ينحرف مؤشر الغلفانوميتر عند تحريك المغناطيس والملف معًا بالاتجاه نفسه بمقدار السرعة نفسه؟ أناقش أفراد مجموعتي للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

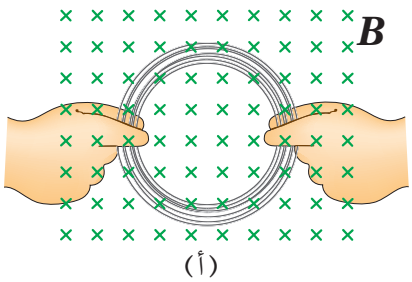
✓ **أتحقّق:** ما طرائق توليد قوّة دافعة كهربائيّة حثّيّة في ملفٍّ من سلك موصِل؟

المثال 2

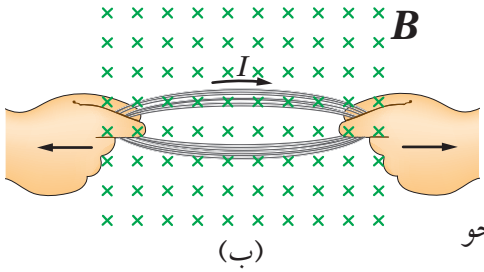
يوضّح الشكل (9/ أ) ملفًّا دائريًّا مغمورًا في مجال مغناطيسيّ منتظم عموديّ على سطح الملف. هل يتولّد تيار كهربائيّ حثّي:

أ . عند تحريك الملف نحو اليسار أو نحو اليمين مع بقائه داخل المجال كما في الشكل (9/ أ)؟

ب. في أثناء تغيير شكل الملف بحيث تقل مساحته كما في الشكل (9/ ب)؟



(أ)



(ب)

الشكل (9):
(أ) ثبات التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترق الملف عند تحريكه داخل المجال.
(ب) إنقاص مساحة الملف.

المُعطيات: الشكلان (9/ أ) و(9/ ب).

المطلوب: تفسير تولّد تيار كهربائيّ حثّي.

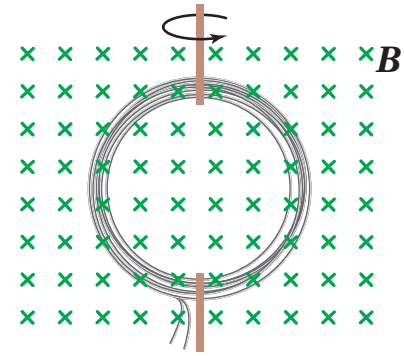
الحلّ:

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

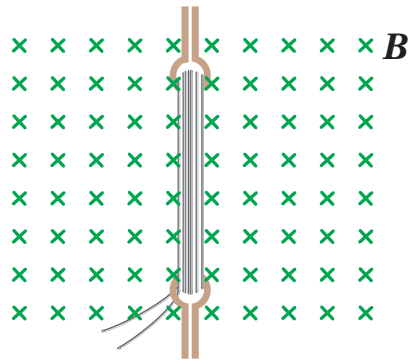
ب. عند شدّ الملف يتغير شكله بحيث تقل مساحة سطحة، فيقلّ التدفّق المغناطيسي الذي يخترقه، ما يؤدي إلى تولّد قوة دافعة كهربائية حثّية، وتيار كهربائي حثّي.

تمرين

يوضّح الشكل (10/ أ) ملفًّا دائريًّا مغمورًا في مجال مغناطيسيّ منتظم عموديّ على سطح الملف. أُفسّر ما يحدث في أثناء تدوير الملف في المجال المغناطيسيّ من الوضع المبيّن في الشكل (10/ أ) إلى الوضع المبيّن في الشكل (10/ ب).



(أ)



(ب)

الشكل (10): تدوير ملفّ في مجال مغناطيسي منتظم من الوضع (أ) إلى الوضع (ب).

قانون فارادي في الحثّ Faraday's Law of Induction

توصل العالم فارادي اعتمادًا على نتائج الاستقصاءات السابقة إلى قانونٍ، سُمّي **قانـون فارادي في الحثّ Faraday's law of induction**، الذي ينصّ على أنّ: "مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتولّدة في دارة كهربائيّة يتناسب طرديًّا مع المعدل الزمنيّ لتغيّر التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترقها". ويُعبَّر عنه رياضيًّا على النحو الآتي:

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

وإذا كانت الدارة مكوّنة من (N) لفّة، فإنّ قانون فارادي في الحثّ يُعبَّر عنه بالعلاقة الآتية:

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

والمعنى الفيزيائيّ للإشارة السالبة سيتضّح عند دراسة قانون لنز.

وعندما يحدث التغيّر في التدفّق المغناطيسيّ ($\Delta\Phi_B$) خلال مدّة زمنيةٍ (Δt)، فإنّه يُمكن كتابة قانون فارادي في الحثّ على النحو الآتي لحساب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتوسطة:

$$\overline{\mathcal{E}} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

وينشأ في الدارة الكهربائية تيّار كهربائيّ حثّيّ، تُحسب قيمته باستخدام قانون أوم على النحو الآتي:

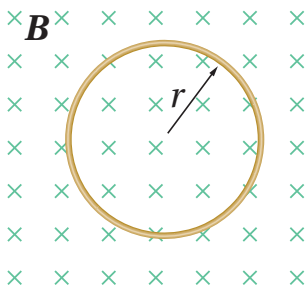
$$I = \left|\frac{\mathcal{E}}{R}\right|$$

حيث R مقاومة الدارة.

✓ **أتحقّق:** علامَ ينصّ قانون فارادي في الحثّ؟

المثال 3

ملفّ دائري عدد لفّاته (20) لفة، ومتوسط نصف قُطر اللفّة الواحدة (1.0 cm) موضوع في مجال مغناطيسيّ منتظم مقداره (120 mT)، كما في الشكل (11). سُحِب الملفُّ خارج المجال المغناطيسيّ خلال زمن مقداره (0.20 s)، أحسبُ القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتوسطة المتولّدة في الملفّ.



الشكل (11): ملفّ دائريّ موضوع في مجال مغناطيسيّ منتظم.

المُعطيات: $N = 20\ \text{turns},\ r = 1.0 \times 10^{-2}\ \text{m},\ B_i = 120 \times 10^{-3}\ \text{T},\ B_f = 0,\ \theta = 0°,\ \Delta t = 0.20\ \text{s}.$

المطلوب: $\overline{\mathcal{E}} = ?$

الحلّ:

بداية، أحسب مِساحة المقطع العرضيّ للملفّ.

$$A = \pi r^2$$

$$= \pi \times (1.0 \times 10^{-2})^2 = 3.14 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$$

أحسب القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتوسطة المتولّدة في الملف على النحو الآتي، مع ملاحظة أنّ التدفّق المغناطيسيّ النهائيّ يساوي صفرًا، حيث المجال المغناطيسي الذي يخترق الملف يساوي صفرًا:

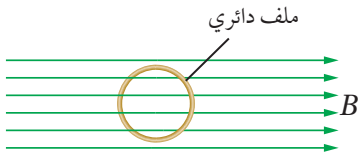
$$\bar{\varepsilon} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -N\frac{(\Phi_{B,f} - \Phi_{B,i})}{\Delta t}$$

$$= -N\frac{(0 - BA\cos\theta)}{\Delta t} = -20 \times \left(\frac{0 - 120 \times 10^{-3} \times 3.14 \times 10^{-4}\cos 0^\circ}{0.20}\right)$$

$$= 3.77 \times 10^{-3}\,\text{V}$$

المثال 4

ملفّ دائريّ عدد لفّاته (100) لفة، ومِساحة مقطعه العرضي ($1.2 \times 10^{-4}\,\text{m}^2$)، موضوع في مجال مغناطيسيّ منتظم مقداره (1.0 T)، كما في الشكل (12). بداية، مستوى الملف موازٍ لخطوط المجال المغناطيسي، ثمّ دار الملف بزاوية مقدارها (90°) حول محور رأسيّ يمر بمركزه بحيث أصبح مستواه عموديًّا على اتّجاه المجال المغناطيسيّ خلال (0.50 s). أحسب ما يأتي:



الشكل (12): ملفّ دائريّ في مجالٍ مغناطيسيّ منتظم.

أ . التغيّر في التدفّق المغناطيسيّ عبر مقطع الملف.

ب. القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتوسطة المتولدة في الملف.

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

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

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

الحلّ:

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

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

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

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

ب. أحسب القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتوسطة المتولّدة في المِلفّ على النحو الآتي:

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

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

جـ. أستخدم قانون أوم لحساب التيار الكهربائيّ الحثّي المتوسط المارّ في الملف على النحو الآتي:

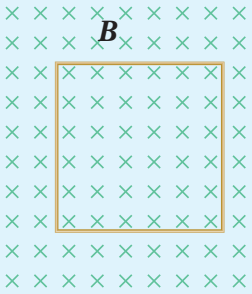
$$I = \left|\frac{\bar{\varepsilon}}{R}\right| = \left|\frac{-2.4 \times 10^{-2}}{4.0}\right| = 6 \times 10^{-3}\,\text{A} = 6\,\text{mA}$$

تمرين

حلقة مربّعة الشكل مقاومتها (10 Ω)، موضوعة في مجال مغناطيسيّ منتظم، حيث مستواها عموديٌّ على اتّجاه المجال المغناطيسيّ كما في الشكل (13). إذا تغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يخترق الحلقة من قيمة ابتدائية (0.15 Wb) إلى (0.10 Wb) خلال (0.01 s)، أحسب ما يأتي:

أ . القوة الدافعة الكهربائية الحثّيّة المتوسطة المتولّدة في الحلقة.

ب. التيار الكهربائي الحثّي المتوسط المارّ في الحلقة.



الشكل (13): حلقة موصلة مربّعة الشكل في مجال مغناطيسيّ منتظم.

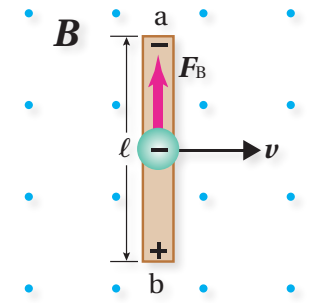
القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة في موصِل متحرّك Motional EMF

يوضّح الشكل (14/ أ) موصلًا يتحرك باتجاه محور ($+x$) بسرعة ثابتة عموديًّا على طوله، وعلى اتّجاه مجال مغناطيسيّ منتظم (باتجاه محور $+z$). تتحرك الإلكترونات الحرّة في الموصل معه باتجاه محور ($+x$) عموديًّا على اتّجاه المجال المغناطيسيّ قاطعة خطوط المجال المغناطيسي، فتتأثّر بقوة مغناطيسيّة باتجاه محور ($+y$) بحسب قاعدة اليد اليمنى. ونتيجة لذلك تتجمّع شحنات سالبة عند طرف السلك (a)، تاركةً خلفها شحنات موجبة عند الطرف (b)، فيصبح جهد الطرف (b) أكبر من جهد الطرف (a)، أيْ يتولّد فرق في الجهد الكهربائي بين طرفيه، يُسمّى القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة ($\mathcal{E}$) Induced electromotive force. ويُعبَّر عن مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتولّدة في هذا الموصل بالعلاقة الآتية:

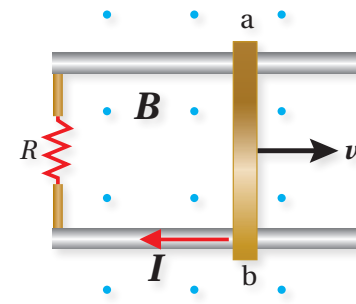
$$\mathcal{E} = B\ell v$$

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

وعندما يكون الموصل جزءًا من دارة كهربائيّة مغلقة، كما في الشكل (14/ ب)، فإنه يسري فيها تيّار كهربائيّ حثّيّ، إذ يعمل الموصل عمل بطارية قطبها الموجب عند الطرف (b). ويستمر سريان التيار الكهربائيّ في الدارة الكهربائيّة ما دام الموصل متحركًا.



(أ)



(ب)

الشكل (14):
(أ) في أثناء قطع موصِل خطوط مجال مغناطيسي يتولّد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حثّية.
(ب) ويسري فيه تيار كهربائي حثّي عندما يصبح جزءًا من دارة كهربائية مغلقة.

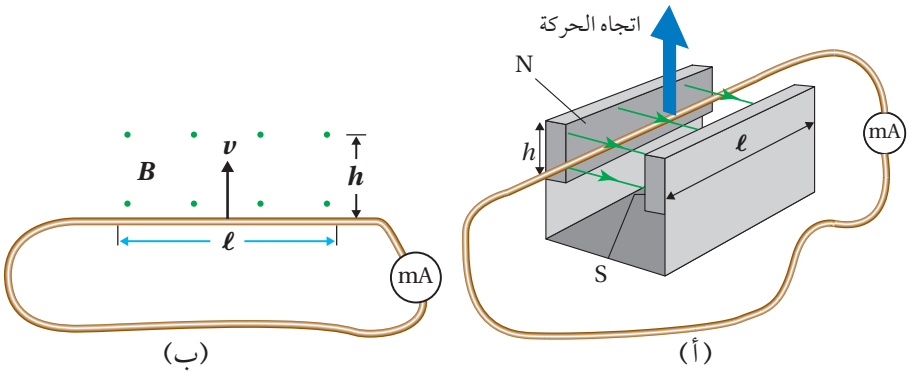
✓ **أتحقّق:** علام يعتمد مقدار القوة الدافعة الكهربائية الحثّيّة المتولّدة بين طرفي موصل يتحرك عموديًّا على طوله وعلى اتّجاه المجال المغناطيسيّ؟

المثال 5

يتقابل القطبان الشماليّ N والجنوبيّ S لمغناطيسين، طول كلٍّ منهما ($\ell = 20.0\ \text{cm}$)، وارتفاع كلٍّ منهما ($h = 6.00\ \text{cm}$)، بينهما مجال مغناطيسي منتظم مقداره (54.0 mT). أتأمّل الشكل (15/ أ). حُرِّك سلكٌ مشدودٌ موصولٌ بملي أميتر من الطرف السفلي للمغناطيسين إلى الطرف العلويّ عموديًّا على اتّجاه خطوط المجال المغناطيسيّ بسرعة ثابتة خلال مدّة زمنيّة مقدارها (0.200 s)، كما في الشكل (15/ ب). أحسب ما يأتي:

أ . القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة المتولّدة في السلك.

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



الشكل (15):
(أ) تحريك سلك عموديًّا على اتجاه خطوط مجالٍ مغناطيسيّ منتظم.
(ب) منظر أمامي لحركة السلك داخل المجال المغناطيسي.

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

المطلوب: $\mathcal{E} = ?,\ I = ?$

الحلّ:

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

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

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

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

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

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

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

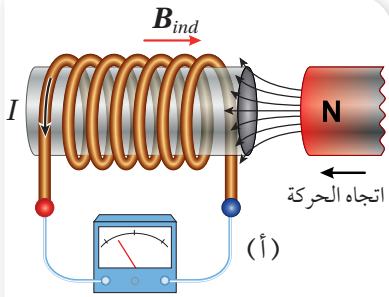
$$= 1.62 \times 10^{-3}\ \text{A} = 1.62\ \text{mA}$$

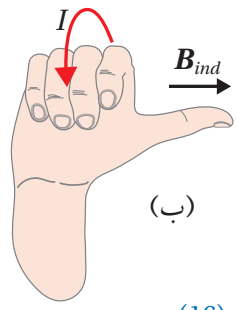
قانون لنز Lenz's Law

لاحظت في طرائق توليد القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية والتيار الكهربائي الحثّي السابقة أنّ مؤشّر الغلفانوميتر أو الأميتر ينحرف باتّجاه معيّن عند تقريب أحد قطبي مغناطيس من ملف، وأن اتّجاه الانحراف ينعكس عند إبعاد القطب نفسه عن الملف. فما دلالة هذه المشاهدات؟ وكيف أُحدّد اتجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد؟

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

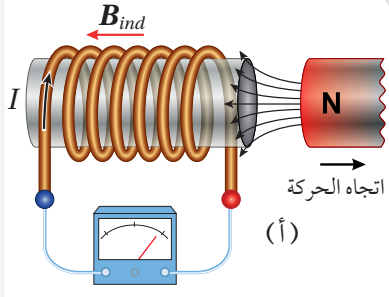
لتحديد اتجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد، أتأمّل الشكل (16/ أ) الذي يوضّح تقريب القطب الشمالي لمغناطيس من أحد طرفي ملف. ونتيجة لذلك يزداد التدفّق المغناطيسي الذي يخترق الملف، فتتولّد قوة دافعة كهربائيّة حثّية بين طرفيه، تؤدّي إلى مرور تيار كهربائيّ حثّي في الاتجاه الذي يولّد مجالًا مغناطيسيًّا يقاوم الزيادة في التدفّق المغناطيسي. وهذا يعني أنّ طرف الملفّ القريب من المغناطيس يصبح قُطبًا مغناطيسيًّا شماليًّا، فيتنافر مع القطب الشمالي للمغناطيس. ولأُحدّد اتّجاه التيار الكهربائي الحثّي، أستخدم قاعدة اليد اليمنى كما في الشكل (16/ ب) حيث يُشير الإبهام إلى اتّجاه المجال المغناطيسي الناتج من الملف (B_{ind})، في حين يُشير اتجاه انحناء بقيّة الأصابع إلى اتّجاه التيار الكهربائيّ الحثّي في لفّات الملف.

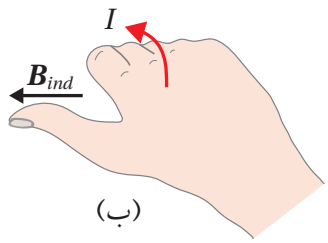




الشكل (16):
(أ) تقريب القطب الشمالي لمغناطيس من أحد طرفي ملف.
(ب) أستخدم قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتّجاه التيار الكهربائي الحثّي في الملف.

أمّا عند إبعاد القطب الشمالي للمغناطيس عن طرف الملف الموضّح في الشكل (17/ أ) يقلّ التدفّق المغناطيسي الذي يخترقه، فتتولّد قوة دافعة كهربائية حثّية بين طرفيه تؤدّي إلى مرور تيار كهربائي حثّي في الاتجاه الذي يولّد مجالًا مغناطيسيًّا اتجاهه نحو اليسار (يُصبح طرف الملف القريب من المغناطيس قُطبًا مغناطيسيًّا جنوبيًّا)؛ كي يُقاوم النقص في التدفّق المغناطيسي، فتنشأ قوة تجاذب بين القطبين تُقاوم ابتعاد القطب الشمالي عن الملف. وأُحدّد اتجاه التيار الكهربائيّ الحثّي المتولّد باستخدام قاعدة اليد اليمنى كما في الشكل (17/ ب).



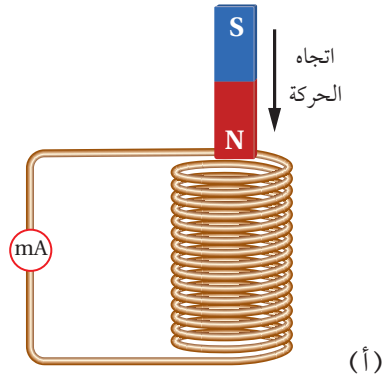


الشكل (17):
(أ) إبعاد القطب الشمالي لمغناطيس عن أحد طرفي ملف.
(ب) أستخدم قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه التيار الكهربائي الحثّي في الملف.

✓ **أتحقّق:** علامَ ينصّ قانون لنز؟ وكيف أُحدّد اتجاه التيار الكهربائيّ الحثّي المتولّد في ملفّ عند تغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يخترقه؟

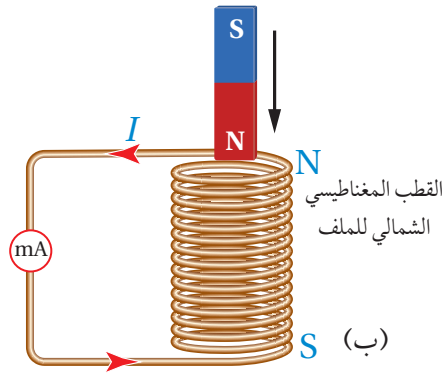
المثال 6

يقترب القطب الشمالي لمغناطيس من ملف، فيتحرك مؤشّر الملي أميتر المتصل به. ويوضّح الشكل (18/ أ) منظرًا جانبيًّا للمغناطيس في أثناء اقترابه من الملف. كيف أُحدّد اتّجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد في الملف وما اتجاهه عند النظر إلى الملف من الأعلى؟



(أ)

المُعطيات: الشكل (18/ أ).



(ب)

المطلوب: تحديد اتّجاه التيار الكهربائيّ الحثّي.

الشكل (18):
(أ) منظر جانبي لتقريب القطب الشمالي لمغناطيس من أحد طرفي ملف.
(ب) اتجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد في الملف واتجاه المجال المغناطيسي الناتج.

الحلّ:

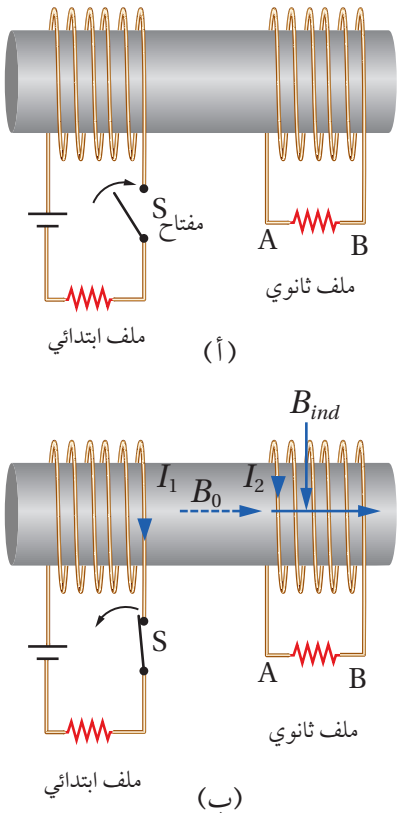
بحسب قانون لنز، يكون اتّجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد في الملف في الاتجاه الذي ينشأ عنه مجال مغناطيسي حثّي يُقاوم التغيّر في التدفّق المغناطيسي المسبّبَ في توليده. وفي هذا الشكل، يكون اتّجاه التيار الكهربائي الحثّي في الملف، بحيث يولّد مجالًا مغناطيسيًّا داخل الملف إلى الأعلى؛ باستخدام قاعدة اليد اليمنى أستنتج أنّ اتجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد في الملف يكون بعكس اتجاه حركة عقارب الساعة عند النظر إليه من الأعلى، أيْ يكون الطرف العلويّ للملف قطبًا مغناطيسيًّا شماليًّا؛ كي يقاوم اقتراب القطب الشمالي للمغناطيس المؤدّي إلى توليده. أتأمّل الشكل (18/ ب).

المثال 7

لُفّ ملفّان عدد لفات كلٍّ منهما (100) لفة، ومساحة المقطع العرضي لكلّ منهما ($3.0 \times 10^{-4}\ m^2$)، على قلب حديدي كما في الشكل (19/ أ). عند إغلاق مفتاح دارة الملف الابتدائيّ يتولّد مجال مغناطيسي داخله مقدارُه ($B_0 = 180\ mT$) ينتقل عبر القلب الحديدي، كما في الشكل (19/ ب)، وعند فتح الدارة الكهربائيّة يتلاشى هذا المجال المغناطيسيّ خلال (0.10 s). أُجيب عمّا يأتي:

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

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



الشكل (19):
(أ) ملفان ملفوفان حول القلب الحديدي نفسه.
(ب) اتجاه المجال المغناطيسي الناتج من الملف الابتدائي يكون باتجاه اليمين.

المُعطيات:

$$N = 100\ \text{turns},\ A = 3.0 \times 1\,0^{-4}\ m^2,$$
$$B_0 = 180 \times 10^{-3}\ T,\ \Delta t = 0.10\ s.$$

المطلوب: $\bar{\mathcal{E}} = ?$

الحلّ:

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

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

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

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

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

الحثّ الذاتيّ Self Induction

أتأمّل الشكل (20) الذي يوضّح دارة كهربائيّة تحوي بطارية ومقاومة (مصباح مثلًا) وملفًّا لولبيًّا وغلفانوميتر ومفتاح (S). عند إغلاق المفتاح (S) بوصلِه بالنقطة (a) تزداد شدّة إضاءة المصباح تدريجيًّا حتى تثبت، ما يعني أنّ التيار لا يصل إلى قيمته العظمى لحظيًّا، بل ينمو تدريجيًّا من الصفر إلى قيمته العظمى، كما في الشكل (21/ أ).

أُفسّر ما سبق بأنّ وجود الملفّ اللولبيّ قد أعاق نموّ التيار الكهربائيّ الناتج من البطارية. فعند إغلاق المفتاح (S) يسري التيار الكهربائيّ في الدارة الكهربائيّة، فيتولّد مجال مغناطيسيّ في الملف اللولبيّ، ويزداد التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترقه. وبحسب قانون لنز، ينشأ فيه قوة دافعة كهربائيّة حثّية ذاتيّة Self–induced electromotive force تعاكس القوة الدافعة الكهربائيّة (ε) للبطارية، ما يؤدّي إلى نموّ التيار الكهربائي إلى قيمته العظمى تدريجيًّا وليس لحظيًّا.

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

ويوضّح الشكل (21/ ب) أنّ التيّار الكهربائيّ يتلاشى تدريجيًّا لحظة توصيل المفتاح (S) بالنقطة (b) في الدارة الكهربائيّة الموضّحة في الشكل (20)، حيث لا يصل مقداره إلى الصفر مباشرة. وأُلاحظ أنّ البطارية في هذه الحالة لم تعد جزءًا من الدارة الكهربائيّة.

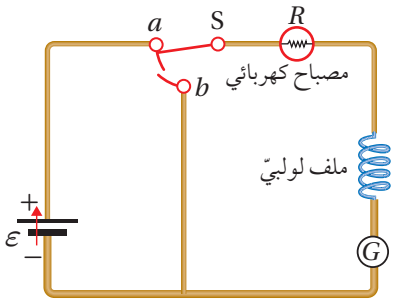
وأحسب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية الذاتيّة المتولّدة في المحثّ باستخدام قانون فارادي على النحو الآتي:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$

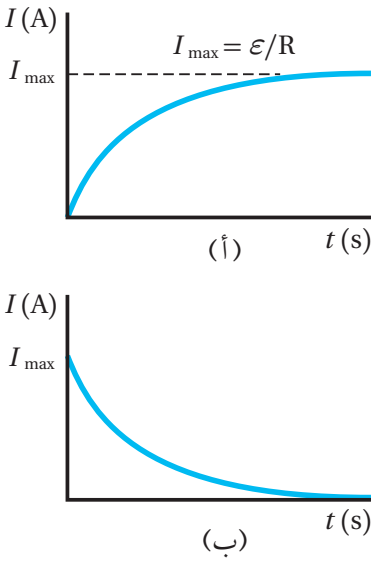
ونظرًا إلى أنّ التدفّق المغناطيسيّ يتناسب طرديًّا مع مقدار المجال المغناطيسي، الذي بدوره يتناسب طرديًّا مع مقدار التيار الكهربائيّ المارّ في الملف، فإنّ القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية الذاتيّة (ε_L) تتناسب طرديًّا مع المعدل الزمني للتغيّر في مقدار التيار الكهربائيّ، وأُعبّر عن ذلك رياضيًّا على النحو الآتي:

$$\varepsilon_L = -L\frac{dI}{dt}$$

حيث (L) ثابت التناسب، ويُسمّى **معامل الحثّ الذاتيّ Coefficient of self induction** للمحثّ أو محاثّة Inductane المحثّ اختصارًا، ويُعرف بأنّه نسبة القوة الدافعة



الشكل (20): تزداد إضاءة المصباح تدريجيًّا عند وصل المفتاح S بالنقطة (a)، وتتلاشى إضاءة المصباح تدريجيًّا عند وصل المفتاح S بالنقطة (b).



الشكل (21):

(أ) معدل نموّ التيار الكهربائي في دارة تحوي محثًّا ومصباحًا لحظة توصيل المفتاح S بالنقطة (a).

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

أُفكّر: في الشكل (21/ ب)، لماذا يتلاشى التيار الكهربائي تدريجيًّا ولا يصل مقداره إلى الصفر مباشرة؟ أناقش أفراد مجموعتي، للتوصل إلى إجابة عن السؤال.

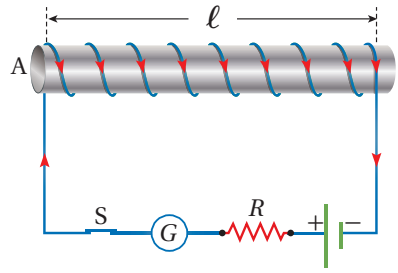
الكهربائيّة الحثّية الذاتيّة المتولّدة بين طرفي محثّ إلى المعدل الزمني للتغيّر في مقدار التيار الكهربائيّ المارّ فيه، وهو مقياس لممانعة المحثّ للتغيّر في مقدار التيار الكهربائيّ المارّ فيه، ووحدة قياسه هي (V.s/A)، وتُسمّى هنري (H) بحسب النظام الدوليّ للوحدات، وذلك تكريمًا لجهود العالم جوزيف هنري في مجال الحثّ الكهرمغناطيسي. وأُعرّف وحدة الهنري henry (H) بأنّها محاثّة محثّ تتولّد بين طرفيه قوة دافعة كهربائيّة حثّية ذاتيّة مقدارها (1 V)، عندما يكون المعدّل الزمني للتغيّر في مقدار التيار الكهربائيّ المارّ فيه (1 A/s). ويوضّح الشكل (22) رمز المحثّ في الدارات الكهربائيّة.

الشكل (22): رمز المحثّ في الدارات الكهربائيّة.

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

محاثّة ملفّ لولبيّ Inductance of a Solenoid

كي أتوصّل إلى العوامل التي يعتمد عليها معامل الحثّ الذاتيّ لمحثّ (ملف لولبيّ) أتأمّل الشكل (23) الذي يوضّح محثًّا طوله (ℓ)، ومساحة مقطعه العرضي (A)، وعدد لفّاته (N) في دارة كهربائيّة. لحظة غلق المفتاح يتزايد مقدار التيار الكهربائيّ المارّ في الدارة تدريجيًّا من الصفر إلى (I) خلال مدة زمنيّة (Δt)، ويتزايد مقدار التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترق المحثّ من الصفر إلى (Φ_B) خلال المدّة الزمنيّة (Δt) نفسها. فيتولّد بين طرفي المحثّ قوة دافعة كهربائيّة حثّية ذاتيّة، وبحسب قانون فارادي في الحثّ، يُعبَّر عن مقدارها المتوسط بالعلاقة الآتية:



الشكل (23): محثّ في دارة كهربائيّة.

$$\mathcal{E}_L = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

ويُعبَّر أيضًا عن مقدارها المتوسط بالعلاقة الآتية:

$$\mathcal{E}_L = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

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

$$LI = N\Phi_B$$

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

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

ومنها أجد أنّ معامل الحثّ الذاتيّ لمحثّ لولبيّ يُعبَّر عنه بالعلاقة الآتية:

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

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

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

المثال 8

إذا علمت أنّ طول المحثّ الموضّح في الشكل (23) يساوي (20.0 cm)، ومساحة مقطعه العرضي ($2.5 \times 10^{-5}\ m^2$)، وعدد لفّاته (200) لفة، والمحثّ ملفوف حول أنبوب كرتونيّ يملؤه الهواءُ، ويسري فيه تيارٌ كهربائيّ (5.0 A)، أحسب ما يأتي:

أ . معامل الحثّ الذاتيّ للمحثّ.

ب. التدفّق المغناطيسيّ الذي يخترق المحثّ.

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

المُعطيات: $N = 200\ \text{turns}, \ell = 20.0 \times 10^{-2}\ m, A = 2.5 \times 10^{-5}\ m^2, I = 5.0\ A, \Delta t = 0.10\ s, \mu_o = 4\pi \times 1\,0^{-7}\ T.m/A.$

المطلوب: $L = ?,\ \Phi_B = ?,\ \mathcal{E}_L = ?$

الحلّ:

أ . أستخدم العلاقة الآتية لحساب معامل الحثّ الذاتيّ للمحثّ مع استخدام النفاذيّة المغناطيسيّة للهواء:

$$L = \frac{\mu_o N^2 A}{\ell} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times (200)^2 \times 2.5 \times 10^{-5}}{20.0 \times 10^{-2}}$$

$$= 6.28 \times 10^{-6}\ H \approx 6.3 \times 1\,0^{-6} H$$

ب. أحسب التدفّق المغناطيسيّ باستخدام العلاقة الآتية:

$$L\,I = N\,\Phi_B$$

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

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

$$= \frac{6.3 \times 10^{-6} \times 5.0}{200} = 1.58 \times 1\,0^{-7}\ Wb$$

جـ. أستخدم العلاقة الآتية لحساب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية الذاتيّة المتوسطة المتولّدة في المحثّ.

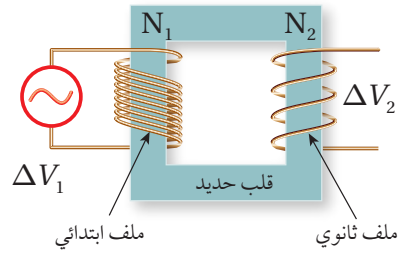
$$\mathcal{E}_L = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = -6.3 \times 10^{-6} \times \frac{(-5.0 - 5.0)}{0.10}$$

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

المحوّل الكهربائي ونقل الطاقة
The Transformer and Power Transmission

تعلّمتُ سابقًا أنّ القدرة الكهربائيّة المستهلكة في موصِل يُعبَّر عنها بالعلاقة: $P = I^2R$، أيْ إنّها تتناسب طرديًّا مع كلٍّ من المقاومة ومربع التيار. عند نقل الطاقة الكهربائيّة إلى مسافات كبيرة تؤدّي المقاومة الكهربائية للأسلاك الناقلة إلى فَقدٍ كبيرٍ في الطاقة الكهربائية. وللتقليل من هذه الطاقة المفقودة في أثناء عملية النقل، يُستخدم المحوّل الكهربائي Transformer.

يعتمد المحوّل الكهربائي في عمله على الحثّ الكهرمغناطيسي، وهو يتكوّن من ملفّين من الأسلاك الموصلة ملفوفين على قلب حديدي مشترك، كما في الشكل (24)، يُسمّى الملف الأول بالملف الابتدائي، ويتكوّن من (N_1) لفة، ويتصل بمصدر فرق جهد متغير، ويُرمز إليه بالرمز المبين على الشكل. في حين يتكوّن الملف الثاني من (N_2) لفة، ويتصّل بجهاز مستهلك للطاقة، مثل مقاومة أو مصباح، ويُسمَّى الملفّ الثانوي.



الشكل (24): محوّل كهربائي يتكوّن من ملفّين ابتدائي وثانوي.

يولّد مصدر فرق الجهد المتردّد تيارًا كهربائيًّا متردّدًا؛ أيْ متغيرًا في المقدار والاتجاه، فيتولّد في الملف الابتدائي مجال مغناطيسي متغيّر مع الزمن داخل الملف، ما يؤدّي إلى تغيّر في التدفّق المغناطيسي، وبتطبيق قانون فارادي في الحثّ، فإنّ فرق الجهد يُعبَّر عنه بالعلاقة:

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

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

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

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

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

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

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

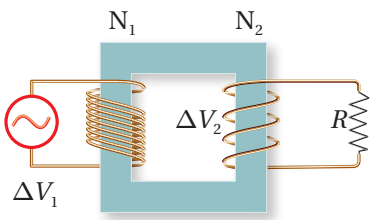
أصمّم باستعمال برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يُوضّح نموذجًا لمحوّل كهربائي رافع للجهد، ولمحوّل كهربائي خافض للجهد، على أن يتضمن العرض مقارنة بين عدد لفات الملفين الابتدائي والثانوي، ومقارنة بين فرق الجهد الكهربائي على طرفي الملفين لكلا المحوّلين، ثم أشارك فيه زملائي/ زميلاتي في الصف.

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

عند نقل الطاقة عبر مسافات طويلة تستخدم شركات توليد الكهرباء أسلاك توصيل ذات مقطع عرضي صغير نسبيًّا لتقليل الكلفة المالية، لكن هذا يؤدي إلى مقاومة كبيرة، لذلك يجب خفض قيمة التيار لتقليل الطاقة المفقودة. ولتحقيق ذلك، يُستخدم محوّل رافع للجهد في محطات توليد الطاقة لرفع الجهد إلى نحوِ (230 kV) مع ثبات قيمة القدرة؛ ما يؤدّي إلى خفض قيمة التيار الكهربائي في خطوط نقل الطاقة، ثمّ تُستخدم محوّلات خافضة للجهد حتى تصل قيمة فرق الجهد في الأحياء السكنية إلى (230 V). والمحوّلات المستخدمة عمليًّا لا تكون مثالية، إذ إنّ القدرة التي نحصل عليها من الملف الثانوي تكون أقلّ من القدرة التي يُزوّد بها الملف الابتدائي للمحوّل.

✓ **أتحقّق:** أوضّح كيف تنتقل الطاقة الكهربائية بين ملفّي المحوّل.

أفكّر: هل يعمل المحول المبيّن في الشكل (25) عند وصل الملف الابتدائي بمصدر تيار مستمر؟



الشكل (25): محوّل خافض للجهد يتّصل ملفّه الثانوي بمقاومة.

المثال 9

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

أ . أحسب فرق الجهد بين طرفي الملف الثانوي.

ب. أحسب التيار في الملف الابتدائي.

المُعطيات: $\Delta V_1 = 240\ \text{V},\ R = 2\ \Omega, \text{N}_1 = 1200, \text{N}_2 = 30$

المطلوب: $\Delta V_2 = ?, I_1 = ?$

الحلّ:

أ .

$$\frac{\Delta V_1}{\text{N}_1} = \frac{\Delta V_2}{\text{N}_2}$$

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

ب. التيار الكهربائيّ المارّ في الملف الابتدائي:

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

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

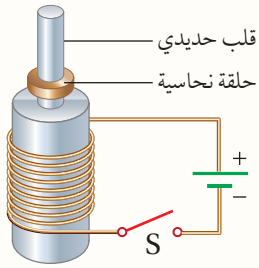
$$I_1 = \frac{I_2 \Delta V_2}{\Delta V_1} = \frac{3 \times 6}{240} = 0.075\ \text{A}$$

مراجعة الدرس

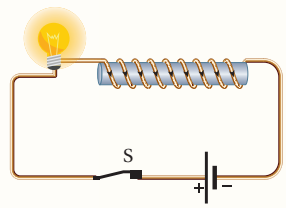
1. **الفكرة الرئيسة:** ما المقصود بالتدفّق المغناطيسيّ؟ ومتى يتولّد تيار كهربائيّ حثّي وقوة دافعة كهربائيّة حثيّة في دارة كهربائيّة؟

2. **أُحلّل وأستنتج:** لديّ قطعتا نيوديميوم متماثلتان، إحداهما ممغنطة والأخرى غير ممغنطة، وأُنبوب نحاسيّ طوله (ℓ) مثبت في وضع رأسي. عندما أُمسك بالقطعة الممغنطة ثم أسقطها داخل الأنبوب النحاسيّ، فإنّها تستغرق زمنًا (t) لتخرج من فوّهته المقابلة. إذا أسقطت قطعة النيوديميوم غير الممغنطة خلال الأنبوب نفسه من الارتفاع نفسه، فهل تستغرق زمنًا أكبر من الزمن (t) أم أقلّ منه لتخرج من فوّهته المقابلة؟ أُفسّر إجابتي.

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



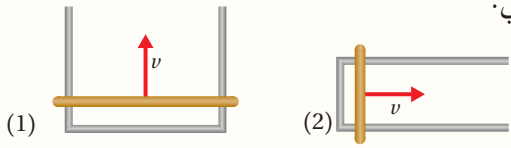
4. **أتوقّع:** يوضّح الشكل المجاور دارة كهربائيّة مغلقة. أتوقّع ما يحدث لإضاءة المصباح في أثناء:



أ. تقريب القطب الشمالي للمغناطيس من المحثّ.

ب. تقريب القطب الجنوبي للمغناطيس من المحثّ.

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



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

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

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

6. **أحسب:** محثّ معامل حثّه الذاتيّ (4.0×10^{-4} H)، موصول بدارة كهربائيّة. إذا تغيّر مقدار التيار الكهربائيّ المارّ فيها من (0.0 A) إلى (8.0 A) خلال (0.10 s)، أحسب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة الذاتيّة المتوسطة المتولّدة في المحثّ.

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

الدرس 2

الفكرة الرئيسة:

ظهرت محطات توليد الطاقة الكهربائيّة نهاية القرن التاسع عشر، وكان بعضها يولّد تيارًا مستمرًّا، وبعضها الآخر يولّد تيارًا متردّدًا. لكن الآن، يمكن القول إنّ المحطات جميعها تولّد تيارًا متردّدًا، وبوجود أجهزة كهربائيّة كثيرة تعمل بالتيار المستمر؛ اقتضت الحاجة إلى أجهزة تحوّل أيًّا من التيارين إلى الآخر.

نتاجات التعلّم:

- أقارن بين التيار المتردّد والتيار المستمر من حيث الخصائص ومصادر كلٍّ منهما.
- أحدّد العوامل التي تؤثر في توليد القوة الدافعة الكهربائية الحثّية بين طرفي المولّد.
- أحلّل رسمًا تخطيطيًّا لدارة تيار متردّد تشتمل على: مقاومة فقط، محثّ مثاليّ فقط، مواسع فقط، مقاومة ومحثّ ومواسع تتصل على التوالي.
- أتعرّف تركيب دارة الرنين، وأحدّد العوامل التي يعتمد عليها تردّد الرنين لدارة على التوالي.

المفاهيم والمصطلحات:

فرق الجهد المتردّد
Alternating Potential Difference

التيار المتردّد Alternating Current

المعاوقة المحثّيّة Inductive Reactance

المعاوقة المواسعيّة Capacitive Reactance

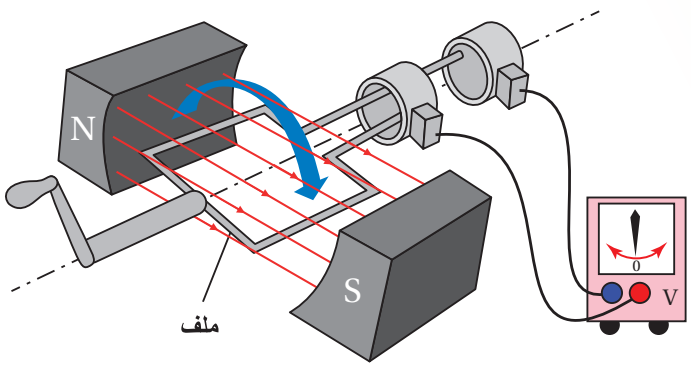
تردّد الرنين Resonance Frequency

التيار الكهربائيّ المتردّد
Alternating Electric Current

تعمل أغلب الأجهزة الكهربائيّة التي نستخدمها؛ مثل: الثلاجة، والمكيّف، والمدفأة الكهربائيّة بالتيار المتردّد الذي تزوّدنا به محطات توليد الطاقة الكهربائيّة.

ونحصل على التيار المتردّد من المولّد الكهربائيّ الذي يتكوّن في أبسط أشكاله من ملفّ أحاديّ مصنوع من سلك فلزّي معزول، يدور داخل مجال مغناطيسي. وعندما يدور الملف، تتغير الزاوية المحصورة بين متّجه مساحته واتّجاه المجال المغناطيسي، ما يؤدّي إلى تغيّر في التدفّق المغناطيسيّ خلال الملفّ، فتتولّد قوة دافعة كهربائيّة حثيّة بين طرفيه الموصولين بفولتميتر، كما في الشكل (26).

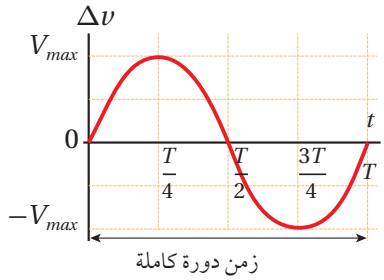
عند دوران الملفّ يتذبذب مؤشّر الفولتميتر يمينًا ويسارًا على جانبي الصفر، ما يعني أن القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتولّدة في الملف تغيّر مقدارها واتجاهها باستمرار، فيكون أحد طرفي الملف موجبًا، والآخر سالبًا خلال نصف الدورة الأول، ثم تنعكس قطبيته خلال النصف الثاني من الدورة.



الشكل (26): مولّد كهربائيّ
يتصل طرفا ملفّه بفولتميتر.

فرق الجهد الكهربائي المتردّد Alternating Potential Difference

عند توصيل طرفي المولّد الكهربائي بجهاز راسم الموجات Oscilloscope، وتدوير ملفّه بتردّد زاويّ ثابت، يظهر على شاشة راسم الموجات شكل اقتران جيبيّ، كما في الشكل (27)، أستنتج منه أنّ مقدار القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتولّدة يتغيّر بالنسبة إلى الزمن باستمرار، وأنّ اتجاهها يتغيّر كل نصف دورة.



الشكل (27): تغيّر فرق الجهد المتردّد بين طرفي الملف مع الزمن وَفْقًا لاقتران جيبيّ.

في أثناء دوران الملف في المجال المغناطيسي تتغير الزاوية بين متجهي المجال المغناطيسي والمساحة، ما يجعل التدفق المغناطيسي عبر الملف يتغير باستمرار. وبتطبيق قانون فارادي في الحثّ على الملفّ في أثناء دورانه، أجد أنّ القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّية تتغيّر وَفْقَ علاقة جيبيّة؛ لذا فإنّ فرق الجهد بين طرفي الملف يتغيّر مع الزمن، ويُسمّى **فرق جهد متردّد Alternating potential difference**، يُعبَّر عنه بالعلاقة:

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

حيث السعة ($V_{\max}$)، هي القيمة العظمى لفرق الجهد، ويعتمد مقدار فرق الجهد على مقدار المجال المغناطيسي ومساحة مقطع الملف وعدد لفاته، وعلى التردّد الزاويّ (ω). فعند دوران الملف بتردّد (f) وزمن دوري (T)، فإنّ ($\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$).

الربط بالحياة

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

أفكّر: لماذا لا ألاحظ تغيّر سطوع إضاءة مصباح كهربائيّ مع الزمن عندما يعمل بتيار متردّد؟

المثال 10

يُزوّدنا مولّد كهربائي بفرق جهد متردّد، قيمته العظمى تساوي (310 V)، وتردّده (50 Hz). أكتب معادلة فرق الجهد المتردّد، ثمّ أجد مقدار فرق الجهد عند اللحظة ($t = \frac{1}{600}$ s).

المُعطيات: $t = \frac{1}{600}$ s, $V_{\max} = 310$ V, $f = 50$ Hz

المطلوب: $\Delta v = ?$

الحل:

أحسب (ω) باستخدام العلاقة :

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

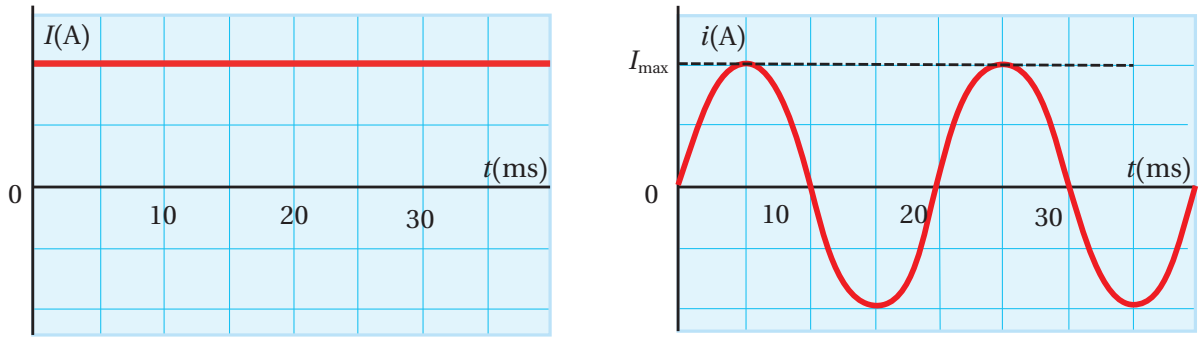
ثمّ أكتب معادلة فرق الجهد :

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

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

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

✓ **أتحقّق:** أصف فرق الجهد الكهربائيّ المتردّد، موضّحًا ما يميزه عن فرق الجهد الذي أحصل عليه من البطارية.



(ب): علاقة التيار المستمر بالزمن.

(أ) : علاقة التيار المتردّد بالزمن.

الشكل (28): مقارنة بين التيار المتردّد والتيار المستمر من حيث المقدار والاتّجاه.

المقارنة بين التيار الكهربائي المتردّد والتيار الكهربائي المستمرّ (المباشر)

Comparing Alternating and Direct Currents

يزوّدنا المولّد الكهربائي **بتيار متردّد** **Alternating current (AC)** وتزوّدنا البطاريات بمختلف أنواعها بتيار كهربائي مستمرّ Direct current (DC). ويبيّن الرسم البياني في الشكل (28/ أ) أنّ مقدار التيار المتردّد يتغيّر باستمرار مع الزمن، ويتغير أيضًا اتجاه سريانه كلّ نصف دورة؛ بسبب تغيّر مقدار واتجاه القوة الدافعة الكهربائيّة المسبّبة له. في حين يبيّن الشكل (28/ ب) أنّ التيار المستمرّ ثابت في المقدار وفي الاتجاه.

تزوّد شركات الكهرباء المنازل والمباني بالطاقة الكهربائية على شكل تيار متردّد، ونحصل على التيار المتردّد من المقابس الكهربائيّة في المنازل مثلاً، ولأنّ أكثر الأجهزة الكهربائية مثل الحاسوب والتلفاز والهاتف يعمل بالتيار المستمر، فإنّها تكون مزوّدة بدارة إلكترونيّة لتحويل التيار المتردّد إلى تيار مستمر (ستتعرّفها في الدرس اللاحق)، في حين أنّ هناك أجهزة أخرى تعمل بالتيار المتردّد مباشرة، كالغسالة والمدفأة.

✓ **أتحقّق:** أقارن بين التيار المستمر والتيار المتردّد من حيث المقدار والاتّجاه.

ملاحظة:

سوف نستخدم الرمز (i) للإشارة إلى التيار المتردد.

دارات التيار الكهربائيّ المتردّد البسيطة Simple AC Circuits

مقاومة في دارة تيار كهربائيّ متردّد Resistor in an AC Circuit

تتكوّن دارة التيار المتردّد في أبسط أشكالها من مصدر فرق جهد متردّد ومقاومة Resistor (R)، كما في الشكل(29)، وبتطبيق قاعدة كيرشوف الثانية، فإنّ المجموع الجبريّ للتغيرات في الجهد في الدارة المغلقة عند أيّ لحظة زمنيّة يساوي صفرًا، ومنه نتوصّل إلى أنّ فرق الجهد بين طرفي المقاومة (Δv_R) يساوي فرق الجهد للمصدر ويُعبَّر عنه بالعلاقة:

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

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

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

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

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

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

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

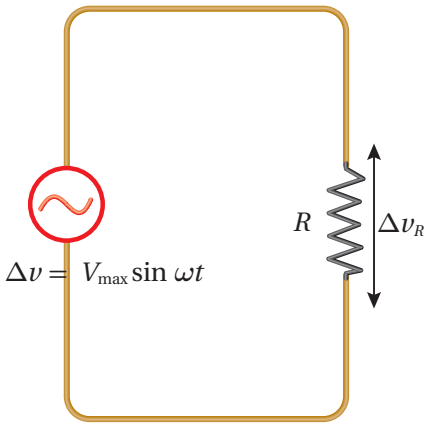
يمكن تمثيل التغيّر في فرق الجهد بين طرفي المقاومة، والتغيّر في التيار المارّ فيها بالنسبة إلى الزمن، كما في الشكل (30).

القدرة المستهلكة في المقاومة Power Dissipated in the Resistor

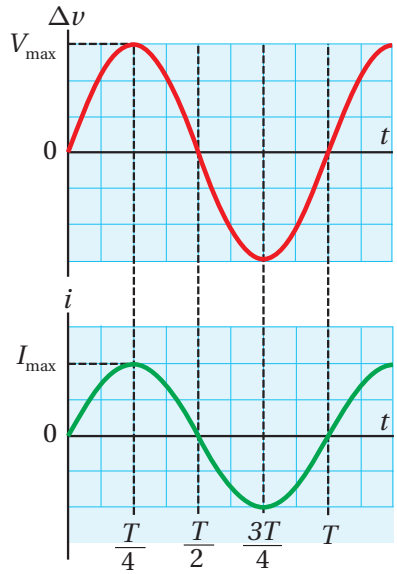
تعلّمت حساب القدرة المستهلكة في مقاومة عند سريان تيار كهربائي مستمر (I) فيها باستخدام العلاقة ($P = I^2 R$). وتُستخدم العلاقة نفسها لحساب القدرة المتوسطة ($\overline{P}$) المستهلَكة في المقاومة عند سريان تيار متردّد فيها، لكنّنا نحتاج إلى قيمة ثابتة للتيار تكافئ (I)؛ هذه القيمة يُرمز إليها بالرمز (I_{rms})،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

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = 0.71\, I_{max}$$

أيْ إنّ القدرة المتوسطة المستهلَكة في مقاومة عند سريان تيار متردّد فيها، هي القدرة المستهلكة نفسها الناتجة من سريان تيار ثابت في المقاومة نفسها



الشكل (29): دارة تيار متردّد تحتوي على مقاومة فقط.



الشكل (30): تغيّر كلّ من فرق الجهد والتيار بالنسبة إلى الزمن في دارة تيار متردّد تحتوي مقاومة فقط.

قيمته ($\frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$). وبذلك فإنّ، القدرة المتوسطة المستهلكة في المقاومة عند سريان تيار متردّد فيها تُحسب بالعلاقة الآتية:

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

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

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = 0.71\ V_{max}$$

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

الربط بالتكنولوجيا

تُستخدَم في السيارات الهجينة التي تعمل بالوقود والكهرباء، وفي السيارات الكهربائيّة، محركاتٌ كهربائيّة تحوّل الطاقة الكهربائيّة إلى طاقة حركيّة لتحريك السيارة. وفي المنحدرات وعند استخدام الكوابح، ينعكس عمل المحرك ليصبح مولّدًا كهربائيًّا يحوّل الطاقة الحركية للسيارة إلى طاقة كهربائيّة تُخزَّن في البطارية.

المثال 11

جهاز كهربائيّ مقاومته (65 Ω)، وُصِل بمصدر فرق جهد متردّد، إذا علمت أنّ القيمة العظمى لفرق الجهد المتردّد بين طرفيه (325 V)، وتردّده (60 Hz)، أُحدّد:

أ . الزمن الدوريّ لفرق الجهد المتردّد.

ب. القيمة العظمى للتيار المتردّد الذي يسري في الجهاز.

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

المُعطيات: $V_{max} = 325\ V, f = 60.0\ Hz, R = 65\ \Omega$

المطلوب: $T=?, I_{max} = ?, i_R = ?$

الحل:

أ .
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60.0} = 0.017\ s$$

ب.
$$I_{max} = \frac{V_{max}}{R} = \frac{325}{65} = 5\ A$$

جـ.
$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 120\pi\ rad/s$$
$$i_R = I_{max} \sin \omega t = 5 \sin 120\ \pi t$$

أفكّر: كيف يمكن حساب القدرة الكهربائيّة التي تستهلكها مقاومة كهربائيّة عندما تعمل بتيار متردّد، ومقارنتها بقدرتها في حالة عملها بالتيار المستمر؟

الربط بالحياة

تزوّد شركات الكهرباء في الأردن المنازل والمباني بالطاقة الكهربائية على شكل تيار متردّد، لذلك نحصل من المقابس الجداريّة على فرق جهد متردّد، تردّده (50 Hz)، وقيمته العظمى $V_{max} = 324\ V$.

المثال 12

القيمة العظمى لمصدر فرق الجهد المتردّد في دارة كهربائيّة (56 V)، والقيمة العظمى للتيار المتردّد (2.8 A). أحسب القيمتين الفعّالتين (V_{rms} و I_{rms}) للجهد والتيار في الدارة، وما المقدار المتوقّع لمقاومة الدارة؟

المُعطيات: $I_{max} = 2.8\ A\ ,\ V_{max} = 56\ V$

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

الحل:

$$V_{rms} = 0.71\ V_{max} = 0.71 \times 56 = 40\ V$$

$$I_{rms} = 0.71\ I_{max} = 0.71 \times 2.8 = 2\ A$$

$$R = \frac{V_{max}}{I_{max}} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} = \frac{40}{2} = 20\ \Omega$$

✓ **أتحقّق:** ما القيمة الفعّالة لفرق الجهد التي نحصل عليها من المقابس الجدارية في الأردن، علمًا أن القيمة العظمى لفرق الجهد 324 V؟

المثال 13

مدفأة كهربائيّة مقاومتها (40 Ω) تعمل على فرق جهد متردّد بوحدة الفولت مُعبَّر عنه بالعلاقة: $\Delta v = 310 \sin \omega t$، حيث ($t$) بوحدة الثانية، أحسب:

أ . مقدار القيمة الفعّالة للتيار الذي يسري في المدفأة.

ب. القدرة الكهربائية المتوسطة المستهلكة في مقاومة المدفأة.

المُعطيات: $R = 40\ \Omega,\ \Delta v = 310 \sin \omega t$

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

الحل:

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

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

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{R} = \frac{310}{40} = 7.75\ A$$

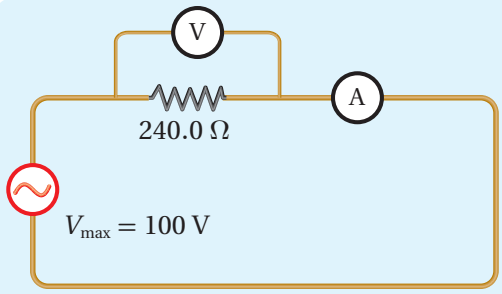
$$I_{rms} = 0.71\ I_{max} = 0.71 \times 7.75 \approx 5.5\ A$$

ب.

$$\overline{P} = I_{rms}^2\ R = 5.5^2 \times 40 = 1210\ W$$

تمرين

يبيّن الشكل (31) دارة كهربائية تتكوّن من مقاومة مقدارها (240.0 Ω)، وصلت بمصدر فرق جهد متردّد، حيث القيمة العظمى لفرق الجهد بين طرفيه (100 V). اُستخدم أميتر وفولتميتر لقياس التيار وفرق الجهد بين طرفي المقاومة. أحسب قراءة كلّ من الأميتر والفولتميتر.



الشكل (31): مقاومة في دارة تيار كهربائي متردّد.

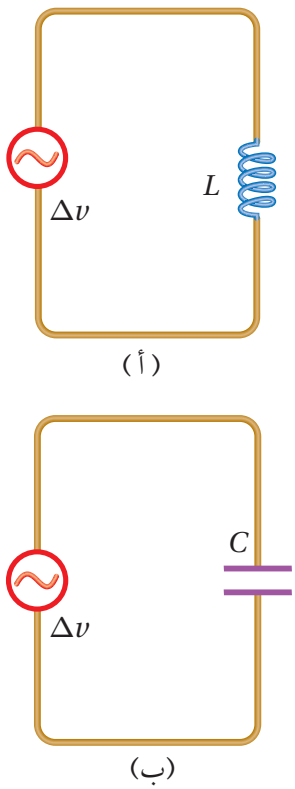
المعاوقة Reactance

يبيّن الشكل (32) شكلين آخرين لدارات التيار الكهربائي المتردّد؛ إذ يبين الشكل (32/ أ) دارة تيار متردّد تحتوي على محثّ مصنوع من سلك عديم المقاومة محاثّته (L)، والشكل (32/ ب) يبين دارة تيار متردّد تحتوي على مواسع Capacitor مواسعته (C).

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

عند دراسة تغيّرات فرق الجهد والتيار في الدارتين الموضَّحتين في الشكل (32)، ومقارنتها بتغيرات فرق الجهد والتيار في الدارة المبيَّنة في الشكل (29)، نتوصل إلى أنّ:

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



الشكل (32): دارات التيار المتردّد
(أ) دارة محثّ ومصدر فرق جهد متردّد.
(ب) دارة مواسع ومصدر فرق جهد متردّد.

أُفكّر: أقارن المجال المغناطيسي الذي يولّده مرور تيار متردّد في محثّ بالمجال الذي يولّده مرور تيار مستمر فيه من حيث الاتجاه.

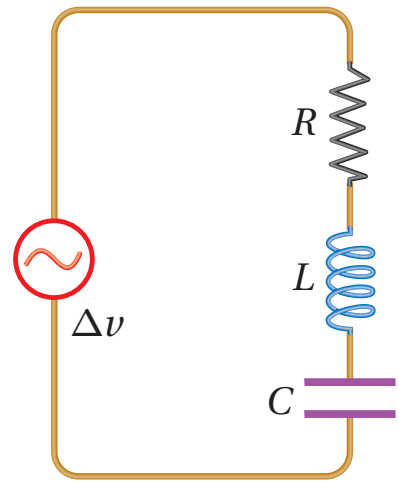
الجدول (1): عناصر دارات التيار المتردد.

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

أفكّر: ما مقدار معاوقة كلٍّ من المحث والمواسع عندما يكون التردد الزاوي لمصدر فرق الجهد صغيرًا جدًّا، وعندما يكون تردّده كبيرًا جدًّا؟

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

أتحقّق: ما العوامل التي تعتمد عليها المعاوقة المحثّية للمحثّ؟



الشكل (33): دارة تيار متردّد تحتوي على مواسع ومقاومة ومحثّ موصولة على التوالي.

مقاومة ومحثّ ومواسع (RLC) على التوالي في دارة تيار كهربائي متردّد
The *RLC* Series AC Circuit

هذه الدارة تحتوي على العناصر الثلاثة التي تمت دراستها أعلاه، وهي مقاومة (R) ومحثّ (L) ومواسع (C) موصولة جميعها على التوالي بمصدر فرق جهد متردّد، كما في الشكل (33).

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

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

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

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

وبتعويض المعاوقة الكلية (Z) نتوصّل إلى أنّ:

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

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

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

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

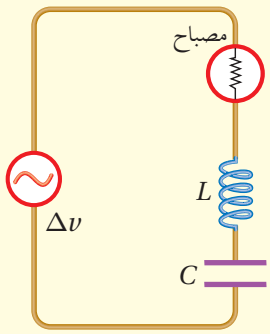
بتعويض معاوقة المحث ومعاوقة المواسع نتوصّل إلى أنّ:

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

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

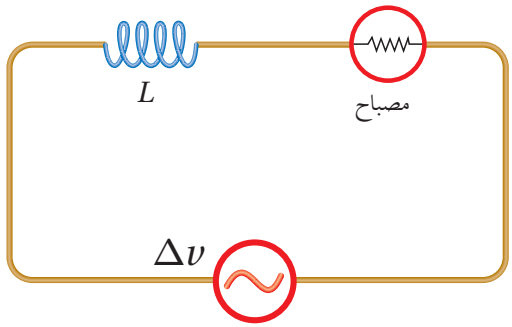
يشير الرمز (ω_0) إلى **تردّد الرنين Resonance frequency**، وهو تردّد مصدر فرق الجهد في دارة (RLC)، الذي يحدث عنده الرنين، وتكون قيمة التيار الفعّال عنده أكبر ما يمكن. ويتحدّد مقدار تردّد الرنين للمصدر بناءً على التردّد الطبيعي للدارة الذي يعتمد على قيمة كلٍّ من مواسعة المواسع ومحاثّة المحثّ (L,C).

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



المثال 14

يبيّن الشكل (34) دارة يتصل فيها محثّ ومصباح بمصدر فرق جهد متردّد، ماذا يحدث لإضاءة المصباح عند نقصان تردّد المصدر مع بقاء القيمة العظمى لفرق الجهد ثابتة.



الشكل (34): مصباح ومحث في دارة تيار متردّد.

المُعطيات: (V_{max}) ثابتة، (ω) قلّت .

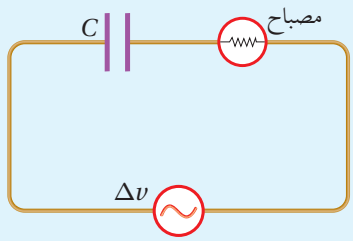
المطلوب: كيف تتغيّر إضاءة المصباح؟

الحل:

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

تمرين

يبيّن الشكل (35) دارة يتصل فيها مواسع ومصباح بمصدر فرق جهد متردّد. ماذا يحدث لإضاءة المصباح عند نقصان تردّد المصدر مع بقاء القيمة العظمى لفرق الجهد ثابتة؟ أفسّر إجابتي.



الشكل (35): مواسع ومصباح في دارة تيار متردّد.

المثال 15

دارة (AC) تحتوي على مصدر فرق جهد متردّد قيمته الفعّالة (150 V) وتردّده (60 Hz)، يتّصل على التوالي بمقاومة (420 Ω) ومحثّ محاثّته (1.8 H)، ومواسع مواسعته (7 μF). أجد كلًّا من:

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

ب. القيمة الفعّالة للتيار المتردّد.

المُعطيات:

$C = 7 \times 10^{-6}\ \text{F},\ V_{\text{rms}} = 150\ \text{V},\ f = 60\ \text{Hz},\ R = 420\ \Omega,\ L = 1.8\ \text{H}$

المطلوب:

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

الحل:

أ .

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377\ \text{rad/s}$$

$$X_L = \omega L = 377 \times 1.8 = 679\ \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{377 \times 7 \times 10^{-6}} = 379\ \Omega$$

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

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

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

ب . القيمة الفعّالة للتيار المتردّد:

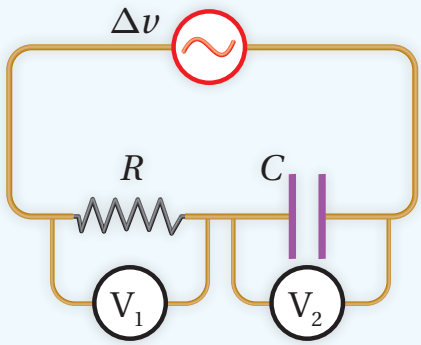
$$V_{\text{rms}} = I_{\text{rms}}\, Z$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{150}{516} = 0.29\ \text{A}$$

التجربة 1

استنتاج العلاقة بين تردد مصدر فرق الجهد والمعاوقة المواسعيّة

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



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

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي؛ أنفّذ الخطوات الآتية:

1. أصل الدارة كما في الشكل المجاور، على أن تتصل المقاومة والمواسع ومصدر الطاقة جميعها على التوالي، وأصِل فولتميتر بين طرفي المقاومة وآخر بين طرفي المواسع.
2. أضبط مخرج مصدر الطاقة المتردّد على قيمة منخفضة، ولتكنْ بين (1.0 V–5.0 V).
3. **أضبط المتغيّرات:** أضبط مصدر الطاقة على تردّد (400 Hz)، ثمّ أقيس فرق الجهد بين طرفي المقاومة باستخدام الفولتميتر (V_1)، وفرق الجهد بين طرفي المواسع باستخدام الفولتميتر (V_2)، وأدوّن القراءات في الجدول.
4. أرفع تردّد مصدر الطاقة إلى القيم (600, 800, 1000, 1200, 1400 Hz)، وفي كل مرّة أكرّر الخطوة السابقة، وأدوّن النتائج في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1. **أحسب** القيمة الفعّالة للتيار المتردّد (I_{rms}) الذي يسري في الدارة عند كل محاولة بقسمة فرق الجهد بين طرفي المقاومة (Δv_R) على مقدار المقاومة (R)، وأدوّن النتائج في جدول البيانات.
2. أحدّد عمليًّا المعاوقة المواسعيّة للمواسع (X_C) بقسمة فرق الجهد بين طرفيه على التيار، وأدوّن النتائج في جدول البيانات.
3. **أرسم بيانيًّا** العلاقة بين مقلوب التردّد الزاويّ على محور (x) والمعاوقة المواسعيّة على محور (y)، ثمّ أجد ميل المنحنى، وأستخرج مواسعة المواسع من الميل، ثمّ أقارن النتيجة بالقيمة المكتوبة على المواسع.
4. **أحسب** المعاوقة المواسعيّة بمعرفة التردّد الزاوي لمصدر فرق الجهد ومواسعة المواسع بحسب العلاقة ($X_C = \frac{1}{\omega C}$).
5. **أقارن** بين القيمتين النظريّة والعمليّة للمعاوقة المواسعيّة، وأفسّر الاختلاف إن وجد.

تطبيقات تكنولوجيّة

جهاز كشف الفلزّات

تُستخدم في المطارات بوابات للكشف عن الفلزّات، عندما يمرّ المسافر خلالها فإنّها تُصدر إشارة إذا كان المسافر يخفي أداة فلزّيّة. ويحتوي إطار الباب المبيَّن في الشكل (36) على ملفٍّ من سلكٍ نحاسيّ يمثّل محثًّا في دارة (*RLC*)، وتكون الدارة متّصلة بمصدر فرق جهدٍ متردّد، قد ضُبط تردُّده لإحداث حالة الرنين، وعند اقتراب جسم فلزّي من المحثّ، فإنّه يؤدّي إلى زيادة في محاثّته، فينعدم الرنين في الدارة، وينخفض التيار الفعّال فيها عن أكبر قيمة له، ثم تحوِّل دارة إلكترونيّة ذلك التغيير في التيار إلى إشارة تحذيريّة مسموعة وأخرى مرئيّة.

الشكل (36): بوابة أمنية لكشف الفلزات في الجسم.

أجهزة المذياع والاتصال اللاسلكي

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

وبالطريقة نفسها تعمل أجهزة الاتصال اللاسلكيّة التي تتكوّن من دارتَي إرسال واستقبال، على نحو ما هو مبيَّن في الشكل (37)، تُستخدم في مجالات كثيرة، مثل التواصل بين دوريات السير، واتصال الطائرات والسفن بالمراكز الأرضيّة، وغير ذلك الكثير من الاستخدامات.

الشكل (37): أجهزة الاتصال اللاسلكي، كلّ جهاز يحتوي دارة إرسال ودارة استقبال.

المثال 16

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

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

المطلوب: $C = ?$

الحل:

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

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

$$C = \frac{1}{1.4 \times 10^{-3} \times 3.8 \times 10^{17}} = 1.88 \times 10^{-15}\ \text{F}$$

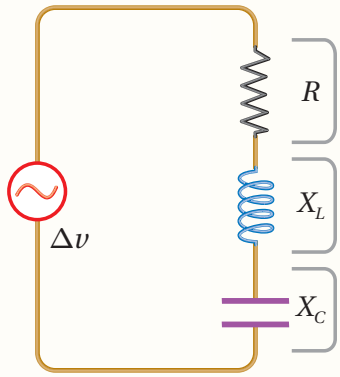
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضح المقصود بكلٍّ من: المعاوقة المحثّية والمعاوقة المواسعية، وأبيّن العوامل التي تؤثر في كلٍّ منهما.

2. أوضّح المقصود بالقيمة العظمى والقيمة الفعّالة لفرق الجهد المتردّد.

3. **تفكير ناقد:** أوضّح لماذا ينعدم التيار المتردّد في دارة (AC) تحتوي على مواسع فقط عند التردّدات المنخفضة جدًّا. وأوضّح لماذا ينعدم التيار في دارة (AC) تحتوي على محثّ فقط عند التردّدات العالية جدًّا.

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



5. **أستخدم المتغيّرات:** ما القيمة العظمى للتيار المتردّد في دارة (AC) تحتوي على مواسع مواسعته (5 μF)، ومصدر فرق جهد قيمته العظمى (111 V) وتردّده (86 Hz)؟

6. **أحسب:** عند أيّ تردّد زاويّ تتساوى المعاوقة المحثّية لمحثّ (57 μH) مع المعاوقة المواسعيّة لمواسع (57 μF) في دارة تيار متردّد؟ وماذا يُسمّى هذا التردّد؟

7. **أستخدم المتغيّرات:** دارة (RLC) تتكوّن من مقاومة (80 Ω) ومواسع (5 μF)، ومحث، موصولة على التوالي بمصدر فرق جهد متردّد، جهده الفعّال (12 V)، وتردّده الزاويّ (2000 rad/s). أجد محاثّة المحثّ التي تجعل للتيار الفعّال أكبر قيمة، ثمّ أجد أكبر قيمة للتيار الفعّال.

الدرس 3

أشباه الموصلات
Semiconductors

الفكرة الرئيسة:

نتج من تطور علم أشباه الموصِلات تصميم أدوات جديدة أسهمت في إحداث قفزة نوعية في عالم الاتصالات والمعلومات.

نتاجات التعلّم:

- أصنّف الموادّ إلى موادّ موصِلة وعازلة وشبه موصِلة.
- أشرح تركيب الثنائي البلوري.
- أمثّل العلاقة بين الجهد والتيار في الثنائي البلوري.
- أصمّم تجربة أستخدم فيها الثنائي البلّوري بوصفه مقوّمًا للتيار المتردّد.
- أشرح تركيب الترانزستور.
- أستقصي استخدامات الترانزستور، مثل تضخيم التيار والجهد والمفتاح الكهربائي والبوابات المنطقية.

المفاهيم والمصطلحات:

إلكترونات التكافؤ Valance Electrons

موادّ عازلة للكهرباء Insulators

موادّ موصِلة Conductors

موادّ شبه موصِلة Semiconductors

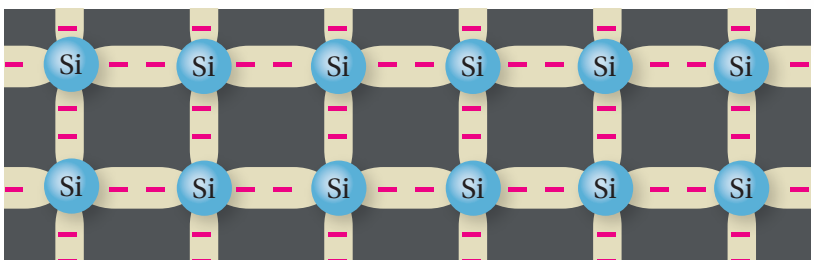
الإشابة Doping

الموادّ الموصِلة والعازلة وشبه الموصِلة
Conductors, Insulators and Semiconductors

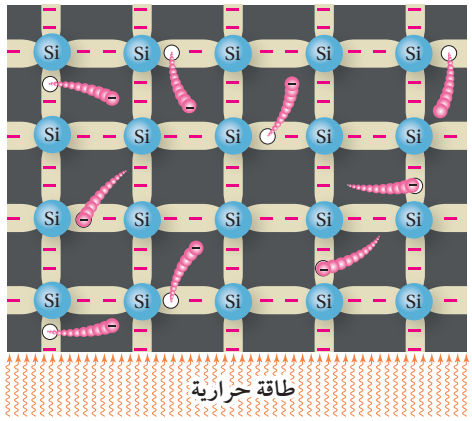
تعلّمتُ سابقاً أنّ الذرّات هي وحدات البناء الأساسية للموادّ، وتتكوّن الذرّة من نواة موجبة الشحنة تتحرك حولها إلكترونات سالبة تتوزّع في مستويات (أغلفة) طاقة. وتُسمّى الإلكترونات الموجودة في آخر مستوى طاقة **بإلكترونات التكافؤ Valance electrons**، تُحدّد كثيرًا من خصائص المادّة، مثل التوصيل الكهربائي والتوصيل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

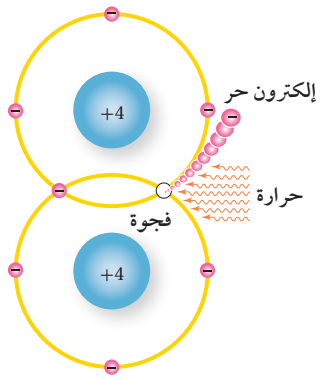
1. **موادّ عازلة Insulators:** عدد إلكترونات التكافؤ لها أكثر من أربعة، وترتبط بذرات المادّة بقوى كهربائية كبيرة، لذلك، لديها عدد قليل من الإلكترونات الحرّة ما يجعلها مادّة عازلة للكهرباء. وعادة توجد على شكل مركّبات، مثل المطاط والمايكا والزجاج.
2. **موادّ موصِلة Conductors:** عدد إلكترونات التكافؤ لها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

لكلّ ذرّة من ذرات السليكون أو الجرمانيوم أربعة إلكترونات تكافؤ. فمثلاً، ترتبط كل ذرة من ذرات السليكون بأربع ذرّات مجاورة لها بروابط تساهمية، وتشكّل بذلك بلّورة السليكون، وعند درجة حرارة الصفر المطلق (0 K) تكون جميع إلكترونات التكافؤ للسليكون النقي مقيدة نتيجة للروابط التساهمية، ولا يوجد إلكترونات حرّة كما في الشكل (38).



الشكل (38): رسم تخطيطي لبلورة السليكون عند درجة حرارة الصفر المطلق.

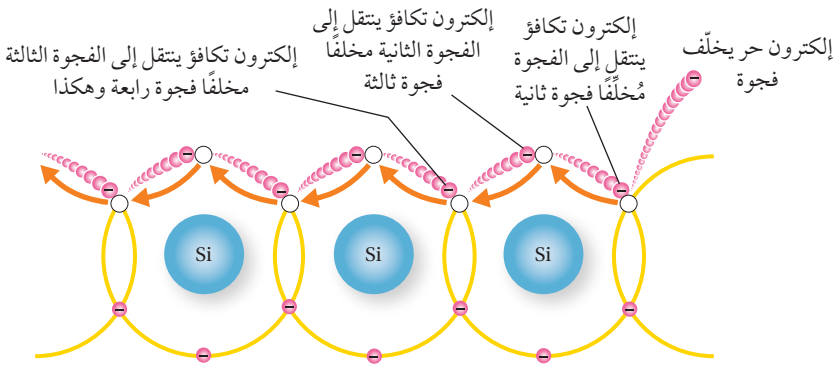




الشكل (39): الإلكترونات الحرة والفجوات في بلورة السليكون.

أمّا عند درجة حرارة الغرفة ($20^\circ C$) مثلًا، تمتصّ بعض الإلكترونات طاقة حرارية تؤدي إلى كسر الروابط التساهمية، وتحرير إلكترونات تُسمّى **إلكترونات التوصيل** Conduction electrons. عندما يغادر الإلكترون الرابطة التساهمية يصبح إلكترونًا حرًّا، ويترك خلفه فراغًا يُطلق عليه اسم **فجوة Hole**، أتأمّل الشكل (39). تبدو الفجوة وكأنّها شحنة موجبة نتيجة للنقص في الشحنة السالبة الكليّة على الذرة عند ترك الإلكترون موقعَه. وبذلك يكون عدد الفجوات يساوي عدد إلكترونات التوصيل في بلورة السليكون النقيّة، وهو ما يُسمّى **زوج إلكترون–فجوة** Electron–Hole pair.

تسهم الفجوات في التوصيل الكهربائي مثل إلكترونات التوصيل، فحين تتكوّن فجوة نتيجة لإفلات إلكترون عند كسر رابطة تساهمية يصبح من السهل لإلكترون ذرة مجاورة الانتقال إلى تلك الفجوة تاركًا خلفه فجوةً جديدةً، ينتقل إليها إلكترون من ذرة أخرى مجاورة وهكذا دواليك. فتبدو الفجوات كشحنات موجبة تتحرك بعكس اتجاه حركة الإلكترونات. وعليه، يمكن افتراض أنّ الفجوات تيار كهربائي يسري بعكس اتجاه حركة الإلكترونات كما في الشكل (40).



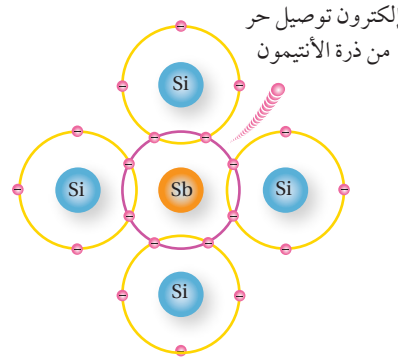
الشكل (40): التيار الناتج من الفجوات.

أشباه الموصلات من النوع n والنوع p

n–type and p–type Semiconductors

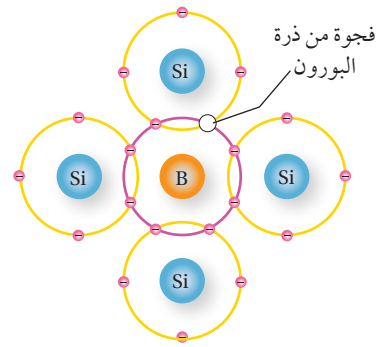
أشباه الموصِلات النقيّة لا توصل التيار الكهربائي جيدًا، لكن يمكن زيادة موصليتها الكهربائية بإضافة بعض الموادّ إليها تُسمّى **شوائب** Impurities، ويُطلق على تلك العمليّة اسم **الإشابة Doping**، حيث تُضاف مادّة إلى بلّورة السليكون النقيّ تزيد من عدد الإلكترونات الحرّة؛ فينتج من ذلك ما يُسمّى **بالبلورة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

لزيادة عدد الإلكترونات الحرّة في بلّورة السليكون النقيّ، يُضاف إليها عنصر خماسيُّ التكافؤ (يملك خمسة إلكترونات تكافؤ في غلافه الأخير) مثل، الأنتيمون أو الفسفور أو الزرنيخ. وفي هذه الحالة تحلّ ذرّة أنتيمون (Sb) محلّ ذرّة سليكون مركزية، وتكوّن أربع روابط تساهمية مع أربع ذرات سليكون مجاورة لها، ويبقى إلكترون التكافؤ الخامس حرًّا على نحو ما يظهر في الشكل (41). ونتيجة لذلك يزداد عدد إلكترونات التوصيل في بلورة السليكون النقيّ، ويصبح أكثر من عدد الفجوات. وتُسمّى البلّورة في هذه الحالة بلّورةً سالبةً أو بلّورة من النوع (n).



الشكل (41): إضافة عنصر خماسي التكافؤ مثل ذرة أنتيمون (Sb) إلى بلورة السليكون. يصبح الإلكترون الزائد إلكترونًا حرًّا.

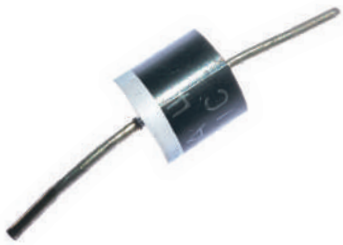
أمّا لزيادة عدد الفجوات في بلورة السليكون، فيُضاف عنصر ثلاثي التكافؤ (يمتلك ثلاثة إلكترونات تكافؤ في غلافه الأخير) كالغاليوم أو البورون. وفي هذه الحالة تحلّ ذرة البورون محل ذرة سليكون مركزية؛ فترتبط بأربع ذرات سليكون مجاورة لها، وتشارك إلكتروناتها الثلاثة لتكوين ثلاث روابط تساهمية مع ثلاث ذرات سليكون، أمّا الرابطة الرابعة فينقصها إلكترون واحد، فتتشكّل فجوة كما في الشكل (42). ما يعني أنّ كلّ ذرة بورون تضاف إلى بلّورة السليكون تُنتج فجوة جديدة؛ فيزداد بذلك عدد الفجوات في بلّورة السليكون، ويصبح عددها أكبر من عدد إلكترونات التوصيل. وتُسمّى البلّورة في هذه الحالة بلّورةً موجبةً، أو بلّورة من النوع (p).



الشكل (42): إضافة ذرة بورون (B) إلى بلّورة السليكون وتكوين فجوة.

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

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



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

(أ) رمز الثنائي.

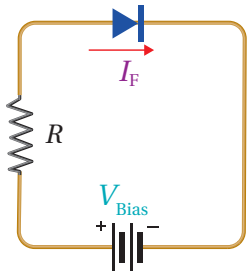
الشكل (43): الثنائي ورمزه في الدارات الكهربائية.

الثنائي البلّوري Diode

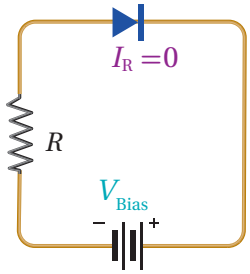
يُسمّى التركيب الناتج من تلامس البلورتين السالبة (n) والموجبة (p) بالثنائي Diode. ويُرمز إليه في الدارات الكهربائية بالرمز الموضّح في الشكل (43/ أ). حيث يُسمّى طرف الثنائي من النوع (n) المهبط Cathode (K)، وطرفه من النوع (p) المصعد Anode (A). ويُظهر الشكل (43/ ب) شكل الثنائي الأكثر استخدامًا في الدارات الكهربائية.

يُسمّى توصيل الثنائي بمصدر فرق جهد ثابت انحيازًا. وللانحياز حالتان؛ الأولى: انحياز أمامي Forward bias، حيث يوصل الثنائي بمصدر فرق جهد (بطارية مثلًا)، على أن يوصل القطب الموجب للبطارية بمصعد الثنائي، ويوصل القطب السالب للبطارية بمهبط الثنائي كما في الشكل (44/ أ) فينشأ تيار كهربائي (I_F) عندما يكون فرق جهد المصدر (V_{Bias}) أكبر من فرق جهد معين يُسمّى حاجز الجهد للثنائي، تعتمد قيمته على مادّة البلورة؛ فعند درجة حرارة 25°C، يكون (0.7 V) في بلورة السليكون، في حين يساوي (0.3 V) في بلورة الجرمانيوم. إنّ سريان تيار كهربائي كبير في الثنائي يؤدي إلى تلفه، لذلك يجب توصيل الثنائي بمقاومة لخفض قيمة التيار.

والحالة الثانية لتوصيل الثنائي هي الانحياز العكسي Reverse bias، وهنا يوصل القطب الموجب للبطارية بمهبط الثنائي، ويوصل قطبها السالب بمصعد الثنائي كما في الشكل (44/ ب)، وتصبح مقاومة الثنائي كبيرة جدًّا، ما يؤدي إلى عبور تيار كهربائي صغير جدًا (ميكرو أمبير) يمكن اعتباره صفرًا ($I_R = 0$). وإذا زاد فرق جهد المصدر على قيمة معينة، تُسمّى جهد الانهيار (V_{BR}) Breakdown voltage، فإنّ مقاومة الثنائي تنهار، ويسري فيه تيار كبير يؤدّي إلى تلف الثنائي البلوري.



أ) انحياز أمامي



ب) انحياز عكسي

الشكل (44): وصلتا الثنائي، الانحياز الأمامي والعكسي.

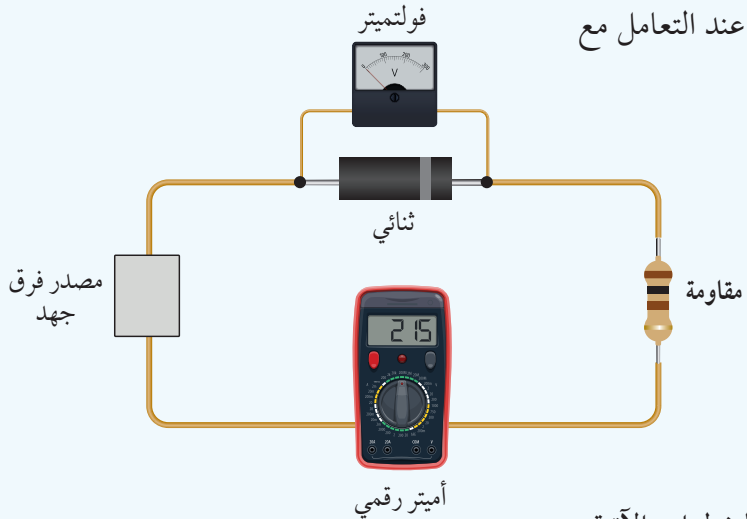
أفكّر: إنّ حاجز الجهد للثنائي المصنوع من السليكون أكبر منه للثنائي المصنوع من الجرمانيوم. أناقش أفراد مجموعتي في ذلك اعتمادًا على التركيب الذرّي لكلٍّ منهما. حيث تحتوي ذرة الجرمانيوم المتعادلة على عدد أكبر من الإلكترونات.

التجربة 2

دراسة فرق الجهد والتيار الكهربائي في الثنائي البلّوري

المـوادّ والأدوات: ثنائـي بلّـوري (Diode 1N4004) أو مـا يكافئـه، مصـدر فـرق جهـد مسـتمر (0 – 15 V)، فولتميتـر، أميتـر رقمـي، مقاومـة (10 kΩ)، أسـلاك توصيـل.

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



خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أنفّذ الخطوات الآتية:

1 . أُركّب الدارة كما في الشكل. ألاحظ أنّ مهبط الثنائي متصل بالقطب السالب لمصدر فرق الجهد.

2 . **ألاحظ:** أبدأ من فرق جهد يساوي صفرًا، ثم أرفع فرق الجهد تدريجيًّا بزيادة 0.1 V في كلّ مرّة حتى أصل إلى فرق جهد 2 V.

3 . أدوّن 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 أمبير.

7 . أرفع فرق جهد المصدر من (0) إلى 10 V بزيادة 1 V في كلّ مرّة، وأدوّن قراءة الفولتميتر والميكرو أميتر في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1 . **أتوقّع:** في أيّ الحالتين كان توصيل الثنائي في وضعية الانحياز الأمامي؟ وفي أيّهما كان في وضعيّة الانحياز العكسي؟

2 . **أمثّل بيانيًّا** العلاقة بين التيار الكهربائي وفرق الجهد على أن يكون التيار الكهربائي على المحور y، وفرق الجهد على المحور x باستخدام برمجية (Excel)، أو على ورق رسم بياني.

3 . أحدّد قيمة حاجز فرق الجهد من منحنى (I–V).

4 . **أحلّل:** أختار من منحنى (I–V) نقطة جهدها أكبر من حاجز الجهد (0.75 V) وأرسم مماسًّا لها، ثمّ أحسب ميل المماس. ماذا يمثّل ميل المماس؟ وما مقدار مقاومة الثنائي في هذه الحالة؟

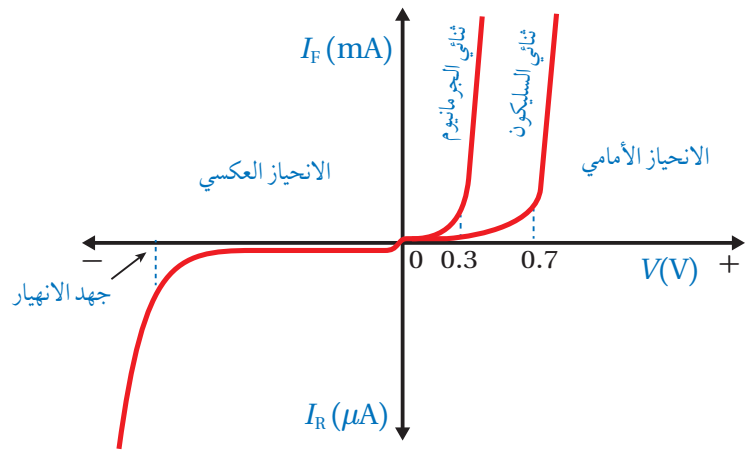
5 . **أحلّل:** أحسب مقدار مقاومة الثنائي في وضعية الانحياز العكسي باستخدام فرق الجهد والتيار المقيس في الخطوة (7).

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

7 . **أتوقّعُ** مصادر الخطأ المُحتمَلة في التجربة.

يوضّح الشكل (45) التمثيل البياني لعلاقة التيار الكهربائي بفرق الجهد على طرفي ثنائي السليكون (Si) في منحنى $(I-V)$، وهو مشابه لما حصلتُ عليه في التجربة السابقة. ألاحظ أنّ التيار يكون صغيرًا عندما يكون فرق الجهد على طرفي الثنائي أقلّ من حاجز الجهد، وهو (0.7 V) للثنائي المصنوع من السليكون، أو أقل من حاجز الجهد (0.3 V) للثنائي المصنوع من الجرمانيوم. وبزيادة فرق جهد المصدر إلى قيمة أعلى من حاجز الجهد، فإنّ زيادة قليلة في فرق الجهد تؤدّي إلى زيادة كبيرة في التيار الكهربائي، ما يعني أنّ مقاومة الثنائي في وضعية الانحياز الأمامي صغيرة جدًّا. في حين أنّه في وضعيّة الانحياز العكسي، يكون التيار الكهربائي صغيرًا جدًّا (بالميكرو أمبير)، ما يعني أنّ مقاومة الثنائي كبيرة جدًّا.

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

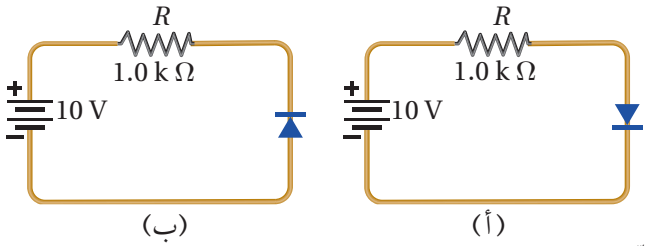


الشكل (45): منحنى $(I-V)$ لثنائيين بلوريين؛ أحدهما سليكون والثاني جرمانيوم.

هل تُعدّ مقاومة الثنائي مقاومة أومية؟ ولماذا؟

المثال 17

اعتمادًا على الدارة في الشكل (46)، علمًا أن الثنائي مصنوع من مادة السليكون، والمقاومة الداخلية لمصدر فرق الجهد مهملة، أجد لكلٍّ من الشكلين (46/ أ) و (46/ ب) ، فرق الجهد على طرفي الثنائي، وفرق الجهد على طرفي المقاومة ΔV_R، والتيار الكهربائي المارّ في المقاومة.



الشكل (46): مثال (17)

المُعطيات: الشكل (46).

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

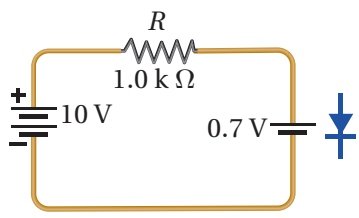
الحلّ:

الشكل (46/ أ). نظرًا إلى أنّ مهبط الثنائي متّصل بالقطب السالب للبطارية، وجهد البطارية أكبر من حاجز الجهد للثنائي، فإنّ الثنائي في حالة انحياز أمامي، ويكون فرق الجهد على طرفيه ($\Delta V_D = 0.7\ \text{V}$) كما في الشكل (47)؛ لأنّ الثنائي مصنوع من السليكون.

باستخدام قاعدة كيرتشوف الثانية أجد أنّ

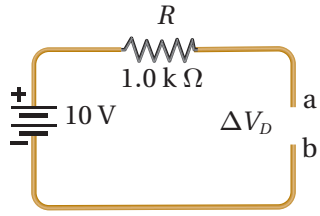
$$\Delta V_R = 10 - 0.7 = 9.3\ \text{V}$$

$$I = \frac{10 - 0.7}{R} = \frac{9.3}{1.0 \times 10^3} = 9.3\ \text{mA}$$



الشكل (47): تمثيل الثنائي في حالة الانحياز الأمامي.

الشكل (46/ ب)، ونظرًا إلى أنّ مصعد الثنائي متصل بالقطب السالب للبطارية، فإنّ الثنائي في حالة انحياز عكسي، ويعمل عمل مفتاح مفتوح (وكأنّه مقاومة لانهائيّة)؛ كونه لا يمرّر تيارًا كهربائيًّا، وأمثّل الدارة كما في الشكل (48).



الشكل (48): تمثيل الثنائي في حالة الانحياز العكسي.

$$\Delta V_D = V_a - V_b = 10\ \text{V}$$

$$\Delta V_R = 0$$

$$I = 0$$

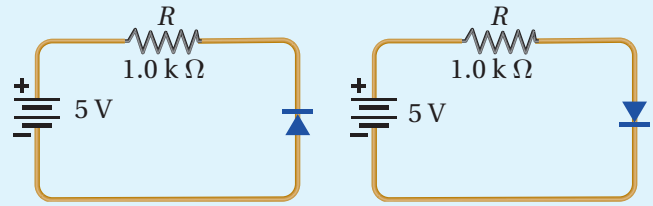
تمرين

اعتمادًا على الدارة الموضّحة في الشكل (49) حيث إنّ الثنائي مصنوع من مادة الجرمانيوم، وبإهمال المقاومة الداخلية للبطارية، أجد ما يأتي لكلٍّ من الشكلين (أ) و (ب) :

1 . فرق الجهد على طرفي الثنائي .

2 . فرق الجهد على طرفي المقاومة.

3 . التيار المارّ في المقاومة.

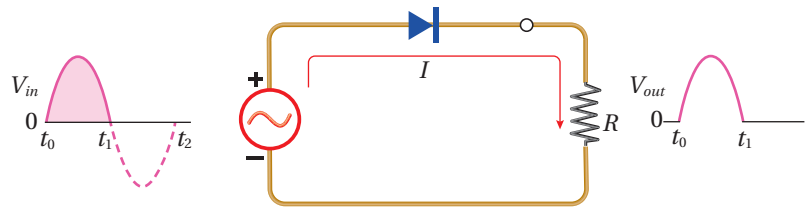


الشكل (49)

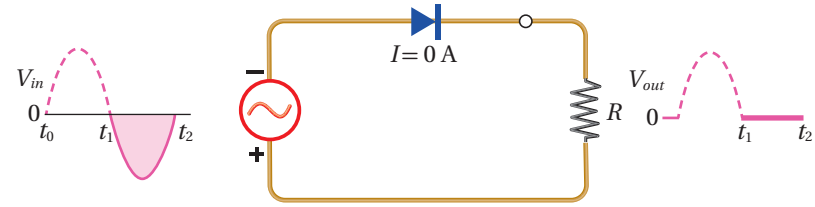
الثنائي بوصفه مقوّمًا للتيار المتردّد Diode as a Current Rectifier

تعلّمت سابقاً، أنّ المقابس في المنازل تزوّدنا بتيار متردّد، وبعض الأجهزة الكهربائية تعمل على تيار مستمر. فكيف أحوّل التيار المتردّد إلى تيار مستمر؟ عند توصيل الثنائي بمصدر تيار متردّد كما في الشكل (50)، فإنّه يسمح لنصف الموجة التي تمثل جهدًا موجبًا بالعبور؛ لأنّ وصلة الثنائي تكون في حالة الانحياز الأمامي كما في الشكل (50/ أ). أمّا النصف الثاني من الموجة، فيمثّل جهدًا سالبًا وتكون وصلة الثنائي في حالة انحياز عكسي، والثنائي لا يسمح للنصف السالب من الموجة بالعبور كما في الشكل (50/ ب). لذلك تكون الإشارة الناتجة على شكل موجة نصف جيبيّة باتجاه واحد (موجبة فقط) كما في الشكل (50/ جـ)، وتُسمّى الدارة في الشكل (50) دارة تقويم نصف موجة Half wave rectifier. وفي هذه الحالة يكون تردّد الموجة الناتجة مساويًا لتردّد الموجة الداخلة.

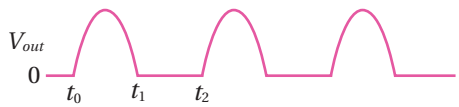
أصمّم باستعمال برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يوضح كيفية استخدام الثنائي البلوري مقوّمًا للتيار المتردّد. ثم أشارك فيه زملائي/ زميلاتي في الصف.



أ) خلال الجزء الموجب من الإشارة المدخلة، يكون الثنائي في حالة انحياز أمامي ويمرّر الموجة كما هي.



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



جـ) الشكل النهائي للإشارة الناتجة.

الشكل (50): الثنائي البلوري بوصفه مقوّم نصف موجة.

المثال 18

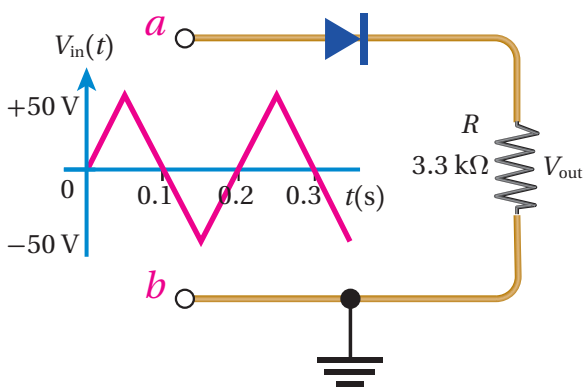
يمثّل الشكل (51) دارة مقوِّم نصف موجة، إذا كانت الموجة الكهربائية الداخلة مثلثّة الشكل كما في الشكل، بإهمال فرق الجهد على الثنائي أجيب عمّا يأتي:

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

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

المُعطيات: الشكل (51).

المطلوب: شكل الموجة الخارجة.



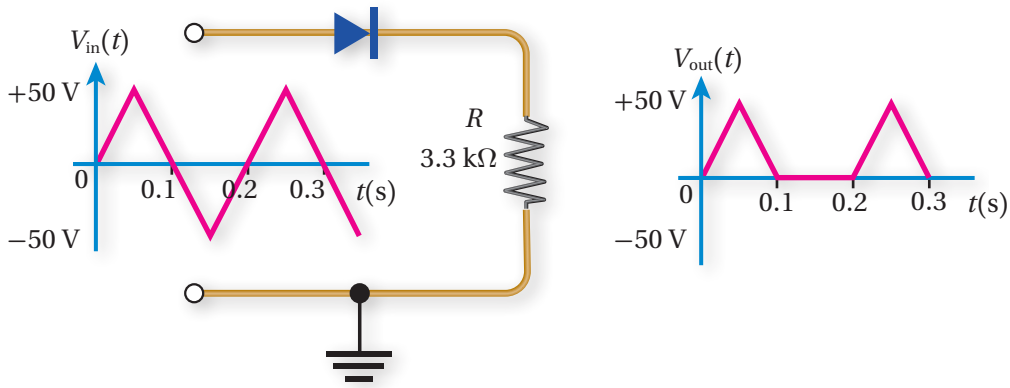
الشكل (51): دارة مقوِّم نصف موجة.

الحلّ:

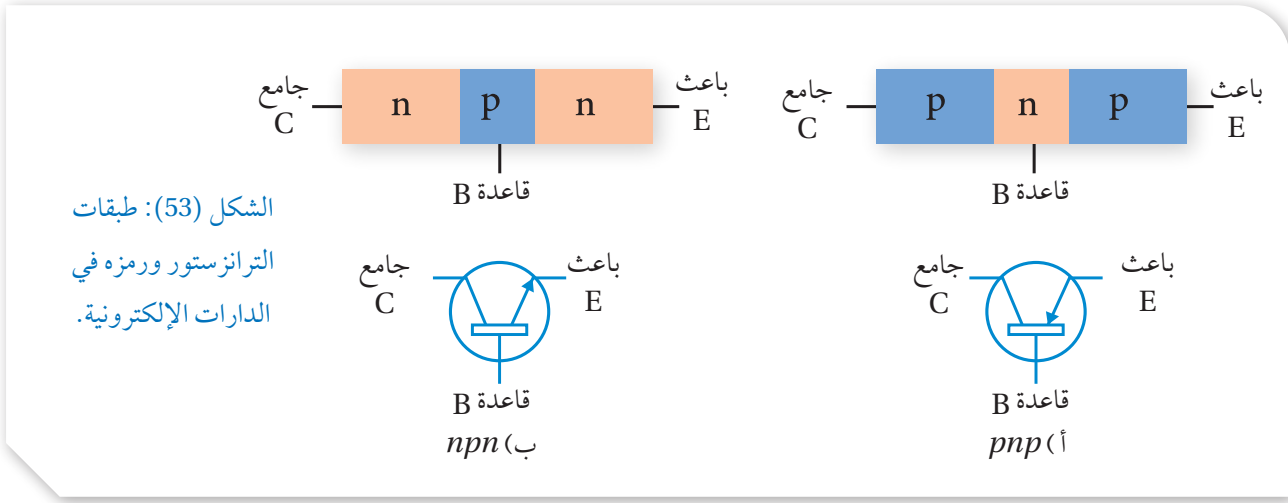
أ . في الفترة الزمنيّة (0−0.1 s) والفترة (0.2−0.3 s) يكون جهد النقطة (a) أكبر من جهد النقطة (b)، أيْ إنّ جهد مصعد الثنائي أكبر من جهد مهبطه، لذلك يكون الثنائي في حالة انحياز أمامي.

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

ب . في الفترة التي يكون فيها الثنائي في حالة انحياز أمامي يمرِّر الموجة الكهربائيّة، وأمّا في الفترة التي يكون فيها الثنائي في حالة انحياز عكسي، فلا يمرِّر الموجة الكهربائية، ويكون شكل الموجة الخارجة كما في الشكل (52).



الشكل (52): شكل الموجتين الداخلة والخارجة.



الشكل (53): طبقات الترانزستور ورمزه في الدارات الإلكترونية.

الترانزستور Transistor

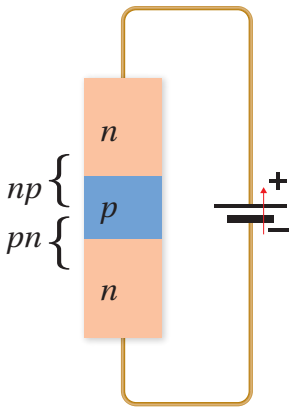
الترانزستور Transistor هو أحد أهم عناصر الدارات الإلكترونية، ويدخل في تركيب الأجهزة الإلكترونية كلها. فالهاتف النقال يحوي مئات الآلاف من الترانزستورات. ويُصنع الترانزستور من موادّ شبه موصلة مثل السليكون أو الجرمانيوم. ويُتّخذ الترانزستور مُضخّمًا للتيار الكهربائي أو الجهد الكهربائيّ أو القدرة الكهربائية، أو مفتاحًا سريع الفتح والإغلاق. يوجد نوعان رئيسان من الترانزستورات، هما: **الترانزستور ثنائي القطبية Bipolar Junction Transistor (BJT)**، **وترانزستور تأثير المجال Field Effect Transistor (FET)**. وسأدرس هنا الترانزستور ثنائيَّ القطبية.

الترانزستور ثنائي القطبيّة:

يتكوّن الترانزستور ثنائيّ القطبية من ثلاث طبقات شبه موصِلة، حيث تختلف الطبقة الوسطى في النوع عن الطبقتين الأخريين. فعندما تكون الطبقة الوسطى من النوع (n) والطبقتان الأخريان من النوع (p)، يكون نوع الترانزستور (pnp). وإذا كانت الطبقة الوسطى من النوع (p) يكون نوع الترانزستور (npn). ويوضّح الشكل (53) طبقات الترانزستور ورمزه في الدارات الإلكترونية. وتُسمّى الطبقة الوسطى للترانزستور القاعدة Base ويرمز إليها بالرمز (B)، وتُسمّى الطبقتان الأخريان الجامع Collector ورمزه (C)، والباعث Emitter ورمزه (E).

ألاحظ في الشكل (53) أنّ اتّجاه السهم يشير إلى اتجاه التيار الاصطلاحي الموجب، فيكون السهم خارجًا من القاعدة (B) باتجاه الباعث (E) في الترانزستور (npn)، في حين يكون اتجاه السهم من الباعث نحو القاعدة في الترانزستور (pnp).

ويمكن تخيّل الترانزستور بأنّه يتكوّن من ثنائيّين كما في الشكل (54)، حيث البلّورة الوسطى (القاعدة) من النوع (p) تكون رقيقة، وتركيز الفجوات فيها قليل.

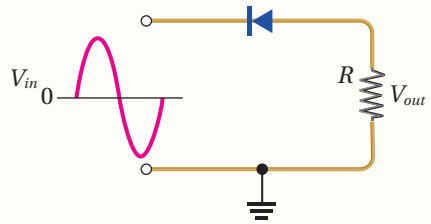


الشكل (54): يتكون الترانزستور من ثنائيّين، وتكون الطبقة الوسطى رقيقة. الرسم توضيحي لا يعبر عن الأبعاد الحقيقية للترانزستور.

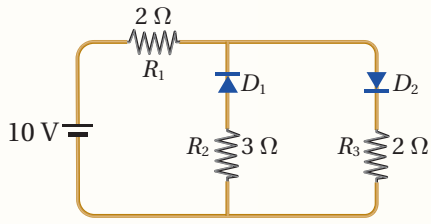
مراجعة الدرس

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

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



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

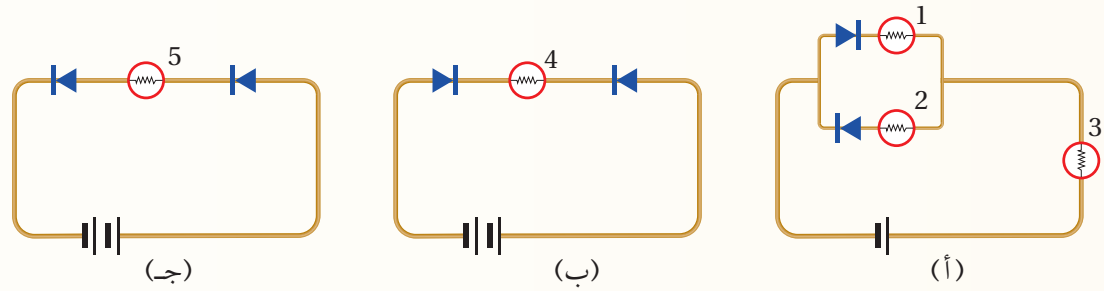


أ . أيّ الثنائيّين في حالة انحياز أمامي؟ وأيّهما في حالة انحياز عكسي؟

ب. أجد التيار المارّ في كلّ مقاومة.

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

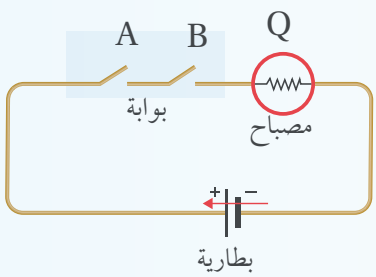
4. **أحلّل:** اعتمادًا على الشكل المجاور أيُّ المصابيح يضيء، وأيُّها لا يضيء؟



5. **التفكير الناقد:** أرادت الطالبة سماح تصميم دارة تحوي مصباحين صغيرين على أن يُضيئا ويُطفِئا على التناوب، وكان من ضمن القطع الإلكترونية التي تحتاج إليها ترانزستوران ، فهل يجب استخدام الترانزستورين بوصفهما مُضخِّمين أم بوصفهما مفتاحين؟ ولماذا؟

البوابات المنطقية
Logic Gates

البوابات المنطقية دارات إلكترونية يستخدم فيها الترانزستور بوصفه مفتاحًا سريع الفتح والإغلاق. ولتبسيط مبدأ عملها سندرس الدارة الموضَّحة في الشكل المجاور، وسنرمز إلى المفتاح المفتوح بالرمز (0)، وإلى المفتاح المغلق بالرمز (1)، وإضاءة المصباح (Q) بالرمز (1)، وعدم إضاءة المصباح بالرمز (0). ويمكن أن نعدّ المفتاحين (A) و (B) معاً بوابة منطقية. لن يضيء المصباح إلا إذا أُغلق المفتاحان معًا، ويمكن تلخيص ذلك في الجدول المجاور، ويُسمّى مثل هذا الجدول جدول الحقيقة Truth table. وهذا السلوك للدارة السابقة يوصف بالسلوك المنطقي Logic، حيث يُعبَّر عن المدخلات والمخرجات بالرقمين (1) و (0).



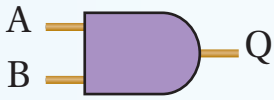
تمثيل بسيط لبوابة رقمية.

جدول الحقيقة للدارة السابقة.

Input		Output
A	B	Q
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

صُمّم العديد من الدارات الإلكترونية التي يُستخدم فيها ترانزستور أو أكثر بالإضافة إلى عناصر أخرى(مثل، المواسعات والمقاومات) لتتصرّف تصرّفًا منطقيًّا كما في الدارة السابقة التي تُعدّ تبسيطًا لبوابة منطقية تُسمّى بوابة (AND)، ويرمز إليها بالرمز الموضَّح في الشكل المجاور. ومن الأمثلة الأخرى **البوابة العاكسة (NOT)** Inverter gate، والتي تتكون من مدخل واحد (A) ومخرج واحد (Q). ومن الأمثلة الأخرى على البوابات المنطقية الأساسية بوابة (OR). يتضح مما سبق أنّ البوابة المنطقية Logic gate مجموعة ترانزستورات ومقاومات وعناصر إلكترونية أخرى تقوم بعملية منطقية على مدخل واحد أو أكثر، وتخرج مخرجًا منطقيًّا واحدًا.

A	B	Q
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



بوابة AND رمزها وجدول الحقيقة لها.

الأجهزة الإلكترونية المعتمدة في تصميمها على البوابات المنطقية تُسمّى إلكترونيات رقمية، حيث تأخذ القيم (1) أو (0) لمدخلاتها ومخرجاتها. وتمتاز أنظمة الإلكترونيات الرقمية كونها أسهل نسبيًّا في التصميم وإمكانية برمجتها، ومناعتها ضد الضوضاء والتشويش، وسهولة تخزينها للبيانات، وسهولة تصنيعها على شكل **دارة متكاملة** Integrated circuit (IC)، ما يؤدي إلى تصميم دارات تقوم بوظائف أكثر تعقيدًا وبحجم أصغر.

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

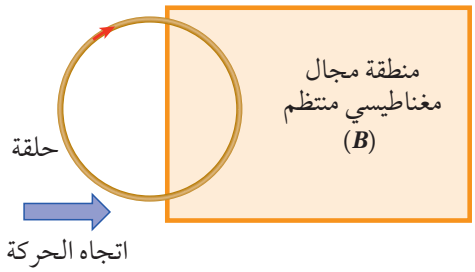
1. وحدة قياس معامل الحثّ الذاتيّ لمحثّ بحسب النظام الدوليّ للوحدات، هي:

أ. V.A/s ب. A.s/V جـ. V.A.s د. V.s/A

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

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

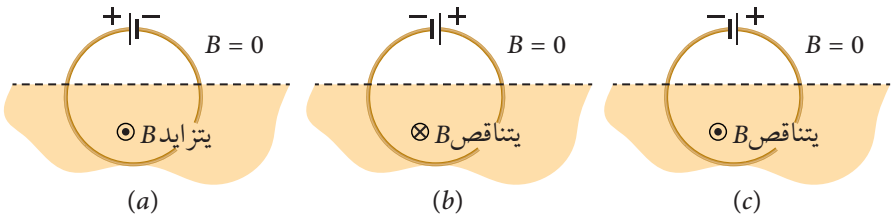
3. في أثناء دخول الحلقة المبينة في الشكل إلى منطقة مجال مغناطيسي منتظم ($\boldsymbol{B}$) يتولد في الحلقة تيار كهربائي حثّي بالاتجاه المبين في الشكل، فيكون المجال المغناطيسي ($\boldsymbol{B}$) باتجاه محور:



أ. $+z$ ب. $-z$

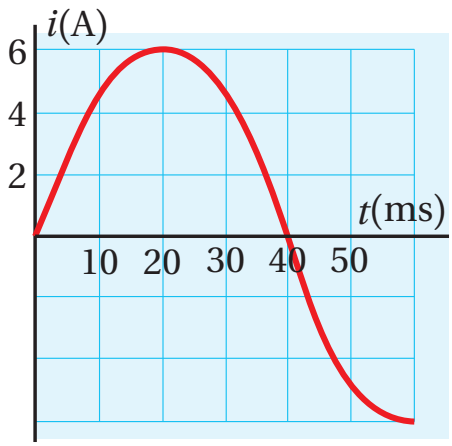
جـ. $+x$ د. $-x$

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



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

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



أ. $i = 6\sin 40\ t$

ب. $i = 6\sin 40\ \pi t$

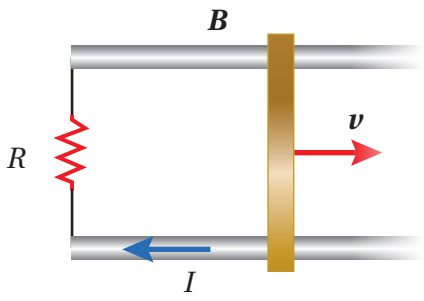
جـ. $i = 6\sin 12.5\ \pi t$

د. $i = 6\sin 25\ \pi t$

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

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

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



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

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

8. عند توصيل طرفي فولتميتر بطرفي مصدر فرق جهد متردّد قيمته العظمى (310 V)، فإنّ قراءة الفولتميتر تساوي:

أ. 31 V ب. 155 V

جـ. 220 V د. 310 V

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

أ. 7 Ω ب. 14 Ω جـ. 20 Ω د. 28 Ω

10. الموادّ النقيّة التي لها العدد الأكبر من الإلكترونات الحرّة هي:

أ. الموادّ العازلة. ب. الموادّ الموصِلة. جـ. الموادّ شبة الموصِلة. د. بلّورة من النوع (p).

11. عند إشابة بلّورة السليكون بعنصر خماسي التكافؤ ينتج:

أ. بلّورة من نوع (p) ب. بلّورة من نوع (n) جـ. ثنائي بلّوري د. ترانزستور.

12. حتى يكون الثنائيّ البلّوري في حالة انحياز أمامي، يجب أن:

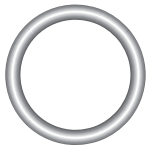
أ. يُطبّق فرقُ جهد خارجي موجب على مصعده، وآخرُ سالب على مهبطه بحيث يكون أكبر من حاجز الجهد للثنائي.

ب. يُطبّق فرقُ جهد خارجي سالب على مصعده، وآخرُ موجب على مهبطه.

جـ. يكون جهد مصعده أقلّ من جهد مهبطه.

د. يكون جهد مصعده أكبر من جهد مهبطه بما لا يزيد على (0.1 V).

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



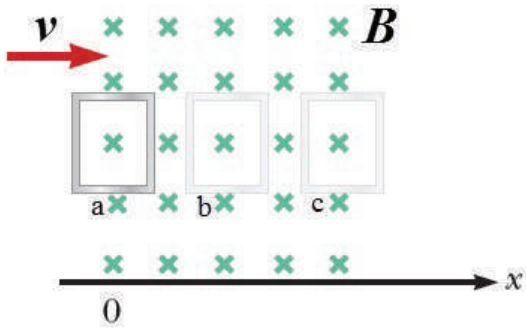
أ. عندما تتحرك الحلقة رأسيًّا إلى الأسفل باتجاه السلك.

ب. في أثناء إنقاص التيار الكهربائي المارّ في السلك مع بقاء الحلقة ثابتة.

جـ. عندما تتحرك الحلقة أُفقيًّا بموازاة طول السلك لجهة اليسار .

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

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



أ . أيّ المراحل الثلاث يتولّد فيها قوة دافعة كهربائية وتيار كهربائي حثّي في الحلقة؟ أُفسّر إجابتي.

ب. أُحدّد اتجاه التيار الكهربائي الحثّي المتولّد في كل مرحلة إن وُجِد، مفسِّرًا إجابتي.

5. أستخدم الأرقام: تُحلّق إحدى طائرات الخطوط الجويّة الملكيّة الأُردنيّة أُفقيًّا بسرعة مقدارها (200 m/s) في منطقة، المُركَّبة الرأسيّة للمجال المغناطيسي الأرضي فيها تساوي ($50\ \mu T$). أتأمّل الشكل المجاور. إذا علمت أن طول جناحي الطائرة معًا يساوي (60 m)، فأحسب القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتوسطة المتولّدة بين طرفي جناحي الطائرة.

6. أستخدم الأرقام: حلقة فلزّية مساحة مقطعها العرضي ($10.0\ cm^2$)، موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم على أن يكون مستواها عموديًّا على اتّجاه المجال المغناطيسي. إذا ازداد مقدار المجال المغناطيسي ازديادًا منتظمًا من (0.50 T) إلى (2.50 T) خلال (1.0 s)، فأحسبُ التيار الكهربائي الحثّي المتولّد في الحلقة إذا علمتُ أنّ مقاومتها ($1.0\ \Omega$).

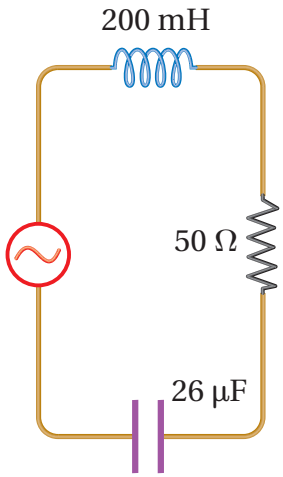
7. أستخدم المتغيرات ملفّ من سلك موصِل عدد لفّاته (400)، ومقاومته الكهربائيّة (50.0 Ω)، ومساحة مقطعه العرضي ($0.25\ m^2$). وضع الملف داخل مجال مغناطيسي منتظم مقداره (2.0 T)، حيث مستوى الملف عموديّ على اتجاه المجال المغناطيسي. فإذا تلاشى المجال المغناطيسي خلال (0.50 s)، أحسب ما يأتي:

أ . القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتوسطة المتولّدة في الملف.

ب. التيار الكهربائي الحثّي المتولّد في الملف.

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

9. أستخدم المتغيّرات: دارة (*RLC*) تحتوي على مقاومة ومحثّ ومواسع مبيَّنة قيمها في الشكل المجاور، تتصل بمصدر فرق جهد متردّد قيمته العظمى (210 V)، وتردّده (50 Hz). أحسب:



أ . المعاوقة المحثّية والمعاوقة المواسعيّة والمعاوقة الكليّة للدارة.

ب. القيمة العظمى للتيار المتردّد.

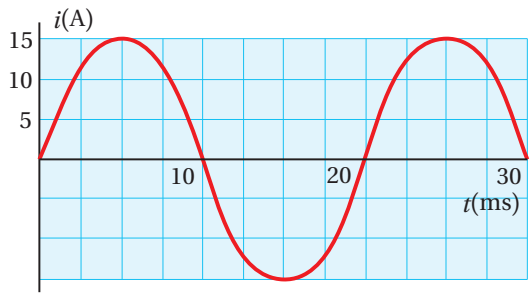
10. أحلل: تحتوي دارة استقبال في جهاز مذياع على مقاومة (120 Ω)، ومحثّ محاثّته (0.2 mH)، ومواسع متغيّر المواسعة. يمكن ضبط الدارة لكي تستقبل موجات بتردّدات مختلفة، عن طريق إحداث الرنين. أحدّد مجال القيم التي تتغيّر بينها مواسعة المواسع لاستقبال مدى التردّدات (550 kHz–1650 kHz).

11. أستخدم الأرقام: تحتوي دارة (*RLC*) على مقاومة (150 Ω) ومحثّ (460 mH) ومواسع (21 μF) موصولة على التوالي بمصدر فرق جهد متردّد قيمته الفعّالة (120 V)، وتردّده (60 Hz)، أحسب:

أ . مقدار المعاوقة الكليّة للدارة.

ب. التردّد الطبيعي للدارة الذي يحدث عنده الرنين.

12. أحلّل البيانات: معتمدًا على العلاقة البيانيّة المجاورة لتغيّر التيار الذي يسري في دارة مقاومة فقط مقدارها (40 Ω)، أجد:



أ . القيمتين العظمى والفعّالة للتيار.

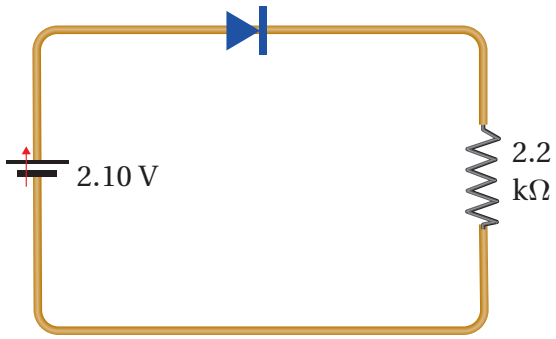
ب. التردّد الزاويّ للتيار.

جـ. القيمة الفعّالة لفرق الجهد.

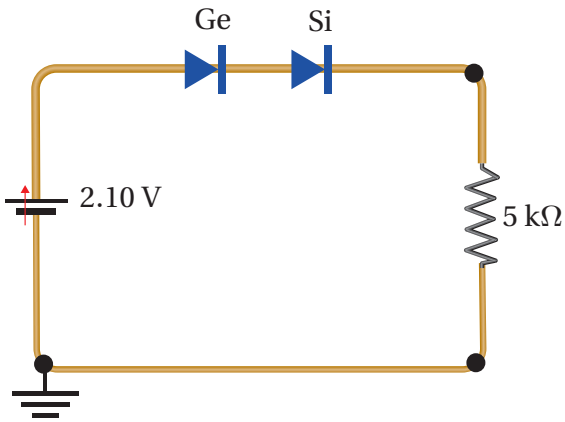
د . القدرة الكهربائية المستهلكة في المقاومة.

13. أحسب: يسري تيار متردّد في مقاومة (200 Ω)، إذا كانت قيمته العظمى (2.8 A)، فما القدرة المتوسطة المستهلَكة في هذه المقاومة؟

14. أستخدم المتغيرات: وُصِّل ثنائيٌّ من الجرمانيوم على التوالي بمقاومة كما في الشكل المجاور، اعتمادًا على البيانات المثبتة على الشكل، أجد فرق الجهد على طرفي الثنائي، وفرق الجهد على طرفي المقاومة ΔV_R، والتيار المارّ في المقاومة .



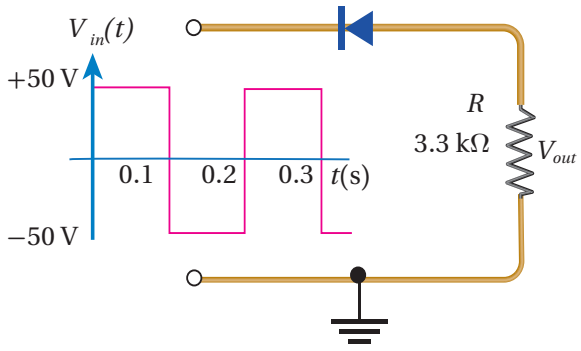
15. أستخدم المتغيرات: وُصِل ثنائيّان من السليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) على التوالي بمقاومة على نحو ما هو مبيَّن في الشكل المجاور، اعتمادًا على البيانات المثبتة على الشكل أجدُ الجهد الناتج.



16. أحلّل: أحضر باسم دارة متكاملة تستخدم للتوقيت تنتج إشارة مربعة، وقام هو وأفراد مجموعته بتوصيلها بثنائي ومقاومة كما في الشكل المجاور، اعتمادًا على البيانات الموضّحة على الشكل:

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

ب. إذا استخدمت بدلًا من المقاومة مصباحًا له نفس مقدار المقاومة، أجد عدد المرات التي سيضيء فيها المصباح في الثانية الواحدة.



الوحدة 6

الفيزياء الحديثة

Modern Physics

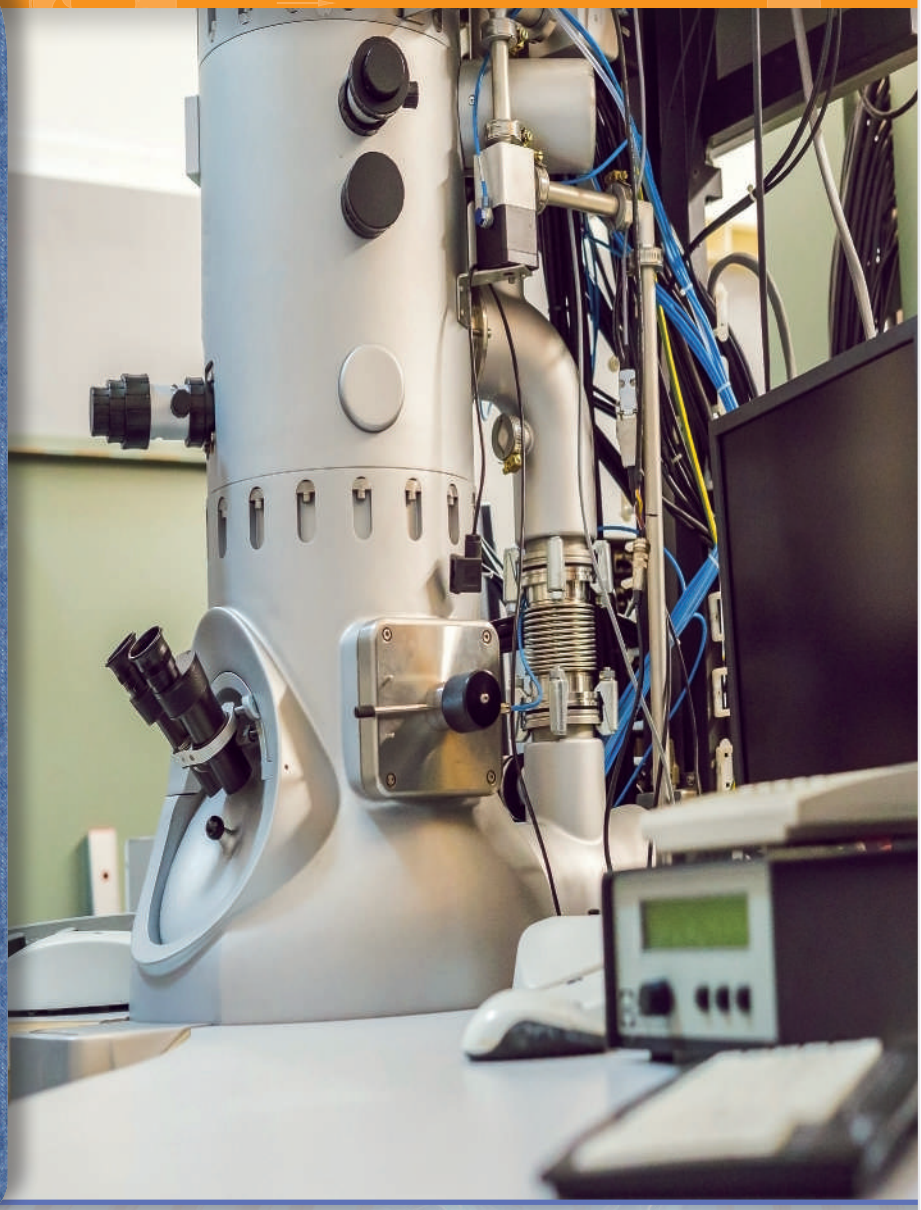
أتأمّلُ الصورةَ

الفيزياء والطاقة

تحوّل الخلايا الشمسيّة الطاقة الشمسيّة إلى طاقة كهربائيّة. والشكل أعلاه يبيّن محطة شمس معان للطاقة الشمسية، التي أُنشئت في مدينة معان عام 2016، وهي من أكبر مشروعات الطاقة الشمسية في الأردن، وفي المرتبة الثانية على مستوى الشرق الأوسط من حيث إنتاج الطاقة بقدرة 52.2 ميغاواط، واستُخدم في تصميمها 600 ألف لوح من الخلايا الشمسية.

هل يوجد شروط يجب توافرها في المناطق التي تُبنى فيها محطات الطاقة الشمسية؟ وما القوانين الفيزيائية التي ترتبط بهذه التكنولوجيا؟

الفكرةُ العامةُ:



لتطوّر علم الفيزياء أثر كبير في تفسير ظواهر ذات أهـميـّة في حيـاتنـا أدّت إلى تطويـر تكنولوجيا جديدة، سهّلت لنا سبل الحياة. وفي هذه الوحدة سأتعرّفُ أهـمّ الظواهر التي أسهمت في بزوغ ثورة علميّة أدّت إلى علم الفيزياء الحديثة (فيزياء الكمّ).

الدرسُ الأولُ: الطبيعة الجُسيميّة للضوء

Particle Nature of Light

الفكـرةُ الرئيسـةُ: للضـوء طبيعـة جُسـيميّة إضافـة إلى طبيعتـه الموجيّة، وفهمنـا للطبيعة الجُسـيميّة للضـوء مكّننـا مـن فهـم أعمـق للظواهـر المتعلّقة بالجُسـيمات الذرّيّة ودون الذرّيّـة (دون الجاهريّـة).

الدرسُ الثاني: التركيب الذرّي

Atomic Structure

الفكـرةُ الرئيسـةُ: تتكـوّن الـذرّة مـن نـواة موجبة الشـحنة، تتحرّك حولها إلكترونات سـالبة الشـحنة، تحتـلّ مسـتويات طاقة غير متّصلة (مُكمّاة)، وفهمنـا لهذا التركيب أدّى إلى تطويـر تكنولوجيا متطوّرة أسـهمت في تسـهيل سـبل الحيـاة، واكتشـافات علميّـة جديدة.

تجربة استهلالية

استقصاء إشعاع الجسم الأسود

الموادُّ والأدواتُ: موقد بنسن، سلك فلزّي، ملقط، قُفّازان سميكان، نظّارة واقية للعينين.

إرشاداتُ السلامةِ: ارتداء القفازين واستخدام النظارات الواقية للعينين، وتوخّي الحذر عند استخدام الغاز وموقد بنسن.

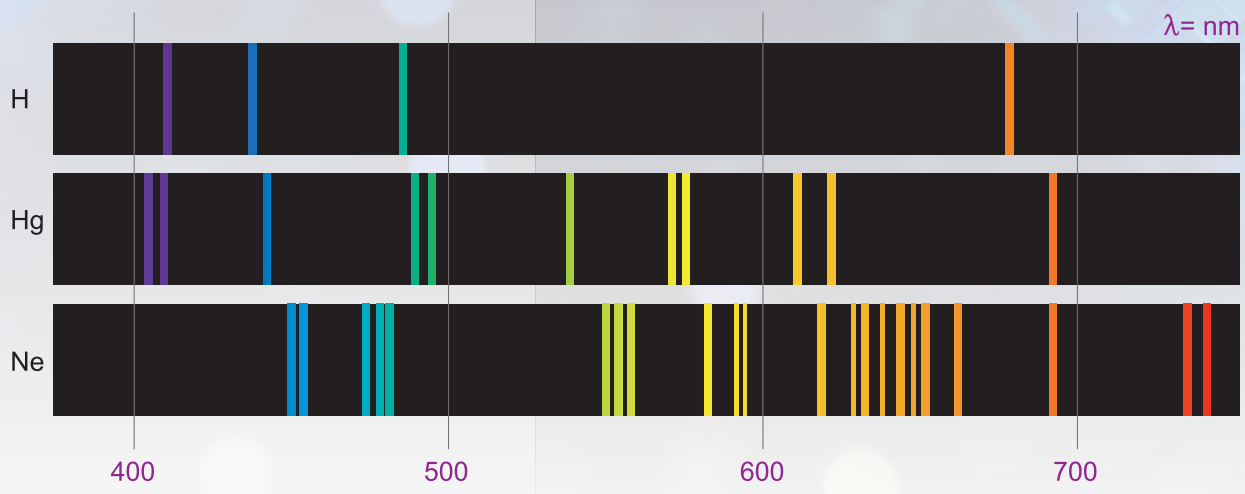
خطواتُ العملِ:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أُنفِّذ الخطوات الآتية:

1. أُشعل موقد بنسن بمساعدة معلّمي/ معلّمتي، وأحمل السلك الفلزّي بالملقط، ثمّ أضعه فوق الموقد.
2. **ألاحظ** لون الوهج الصادر عن السلك في أثناء تسخينه، مُستمرًّا بالتسخين حتى أحصل على وهج لونه أبيض.
3. **أدوّن** لون الوهج الصادر عن السلك مع مرور الزمن حتى الحصول على وهج لونه أبيض.

التحليل والاستنتاجُ:

1. ما ألوان الوهج الصادرة عن السلك التي شاهدتها؟
2. **أُحلّل البيانات وأُفسِّرها:** لماذا تغيّر لون الوهج مع مرور الزمن؟ وهل لذلك علاقة بدرجة حرارة الجسم؟
3. **أناقش** أفراد مجموعتي في صحّة نموذج رايلي- جينز الذي يتوقع توهج السلك بلون أزرق بدل اللون الأبيض الذي لاحظته في التجربة عند درجات حرارة مرتفعة.



الدرس 1

الطبيعة الجُسيميّة للضوء
Particle Nature of Light

الفكرة الرئيسة:

للضوء طبيعة جُسيميّة إضافة إلى طبيعته الموجيّة، وفهمنا للطبيعة الجُسيميّة للضوء مكّننا من فهم أعمق للظواهر المتعلقة بالجُسيمات الذرّيّة ودون الذرّيّة (دون الجاهريّة).

نتاجاتُ التعلّم:

- أصف الإشعاع الحراريّ للجسم الأسود.
- أشرح الظاهرة الكهرضوئيّة.
- أفسّر العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ وتردّد الضوء الساقط عليه.
- أشرح تجربة كومبتون.
- أحلّ مسائل حسابية على الظاهرة الكهرضوئية وتأثير كومبتون.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

الجسم الأسود	Blackbody
الظاهرة الكهرضوئية	Photoelectric Effect
الإلكترونات الضوئية	Photoelectrons
جهد الإيقاف	Stopping Potential (V_s)
تردّد العتبة	Threshold Frequency
اقتران الشغل للفلز	Work Function

الحاجة إلى الفيزياء الحديثة The Need for Modern Physics

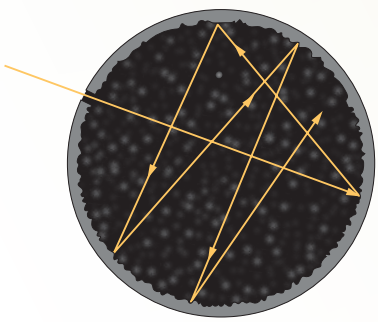
تطوّر علم الفيزياء الكلاسيكيّة على يد كثيرٍ من العلماء، مثل غاليليو Galileo الذي اهتمّ بدراسة الأجسام الساكنة والمتحركة، ونيوتن Newton الذي وضع ثلاثة قوانين في الحركة، وهذا ما درسته في صفوف سابقة. وتُعدّ النظريّة الكهرمغناطيسيّة من مجالات الفيزياء الكلاسيكيّة المهمّة، طوّرها العالم الإنجليزي ماكسويل Maxwell، وتصف الضوء بأنّه موجات كهرمغناطيسيّة، ونجحت هذه النظرية في تفسير كثيرٍ من الظواهر المتعلقة بالضوء كالحيود، والتداخل، والانعكاس، والانكسار.

لكن في بدايات القرن العشرين اكتُشفت ظواهر فيزيائية جديدة لم تستطع الفيزياء الكلاسيكية تفسيرها؛ مثل إشعاع الجسم الأسود، والظاهرة الكهرضوئيّة، وتأثير كومبتون، وتركيب الذرات والأطياف الخطّيّة المنبعثة عنها على نحو ما سأدرس لاحقًا في هذه الوحدة. إنّ الحاجة إلى تفسير هذه الظواهر أدّت إلى نشوء علم الفيزياء الحديثة، ويندرج تحتها علم فيزياء الكمّ الذي يُعنى بدراسة أنظمة الجُسيمات الذريّة ودون الذريّة (دون الجاهريّة) Microscopic particles ضمن مجالات منها الفيزياء الذرية والفيزياء النووية وفيزياء أشباه الموصلات.

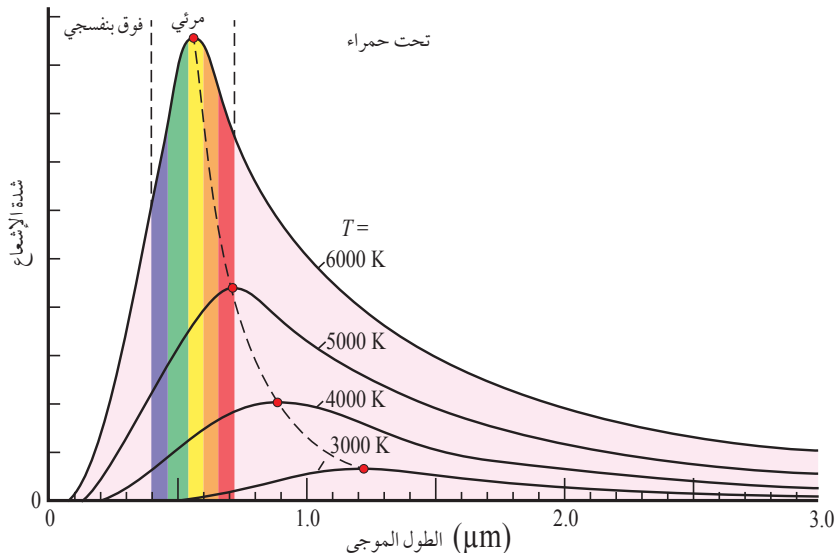
إشعاع الجسم الأسود Blackbody Radiation

عند درجات حرارة أكبر من الصفر المطلق تُشعّ الأجسام طاقة على شكل أشعة كهرمغناطيسيّة، ويعتمد إشعاع جسم للطاقة على درجة حرارته وطبيعة سطحه. وقد لاحظتُ في التجربة الاستهلاليّة أنّ لون توهج السلك تغير مع ارتفاع درجة حرارته، بدءًا من اللون الأحمر مرورًا بالأصفر وانتهاءً باللون الأبيض.

لفهم الإشعاع الحراريّ المُنبعث من جسم، طوّر العلماء مفهوم **الجسم الأسود Blackbody**، وهو جسم مثاليّ يمتصّ الأشعة الكهرمغناطيسية الساقطة عليه بغضّ النظر عن تردّداتها، ويُشّعها بالكفاءة نفسها، ويعتمد انبعاث الأشعة منه على درجة حرارته فقط. وأُطلق عليه اسم الجسم الأسود؛ لأنّ الجسم الذي يمتص الأشعة الساقطة عليه جميعها يكون لونه أسود. والشكل (1) يوضّح تصوّرًا للجسم الأسود بأنّه ثقب صغير في جسم أجوف، والأشعة التي تدخل الجسم من خلال الثقب تُمتصّ



الشكل (1): الجسم الأسود يمتص الأشعة الساقطة عليه كافة.



الشكل (2): العلاقة بين شدة الإشعاع المنبعِث من الجسم الأسود وطول موجة الإشعاع المنبعِث منه عند درجات حرارة مختلفة.

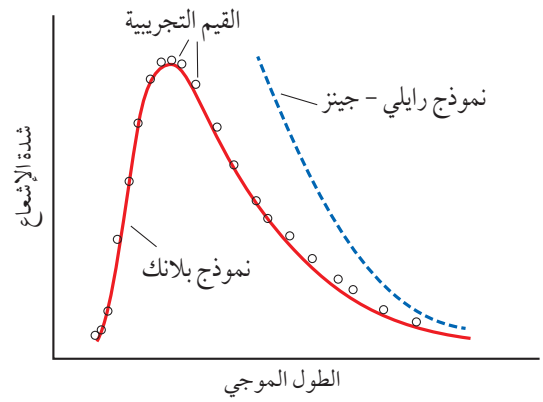
امتصاصًا كاملًا. ويوضّح الشكل (2) العلاقة بين الشدّة والطول الموجي للإشعاع المنبعِث من الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة. من الشكل نلاحظ أن معظم الاشعاع المنبعث من الجسم يوجد في منطقة الأشعة تحت الحمراء عند درجة 3000 K، وبزيادة درجة الحرارة تنزاح قمة المنحنى نحو الأطوال الموجية القصيرة (الترددات المرتفعة)، وعند 6000 K تكون قمة المنحنى في منطقة الضوء المرئي. إنّ قمّة منحنى شدّة الإشعاع تنزاح نحو الأطوال الموجية القصيرة (ترددات مرتفعة) بارتفاع درجة حرارة الجسم الأسود.

استخدم العالِمان رايلي وجينز Rayleigh and Jeans الفيزياء الكلاسيكية لتفسير منحنى اشعاع الجسم الاسود، التي ترتكز على أنّ الأجسام تُشعّ الطاقة، وتمتصّها بأيّ مقدار وعند أيّ تردّد؛ أيْ إنّ امتصاص الطاقة وإشعاعها يكون مُتصِلًا Continuous. وقد أظهر نموذج رايلي- جينز توافقًا مقبولًا مع النتائج التجريبيّة في منطقة الأطوال الموجيّة الكبيرة (الأشعة تحت الحمراء)، في حين أظهر عدم توافق في منطقة الأطوال الموجيّة القصيرة (الأشعة فوق البنفسجية) كما في الشكل (3)، حيث تؤول شدة الإشعاع بحسب نموذج رايلي-جينز إلى اللانهاية عندما يؤول طولها الموجي إلى الصفر، في حين تشير النتائج التجريبية بأنها (شدة الإشعاع) تؤول إلى الصفر، وهذا ما عُرف في تاريخ الفيزياء باسم **كارثة الأشعة فوق البنفسجية** Ultraviolet catastrophe. فلو كان تفسير رايلي-جينز صحيحًا لتوهج السلك في التجربة الاستهلالية باللون الأزرق بدلًا من اللون الأبيض عند درجات الحرارة المرتفعة.

✓ **أتحقّق:** في أيّ مناطق الطيف نجح نموذج رايلي-جينز في تفسير إشعاع الجسم الأسود؟

الربط بعلوم الفضاء

درجة حرارة سطح الشمس تصل إلى 6000 K تقريبًا، حيث إن الشمس تشعّ طاقة في مناطق الطيف الكهرمغناطيسي كلها، ولكن أكبر قيمة لشدة إشعاع الشمس تقع في منطقة الضوء المرئيّ كما في الشكل (2). المساحة تحت المنحنى تمثّل معدل الطاقة الكلية المشعّة لكل وحدة مساحة؛ لذا فإنّ الشمس تشعّ 40% تقريبًا من الطاقة في منطقة الضوء المرئي.



الشكل (3): مقارنة نموذج رايلي–جينز ونموذج بلانك بالنتائج التجريبية لإشعاع الجسم الأسود.

تفسير ماكس بلانك لإشعاع الجسم الأسود: تكمية الطاقة
Planck's Interpretation of Blackbody Radiation: Energy Quantization

عام 1900 تمكّن العالم ماكس بلانك Max Planck من وضع صيغة رياضيّة تصف شدّة الإشعاع المنبعِث من الجسم الأسود، وتطابقت حساباته مع النتائج التجريبية تمامًا، كما في الشكل (3). وافترض بلانك أنّ الأشعة الصادرة عن الأجسام ناتجة من مُتذبذِبات Oscillators (الإلكترونات في الذرات مثلا)، وأنّ هذه المتذبذِبات تشعّ الطاقة أو تمتصّها بكميات محدّدة وغير متصلة، وهذا يخالف تمامًا الفيزياء الكلاسيكية التي تفترض أنّ تلك المتذبذِبات تشعّ الطاقة أو تمتصّها بأيّ مقدار؛ أيْ على نحوٍ متّصل. ووفقاً لفرضية بلانك، فإنّ الطاقة التي تشعّها الأجسام أو تمتصّها عند تردّد معيّن تكون عددًا صحيحًا من مضاعفات طاقة الحزمة (الكمة) الواحدة؛ وطاقة الكمة الواحدة يُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$E = hf$$

حيث h ثابت بلانك وقيمته (6.63×10^{-34} J.s)، و f تردّد الموجة. وعند تردّد معيّن، فإنّ طاقة الأشعة الكهرمغناطيسية التي يشعّها جسم أو يمتصها يُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$E_n = nhf$$

حيث n عدد صحيح موجب. وبذلك، فإنّ طاقة الأشعة الصادرة عن جسم عند التردّد f يمكن أن تأخذ قيمًا، مثل:

$$hf, 2hf, 3hf, 4hf, \ldots$$

وهذا ما يعرف بمبدأ تكمية الطاقة Energy quantization.

لم يكن من السهل حينئذٍ قبول مبدأ تكمية الطاقة حسب فرضية بلانك، ولكن صحّة هذه الفرضية ترسّخت بنجاح العالم أينشتين Einstein عام 1905 في تفسير الظاهرة الكهرضوئية، مُعتمِدًا على فرضية بلانك في تكمية الإشعاع الكهرمغناطيسي، وأصبحت نقطةً مهمّة في انطلاق ما يُعرف في وقتنا الحالي بفيزياء الكم.

✓ **أتحقّق:** أذكر فرضيّة ماكس بلانك في تكمية الطاقة.

أفكّر: في التجربة الاستهلاليّة؛ مع زيادة درجة حرارة السلك بدأ يشعّ باللون الأحمر، ثم الأصفر، ثم الأبيض. فلماذا تغيّر لون التوهّج إلى الأبيض؟

المثال 1

جسم ساخن بدرجة حرارة معينة، ومعظم الأشعة الصادرة عنه تردّدها يساوي ($f = 1 \times 10^{15}$ Hz)، أجد طاقة الكمة الواحدة من الإشعاع عند هذا التردّد.

المُعطيات: $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s، $f = 1 \times 10^{15}$ Hz

المطلوب: $E = ?$

الحلّ:

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 1 \times 10^{15} = 6.63 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ومن الجدير بالذكر أنّ وحدة قياس الطاقة المستخدمة في الفيزياء الذريّة هي **الإلكترون فولت (eV) Electronvolt.** والإلكترون فولت هو الطاقة التي يكتسبها إلكترون عند تسريعه بفرق جهد مقداره (1V)، حيث

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

وبذلك تصبح طاقة الكمة الواحدة تساوي:

$$E = 6.63 \times 10^{-19} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 4.1 \text{ eV}$$

المثال 2

أجد طاقة كمة أشعّة سينيّة تردّدها (4.2×10^{18} Hz)

المُعطيات: $f = 4.20 \times 10^{18}$ Hz, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s

المطلوب: طاقة الكمة الواحدة $E = ?$

الحلّ:

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 4.20 \times 10^{18}$$

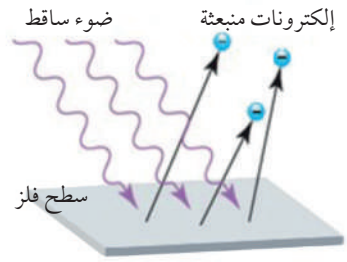
$$= 2.78 \times 10^{-15} \text{ J} \quad = 2.78 \times 10^{-15} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 17.4 \text{ keV}$$

تمرين

إذا كان تردد موجة الضوء الأحمر يساوي (4.6×10^{14} Hz)، أجد طاقة الكمة الواحدة له.

الظاهرة الكهرضوئيّة Photoelectric Effect

لاحظ العالم هيرتز Hertz خلال تجاربه، عام 1887م أنّ الشرارة الكهربائية تحدث على نحوٍ أسرع في جهاز الإرسال الخاص به عند تعريضه لأشعة فوق بنفسجية. وفيما بعد تبيّن أنّ سبب ذلك هو انبعاث إلكترونات من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردّد مناسب عليه، كما في الشكل (4)، وسُمّيت هذه الظاهرة **بالظاهرة الكهرضوئيّة Photoelectric effect**، وتُسمّى الإلكترونات المنبعِثة **الإلكترونات الضوئيّة Photoelectrons**. وحتى أتعرّفُ الظاهرة الكهرضوئية على نحوٍ أكثر أُنفّذ التجربة الآتية:



الشكل (4): انبعاث إلكترونات من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع بتردّد مناسب على سطحه.

التجربة 1 الظاهرة الكهرضوئيّة

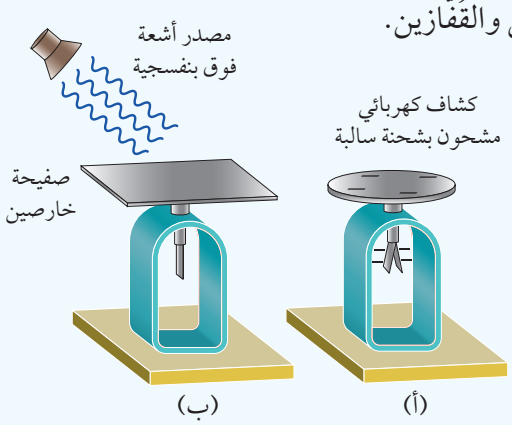
الموادُّ والأدواتُ: صفيحة خارصين، كشاف كهربائي، مصدر أشعة فوق بنفسجية، مصدرا ضوء أحمر، قضيب من الزجاج، قطعة من الحرير، ورق صنفرة، نظارة واقية، قُفّازان.

إرشادات السلامة: ارتداء المعطف واستخدام النظارة الواقية للعينين والقُفّازين.

خطواتُ العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أُنفّذ الخطوات الآتية:

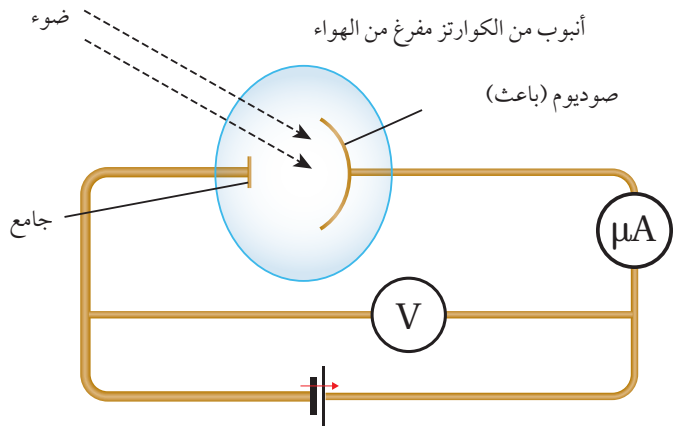
1. أصقل صفيحة الخارصين بورق الصنفرة.
2. **ألاحظ:** أشحن الكشاف الكهربائي بالحثّ مُستخدِمًا قضيبَ زجاجٍ دُلِك بقطعة من الحرير، وأُلاحظ انفراج ورقتي الكشاف الكهربائي.
3. أضع صفيحة الخارصين فوق قرص الكشاف الكهربائي كما في الشكل (ب).



4. **ألاحظ:** أُسلّط الضوء الأحمر على صفيحة الخارصين، وأراقبُ ما يحدث لورقتي الكشاف الكهربائي.
5. **ألاحظ:** أُسلّط كميّة أكبر من الضوء الأحمر (باستخدام المصدر الإضافي للضوء الأحمر) على صفيحة الخارصين، وأراقب ما يحدث لورقتي الكشاف الكهربائي.
6. أُعيد الخطوة (4) باستخدام الأشعة فوق البنفسجية.

التحليل والاستنتاج:

1. **أُدوّن** ما حدث لورقتي الكشاف باستخدام المصدر الأول للضوء الأحمر.
2. **أدوّن** ما حدث لورقتي الكشاف عند زيادة كمية الضوء (شدّته) عند استخدام مصدري الضوء الأحمر معًا.
3. **أدوّن** ما حدث لورقتي الكشاف عند زيادة تردّد الإشعاع الساقط (استخدام مصدر الأشعة فوق البنفسجية).
4. أبحث عن تردّد الأشعة فوق البنفسجية وتردّد الضوء الأحمر، باستخدام مصادر التعلّم المختلفة الموثوق فيها.
5. **أستنتج** لماذا لم يقلّ انفراج ورقتي الكشاف عند سقوط الضوء الأحمر، حتى عند زيادة شدّته.
6. **أستنتج** لماذا قلّ انفراج ورقتي الكشاف عند استخدام الأشعة فوق البنفسجية.



الشكل (5): تجربة لينارد للظاهرة الكهرضوئية.

أُلاحظ من التجربة السابقة أنّه عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية على صفيحة الخارصين قلّ انفراج ورقتي الكشاف، ما يدلّ على تفريغ شحنة الكشاف السالبة، ويعود ذلك إلى تحرّر إلكترونات من سطح الخارصين عند امتصاصها طاقةً من الأشعة فوق البنفسجية، أتأمّل الشكل (ب) في التجربة.

الشكل (5) يبيّن رسمًا تخطيطيًّا لجهازٍ استخدمه العالم لينارد Lenard لإجراء كثيرٍ من التجارب الخاصّة بالظاهرة الكهرضوئية؛ ويتكوّن من أنبوب من زجاج الكوارتز مُفرَّغ من الهواء؛ تجنّبًا لفقد الإلكتروناتِ طاقةً حركيّةً نتيجة تصادمها بجُسيمات الهواء. ويحتوي الجهاز أيضًا على قطبين فلزّيين، أحدهما مصنوع من فلزّ الصوديوم يُسمّى الباعث، موصول بالقطب الموجب لمصدر فرق جهد قابل للضبط، والآخر يُطلق عليه اسم الجامع يتصل بالقطب السالب لمصدر فرق الجهد. عند سقوط أشعة كهرمغناطيسية بتردّد مناسب على الباعث تتحرّر الإلكترونات من سطحه، وتنطلق نحو الجامع. ويُستدلّ على ذلك من خلال التيار الكهربائي الذي يقرؤه الميكرو أميتر (μA) الذي يُسمّى التيار الكهرضوئيّ Photocurrent.

كلّما ازدادت سالبيّة جهد الجامع، ازدادت قوّة تنافر الإلكترونات الكهربائيّة مع الجامع، فيقلّ التيار الكهرضوئي حيث لا يصل الجامع إلاّ الإلكترونات التي تمتلك طاقة حركية كافية للتغلّب على قوة التنافر الكهربائية مع الجامع. ويُسمّى فرق الجهد الذي يصبح عنده التيار الكهرضوئيّ صفرًا **جهد الإيقاف Stopping potential (V_s)**، الذي يستطيع إيقاف الإلكترونات ذات الطاقة الحركيّة العظمى (KE_{max}) قبل وصولها إلى الجامع. ويرتبط جهد الإيقاف بالطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات بالعلاقة الآتية:

$$KE_{max} = e\, V_s$$

حيث e تساوي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون.

وقد لاحظ لينارد المشاهدات التجريبية الآتية للظاهرة الكهرضوئية:

1. تتحرّر إلكترونات من سطح الفلزّ فقط عندما يكون تردّد الأشعة الساقطة على سطحه أكبر من تردّد معيَّن أو يساويه، يُسمّى **تردّد العتبة Threshold frequency**.
2. تنبعث الإلكترونات الضوئية بطاقات حركية متفاوتة، والقيمة العظمى للطاقة الحركية (KE_{max}) للإلكترونات المنبعثة من سطح الفلزّ تتناسب طرديًّا مع تردّد الأشعة الساقطة عليه، ولا تعتمد على شدّة الأشعة.
3. يزداد عدد الإلكترونات المنبعثة بزيادة شدّة الأشعة دون زيادة في الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية.
4. تنبعث الإلكترونات انبعاثًا فوريًّا بمجرد سقوط الأشعة على سطح الفلزّ.

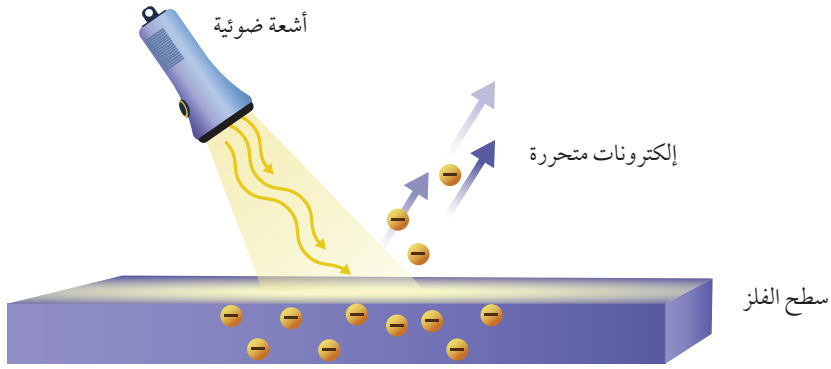
في حين تتنبّأ النظرية الكهرمغناطيسية، التي ترتكز على النموذج الموجيّ للضوء فيما يخص الظاهرة الكهرضوئية، بما يأتي:

1. تنبعث الإلكترونات عند أيّ تردّد للأشعة الساقطة على سطح الفلزّ، لأنّها تمتص الطاقة بأيّ مقدار وعند أيّ تردّد وبشكلٍ مستمر، وسقوط الأشعة على سطح الفلزّ مدّة زمنيّة مناسبة سيُمكِّن الإلكترونات من امتصاص الطاقة اللازمة لتحريرها من سطح الفلزّ.
2. لا تنبعث الإلكترونات الضوئية انبعاثًا فوريًّا؛ لأنّها تحتاج إلى وقت كافٍ لامتصاص الطاقة اللازمة من الأشعة الساقطة على الفلزّ لتتحرّر من سطحه.
3. زيادة شدّة الأشعة تزيد من الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات الضوئية المتحرّرة.

من الواضح أنّ التنبّؤاتِ جميعَها تخالف النتائج التجريبية، وبذلك شكّلت الظاهرة الكهرضوئية دليلاً آخرَ على عجز الفيزياء الكلاسيكيّة بنموذجها الموجيّ للضوء عن تفسير سلوك الجُسيمات دون الجاهريّة.

أفكّر: هل يمكن أن تكون الطاقة الحركيّة لجسم سالبة؟ ولماذا؟

✓ **أتحقّق:** أذكر أسباب فشل الفيزياء الكلاسيكيّة في تفسير نتائج الظاهرة الكهرضوئية.



الشكل (6): تصور أينشتين للظاهرة الكهرضوئية.

تفسير أينشتين Einstein's Explanation

لتفسير الظاهرة الكهرضوئية استخدم أينشتين فرضيّة تكمية الطاقة لبلانك، وافترض أنّ طاقة الأشعة الكهرمغناطيسية مركّزة في جُسيمات أُطلِقَ على كلٍّ منها اسم فوتون، حيث طاقة الفوتون الواحد تساوي $(E = hf)$؛ أيْ إنّ للأشعة الكهرمغناطيسية طبيعة جُسيميّة إضافة إلى طبيعتها الموجيّة؛ لذا فعند سقوط الفوتونات على إلكترونات الفلزّ، فإنّ الإلكترون الواحد منها، إمّا أنْ يمتص طاقة الفوتون كاملة، وإمّا أنّه لا يمتصها نهائيًّا، أتأمّل الشكل (6).

وحتى يتحرّر الإلكترون من سطح الفلز، يجب أن يمتلك طاقة كافية للتغلّب على قوة التجاذب الكهربائي مع النوى الموجبة للفلز، وأقلّ طاقة كافية لتحرير إلكترون من سطح الفلز تُسمى **اقتران الشغل** (**Work function** (Φ)، وهو يعتمد على نوع الفلزّ كما في الجدول (1). فإذا كانت طاقة الفوتون الذي يمتصّه الإلكترون (hf) أكبر من Φ، فإنّ الإلكترون يتحرّر مُكتسِبًا طاقة حركية. ولا يتحرّر إن كانت (hf) أقلّ من Φ. وتُحسب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة (KE_{max}) بالعلاقة الآتية:

$$KE_{max} = hf - \Phi$$

ويمكن إعادة كتابة العلاقة السابقة على النحو الآتي:

$$hf = \Phi + \frac{1}{2} m v_{max}^2$$

حيث: m كتلة الإلكترون.

و v_{max} : السرعة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

و $KE_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2$

أمّا عندما تكون طاقة الفوتون مساوية لاقتران الشغل، فإن طاقة الفوتون تكون كافية لتحرير الإلكترون من سطح الفلز دون إكسابه طاقة حركية . ويُسمى تردّد الأشعة الكهرمغناطيسية في هذه الحالة **بتردّد العتبة** للفلزّ (f_o)، ويُعرف بأنّه أقلّ تردّد يتطلّبه تحرير إلكترونات ضوئيّة من سطح فلزّ دون إكسابها طاقةً حركيّة. ويُحسب من اقتران الشغل للفلزّ بحسب العلاقة:

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

الجدول (1): اقتران الشغل لبعض الفلزات.

الفلز	Φ (eV)
سيزيوم	2.14
صوديوم	2.28
بوتاسيوم	2.30
نحاس	4.7
تنغستون	4.55
ذهب	5.10

أصمّم باستعمال برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا أوضح فيه سقوط مجموعة من الفوتونات على سطح فلز وتحرر إلكترونات منه، وأبين تأثير زيادة عدد الفوتونات في عدد الإلكترونات المتحررة. ثم أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

عام 1916 أجرى العالم ميليكان Millikan قياسات تجريبيّة للتحقّق من علاقة أينشتين للظاهرة الكهرضوئيّة، حيث استخدم ميليكان أشعة كهرمغناطيسيّة بتردّدات مختلفة، وقاس جهد الإيقاف عند كل تردّد، ومثّل العلاقة البيانيّة بين الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة وبين تردّد الأشعة الساقطة على الباعث برسم بياني فكانت كما في الشكل (7). ومن الواضح أنّ العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة وتردّد الأشعة الساقطة على الباعث علاقة خطّيّة، وهذا يتفق مع تفسير أينشتين للظاهرة الكهرضوئية. ويمثّل ميل الخط في الرسم ثابت بلانك، في حين يمثّل تقاطع امتداد الخط مع محور الطاقة ($-\Phi$)، وتمثل نقطة تقاطع الخط مع محور التردّد، ترددَ العتبة.

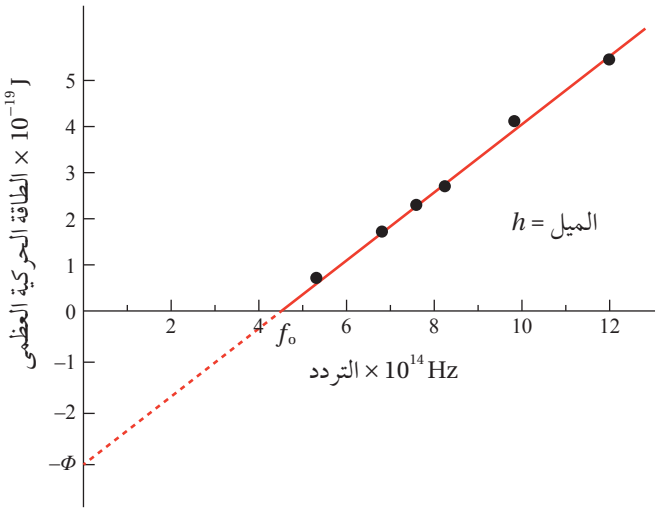
وتمكّن ميليكان كذلك من إثبات أنّ التيار الكهرضوئي يزداد بزيادة شدّة الإشعاع الساقط على الباعث. وفسّر أينشتين ذلك بأنّ زيادة شدّة الأشعة الكهرمغناطيسية تعني زيادة عدد الفوتونات الساقطة على الباعث في الثانية الواحدة، ونظرًا إلى أنّ كل فوتون يحرّر إلكترونًا؛ لذا يجب أن يزداد عدد الإلكترونات المتحرّرة في الثانية الواحدة.

وعند إمعان النظر في العلاقة التي تربط الطاقة الحركية العظمى باقتران الشغل وتردّد الأشعة الكهرمغناطيسية، أُلاحظ أنّ الطاقة الحركيّة العظمى تتناسب طرديًّا مع تردّد الأشعة لا مع شدّتها.

واستطاع النموذج الجُسيميّ للإشعاع تفسير الانبعاث الفوري للإلكترونات من سطح الفلزّ؛ لأنّه يفترض أنّ الطاقة مركّزة في الفوتون، وبمجرد امتصاص الإلكترون للفوتون، فإنّه يكتسب طاقة تُحرّره من الفلزّ مهما كانت شدّة الإشعاع، على أنْ يكون تردّد الفوتون أكبر من تردّد العتبة للفلزّ أو يساويه. واستطاع هذا

الربط بالتكنولوجيا

يعتمد مبدأ عمل كثير من الأجهزة والأدوات في وقتنا الحاضر على الظاهرة الكهرضوئية، حيث تُحوَّل طاقة الفوتونات إلى طاقة كهربائية. وتُعدّ الخلايا الشمسية من المصادر البديلة النظيفة للطاقة، أتأمّل الشكل أدناه، حيث تحوّل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. وقد تصل فاعليّة الخلايا الشمسية المستخدمة للأغراض التجارية إلى 20% تقريبًا.



الشكل (7): العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية، وتردّد الأشعة الكهرمغناطيسية في الظاهرة الكهرضوئية.

لماذا رسم امتداد الخط البياني عند قيم الطاقة السالبة مُتقطّعًا ولم يرسم خطًّا مُتصِلًا؟

النموذج تفسير التفاوت في الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة، وذلك بحسب طاقة ربط الإلكترون بذرات الفلزّ، إضافة إلى عمق موقع الإلكترون تحت سطح الفلزّ، فالإلكترونات ذات طاقة الربط الأصغر والأقرب لسطح الفلزّ تتحرّر بطاقة حركيّة أكبر.

✓ **أتحقّق:** أذكر فرضيّة أينشتين التي استخدمها في تفسير نتائج الظاهرة الكهرضوئية.

المثال 3

إذا كان اقتران الشغل لفلزّ (2.0 eV)، وسقط على سطحه إشعاع كهرمغناطيسي طاقة الفوتون الواحد منه (6.0 eV).

أجد ما يأتي:

أ . تردّد العتبة للفلزّ.

ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المنطلِقة من سطح الفلزّ.

المُعطيات:

$$\Phi = 2.0 \text{ eV}, hf = 6.0 \text{ eV}, h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

المطلوب:

$$f_o = ?, \ KE_{max} = ?$$

الحلّ:

أ .أحسب تردّد العتبة من اقتران الشغل للفلزّ

$$hf_0 = \Phi$$

$$f_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{2.0 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

ب.أحسب الطاقة الحركيّة العظمى من العلاقة:

$$KE_{max} = hf - \Phi = 6.0 - 2.0 = 4.0 \text{ eV} = 4.0 \times 1.6 \times 10^{-19} = 6.4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

المثال 4

سقط إشعاع كهرمغناطيسي طول موجته (460 nm) على فلزٍّ اقترانُ الشغل له (2.2 eV)، أجد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ بوحدة الجول (J).

المُعطيات: $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s},\ \Phi = 2.2 \text{ eV},\ \lambda = 460 \text{ nm} = 460 \times 10^{-9} \text{ m},\ h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

المطلوب: $KE_{max} = ?$

الحلّ:

أجد تردّد الضوء الساقط على الفلزّ

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8}{460 \times 10^{-9}} = 6.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

أحوّل وحدة قياس اقتران الشغل من eV إلى وحدة جول (J):

$$\Phi = 2.2 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.5 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ثمّ أعوّض في العلاقة

$$KE_{max} = hf - \Phi = 6.63 \times 10^{-34} \times 6.5 \times 10^{14} - 3.5 \times 10^{-19}$$
$$= 8.1 \times 10^{-20} \text{ J}$$

المثال 5

إذا كانت الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح النحاس تساوي (22.6 eV) عند سقوط أشعة فوق بنفسجيّة تردُّدها (6.60×10^{15} Hz) على سطحه. أجد اقتران الشغل للنحاس بوحدة (eV).

المُعطيات: $KE_{max} = 22.6 \text{ eV},\ f = 6.60 \times 10^{15} \text{ Hz},\ h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

المطلوب: $\Phi = ?$

الحلّ:

أجد hf بوحدة (eV)

$$hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 6.60 \times 10^{15} = 4.38 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$= 4.38 \times 10^{-18} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} = 27.3 \text{ eV}$$

ثمّ أعوّض في العلاقة

$$KE_{max} = hf - \Phi$$

$$22.6 = 27.3 - \Phi \Rightarrow \Phi = 4.7 \text{ eV}$$

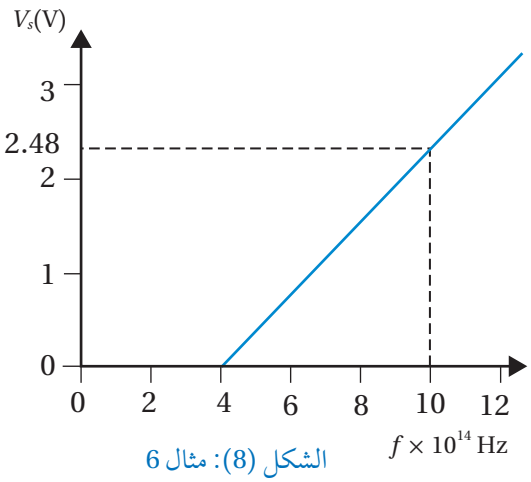
المثال 6

يمثّل الرسم البياني في الشكل (8) العلاقة بين جهد الإيقاف وتردُّدِ الفوتونات الساقطة على باعث خلية كهرضوئية، مستعينًا بالبيانات المبيّنة على الرسم، أحسب ما يأتي:

أ . مقدار ثابت بلانك.

ب. اقتران الشغل للباعث.

جـ. الطاقة الحركية العظمى (بالجول) للإلكترونات المنبعثة عند إسقاط أشعة تردّدها (12×10^{14} Hz) على الباعث.



الشكل (8): مثال 6

ملاحظة: لحلّ الفرعين (ب) و(جـ)، أستخدم ثابت بلانك الذي حسبته في الفرع (أ).

المُعطيات:

الرسم البياني, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $c = 3 \times 10^{8}$ m/s

المطلوب:

$\Phi = ?,\ KE_{max} = ?$

الحلّ:

أ. أجد ميل المنحنى لحساب ثابت بلانك، مُراعِيًا وحدات القياس:

$$slope = \frac{\Delta V_s}{\Delta f} = \frac{2.48 - 0}{(10 - 4) \times 10^{14}} = 4.1 \times 10^{-15}\ \text{V.s}$$

إنّ ميل الخط المستقيم يساوي $slope = \frac{h}{e}$، ومنه

$$h = slope \times e = 4.1 \times 10^{-15} \times 1.6 \times 10^{-19} = 6.6 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$$

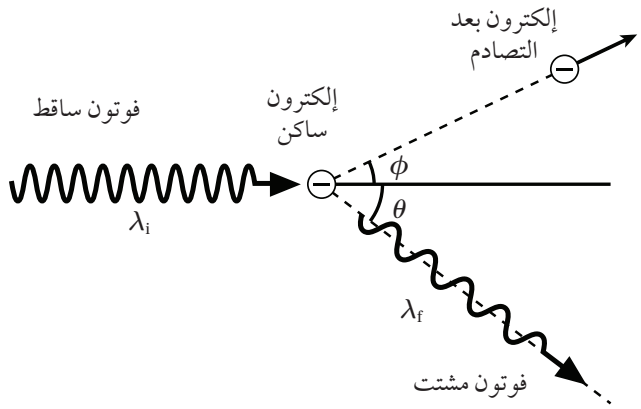
ب. أُلاحظ أنّ تقاطع الخط المستقيم مع محور التردّد هو تردّد العتبة $f_0 = 4 \times 10^{14}$ Hz

$$\Phi = hf_0 = 6.6 \times 10^{-34} \times 4 \times 10^{14} = 2.6 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

جـ. $$KE_{max} = hf - \Phi = 6.6 \times 10^{-34} \times 12 \times 10^{14} - 2.6 \times 10^{-19} = 5.3 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

تمرين

أرادت سارة قياس تردّد العتبة لفلزّ في تجربة الظاهرة الكهرضوئية، فاستخدمت أشعة كهرمغناطيسية طول موجتها (300 nm)، ووجدت أنّ التيار الكهرضوئي يصبح صفرًا عند فرق جهد (2.1 V)، أجد تردّد العتبة للفلزّ.



الشكل (9): ظاهرة كومبتون.

ظاهرة كومبتون Compton Effect

بعد نجاح أينشتين في تفسير الظاهرة الكهرضوئية باستخدام النموذج الجُسيمي للإشعاع الكهرمغناطيسي، جاءت ظاهرة كومبتون اختبارًا اخرَ لهذا النموذج.

أسقط كومبتون أشعة سينيّة على هدف من الغرافيت، ونظرًا إلى أنّ الطاقة الكليّة للإلكترونات في الغرافيت صغيرة جدًّا مقارنة بطاقة فوتونات الأشعة السينية، فإنّ طاقة تلك الإلكترونات تُهمَل وتُعدّ ساكنة. لاحظ كومبتون أنّ طول موجة الأشعة السينيّة المشتَّتة (λ_f) أكبر من طول موجة الأشعة السينيّة الساقطة (λ_i).

لم يستطع النموذج الموجيّ للضوء تفسير زيادة الطول الموجي للأشعة المشتتة في هذه الظاهرة، واستطاع كومبتون تفسير نتائج هذه الظاهرة بالاعتماد على قانوني حفظ الزخم الخطي والطاقة، وبافتراض أنّ الأشعة الكهرمغناطيسية تتفاعل مع الإلكترون بوصفها جُسيمات طاقةُ كلٍّ منها hf، ومقدار زخمه الخطي $p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$. وهذا الاستنتاج يتوافق مع الطبيعة الجُسيمية للأشعة الكهرمغناطيسية التي استخدمها أينشتين في تفسير الظاهرة الكهرضوئية. ونتيجة لتصادم الفوتون الساقط مع الإلكترون يكتسب الإلكترون طاقة، ويتحرك بمسار يصنع زاوية (ϕ) مع مسار الفوتون الساقط، في حين ينحرف اتجاه الفوتون المشتَّت بزاوية (θ) كما في الشكل (9)، ويستمر بالسرعة نفسها (c)، ولكن بطول موجيّ أكبر ($\lambda_i < \lambda_f$)، ويُعبَّر عن الطاقة التي اكتسبها الإلكترون (E_e) بالعلاقة الآتية:

$$E_e = E_i - E_f$$

حيث (E_f) طاقة الفوتون المشتَّت، في حين أنّ (E_i) طاقة الفوتون الساقط.

مرةً أخرى فشلت الفيزياء الكلاسيكية بنموذجها الموجيّ للضوء في تفسير هذه الظاهرة، في حين نجح في ذلك النموذج الجُسيمي للضوء.

أفكّر: لماذا لم يستخدم كومبتون الضوء المرئي في تجربته؟

أصمم باستخدام برنامج (Scratch) عرضاً أوضح فيه تصادم فوتون مع إلكترون مبيناً الاختلاف في الطول الموجي للفوتون المشتت عنه للفوتون الساقط، ثم أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

✓ **أتحقّق:** في تجربة كومبتون، أقارن بين الأشعة الساقطة والأشعة المشتّتة من حيث: الطول الموجيّ، والتردّد، والسرعة.

المثال 7

فوتون أشعة سينيّة تردّده (4.20×10^{18} Hz). أجد طاقته ومقدار زخمه الخطّي.

المُعطيات:

$$f = 4.20 \times 10^{18}\ \text{Hz}\ ,\ c = 3 \times 10^{8}\ \text{m/s}\ ,\ h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$$

المطلوب:

$$E = ?\ ,\ p = ?$$

الحلّ:

$$E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 4.20 \times 10^{18}$$

$$= 2.78 \times 10^{-15}\ \text{J} = 2.78 \times 10^{-15}\ \text{J} \times \frac{1\ \text{eV}}{1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}} = 17.4\ \text{keV}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c} = \frac{E}{c} = \frac{2.78 \times 10^{-15}}{3 \times 10^{8}} = 9.28 \times 10^{-24}\ \text{kg m/s}$$

المثال 8

أجد طاقة وتردّد فوتون مقدار زخمه الخطي (8.85×10^{-26} kg m/s).

المُعطيات:

$$h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s},\ 1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J},\ p = 8.85 \times 10^{-26}\ \text{kg m/s}\ ,\ c = 3.0 \times 10^{8}\ \text{m/s}$$

المطلوب:

$$E = ?\ ,\ f = ?$$

الحلّ:

$$E = pc = 8.85 \times 10^{-26} \times 3 \times 10^{8} = 2.7 \times 10^{-17}\ \text{J}$$

$$= 2.7 \times 10^{-17}\ \text{J} \times \frac{1\ \text{eV}}{1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}} = 1.7 \times 10^{2}\ \text{eV}$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{2.7 \times 10^{-17}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.1 \times 10^{16}\ \text{Hz}$$

المثال 9

سقط فوتون أشعة غاما طاقته (662 keV) على إلكترون ساكن، فاكتسب الإلكترون طاقة مقدارها (49 keV)، أجد ما يأتي:

أ . طول موجة الفوتون الساقط.

ب. طاقة الفوتون المشتَّت.

جـ. الطول الموجي للفوتون المشتت.

المُعطيات:

$h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s}, 1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J},\ c = 3 \times 10^{8}\ \text{m/s}, E_i = 662\ \text{keV}, E_e = 49\ \text{keV}$

المطلوب:

$\lambda_i = ?, E_f = ?, \Delta\lambda = ?$

الحلّ:

أ . أحوّل طاقة الفوتون الساقط إلى وحدة جول، ثمّ أحسب الطول الموجيّ

$$E_i = 662\ \text{keV} = 662 \times 10^{3}\ \text{eV} \times \frac{1.6 \times 10^{-19}\text{J}}{1\ \text{eV}} = 1.1 \times 10^{-13}\ \text{J}$$

$$\lambda_i = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_i} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^{8}}{1.1 \times 10^{-13}} = 1.9 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

ب .
$$E_f = E_i - E_e = 662 - 49 = 613\ \text{keV} = 613 \times 10^{3}\ \text{eV} \times \frac{1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}}{1\ \text{eV}} = 9.8 \times 10^{-14}\ \text{J}$$

جـ. أجد طول موجة الفوتون المشتّت (بعد التصادم)

$$\lambda_f = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^{8}}{9.8 \times 10^{-14}} = 2.0 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

تمرين

أجد مقدار الزخم الخطّي لكلّ ممّا يأتي:

أ . فوتون أشعّة مرئيّة طاقته $(3.00 \times 10^{-19}\ \text{J})$.

ب. فوتون أشعّة فوق بنفسجيّة تردّده $(5.4 \times 10^{15}\ \text{Hz})$.

جـ. فوتون أشعّة سينيّة طول موجته (2.00 nm).

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بكلٍّ من: الجسم الأسود، الظاهرة الكهرضوئيّة، اقتران الشغل للفلزّ، تردّد العتبة.

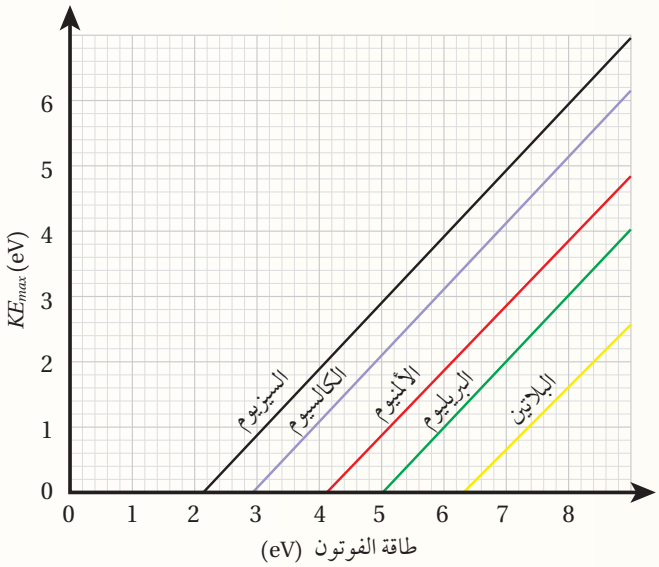
2. **أحسب:** سقط فوتون أشعّة سينيّة مقدار زخمه الخطي (4.3×10^{-23} kg m/s) على إلكترون حرّ، فكان مقدار الزخم الخطي للفوتون المشتت (3.2×10^{-23} kg m/s)، أجد الطاقة التي اكتسبها الإلكترون بوحدة (eV).

3. **أستخدم المتغيّرات:** سقط ضوء طول موجته (300 nm) على سطح فلزّ تردّد العتبة له (5.0×10^{14} Hz)، أجد:

   أ . اقتران الشغل للفلز.

   ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

4. **أحلّل رسمًا بيانيًّا:** يمثّل الرسم البيانيّ المجاور العلاقة بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ وطاقة فوتون الإشعاع الكهرمغناطيسي الساقط على سطح الفلزّ، وذلك لفلزات عدّة.



   أ . جميع الخطوط مستقيمة ومتوازية، أفسّر ذلك.

   ب. أرتّب تردّد العتبة للفلزّات من الأصغر إلى الأكبر.

   جـ. إذا سقط ضوء طاقته (10 eV) على البيريليوم، أجد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة منه.

   د . إذا سقط ضوء طول موجته (350 nm)، فمن أيّ الفلزّات يستطيع تحرير إلكترونات؟ ومن أيّها لا يستطيع؟ أيّ الفلزات تتحرّر منه إلكترونات بطاقةٍ حركيّة عظمى أكبر؟

5. **أستخدم المتغيّرات:** سقط إشعاع كهرمغناطيسي طول موجته (80 nm) على سطح فلزّ اقتران الشغل له (5.1 eV)، أجد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح الفلزّ.

6. **أناقش:** بيّنت التجارب أنّ زيادة شدّة الضوء الساقط على سطح فلزّ لا تؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطحه. أناقش فشل الطبيعة الموجيّة للضوء في تفسير هذه المشاهدة.

الفكرة الرئيسة:

تتكوّن الذرّة من نواة موجبة الشحنة تتحرك حولها إلكترونات سالبة الشحنة، تحتل مستويات طاقة غير متصلة (مكماة)، وفهمنا لهذا التركيب أدّى إلى تطوير تكنولوجيا متطوّرة أسهمت في تسهيل سبل الحياة، واكتشافات علمية جديدة.

نتاجات التعلّم:

- أشرح الأسس التي اعتمد عليها بور في بناء نموذجه لذرة الهيدروجين، وأستقصي حدود هذا النموذج.
- أستنتج أنّ الإشعاع الكهرمغناطيسي المنبعث عن الذرات ينتج من انتقال الإلكترونات بين مستويات الطاقة.
- أستقصي الطيف المنبعث من مصادر ضوئية مختلفة.
- أطبّق بحلّ مسائل حسابيّة على نموذج بور لذرة الهيدروجين.

المفاهيم والمصطلحات:

طيف الامتصاص الخطّي
Absorption Line Spectrum

طيف الانبعاث الخطّي
Emission Line Spectrum

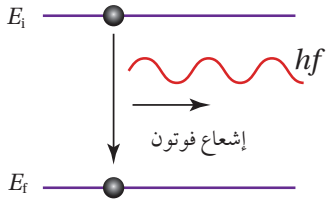
طاقة التأيُّن Ionization Energy

نموذج بور لذرّة الهيدروجين:
Bohr's Model of The Hydrogen Atom

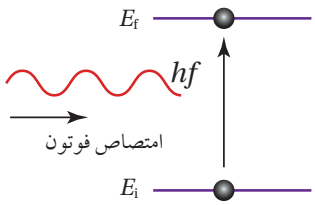
ساد الاعتقاد أنّ الذرّة أصغر مكوّنات المادّة، لكن بيّنت التجارب لاحقًا أنّ الذرة تتكوّن من جُسيمات أصغر منها. إنّ تفسير بِنية الذرّة واستقرارها كان التحدي الأكبر للفيزياء الكلاسيكية. بداية، افترض طومسون أنّ الذرة كرة مصمتة موجبة الشحنة تتوزّع فيها الإلكترونات سالبة الشحنة، وأنّ الذرة متعادلة كهربائيًّا؛ لأنّ مجموع الشحنة السالبة يساوي مجموع الشحنة الموجبة. لكن تجربة رذرفورد أثبتت عدم صحّة هذا النموذج. ففي تجربته الشهيرة عام 1911، أسقط رذرفورد Rutherford جُسيمات ألفا على صفيحة رقيقة من الذهب، وافترض، بناءً على مشاهداته التجريبية، أنّ الذرة تتكوّن من نواة موجبة الشحنة تشغل حيزًا صغيرًا جدًّا، تتركّز فيه غالبية كتلة الذرة، تدور حوله إلكترونات سالبة الشحنة مثل دوران الكواكب حول الشمس. ولم يُكتب لهذا النموذج النجاح؛ لأنّه لم يستطع تفسير استقرار الذرة، حيث إن الإلكترون جُسيم مشحون يدور حول النواة، ويغيّر اتجاه حركته بشكل مستمر، وبذلك يكتسب تسارعًا مركزيًّا، وبحسب النظرية الكهرمغناطيسية فإنّه سيشعّ (يفقد) طاقة بشكل متصل، ونتيجة فقدانه الطاقة؛ فإنّه سينجذب نحو النواة ما يؤدّي إلى انهيار الذرة. وهذا يخالف النتائج التجريبية، حيث الذرة مستقرة والطاقة التي تشعّها منفصلة ذات قيم محدّدة.

العالم بور كان مقتنعًا بصحّة نموذج رذرفورد، لكنّه اختلف معه في كيفيّة إشعاع الإلكترون للطاقة، فافترض أنّ الإلكترون يفقد الطاقة على شكل كمات محدّدة من الطاقة (فوتونات)، لا على شكل متّصل. واستخدم بور مبدأ تكمية الطاقة، ونموذج رذرفورد إضافة إلى النموذج الجُسيمي للإشعاع ليبني نموذجًا للذرة عُدَّ فيما بعد أهمّ الإنجازات العلميّة في ذلك الوقت. تتلخص فرضيات بور لذرة الهيدروجين فيما يأتي:

1. يدور الإلكترون حول البروتون (النواة) في مسارات دائرية تحت تأثير قوة التجاذب الكهربائي.
2. توجد مدارات محدّدة (مستويات طاقة) مسموح للإلكترون بأن يحتلّها، وإذا بقي في مستوى الطاقة نفسه فلا يشعّ طاقة ولا يمتصّها.



الشكل (10/ أ): إشعاع الذرة لفوتون.
في هذه الحالة الذرة تفقد طاقة.



الشكل (10/ ب): امتصاص الذرة لفوتون.
في هذه الحالة الذرة تكتسب طاقة.

3. يشعّ الإلكترون طاقة أو يمتصّها فقط إذا انتقل من مستوى طاقة إلى مستوًى آخر. فعند انتقال الإلكترون من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقلّ، فإنّه يشعّ فوتونًا طاقته تساوي الفرق بين طاقتي المستويين، أتأمّل الشكل (10/ أ). ويمكن أيضًا أن يمتص الإلكترون فوتونًا، وينتقل إلى مستوى طاقة أعلى عندما تكون طاقة الفوتون الممتَصّ مساوية لفرق الطاقة بين المستويين، أتأمّل الشكل (10/ ب). وفي كلتا الحالتين فإنّ طاقة الفوتون (E) المنبَعِث أو الممتَصّ يُعبَّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$E = |E_f - E_i| = hf$$

حيث

E_f: طاقة المدار (مستوى الطاقة) النهائي الذي انتقل إليه الإلكترون.

E_i: طاقة المدار (مستوى الطاقة) الابتدائي الذي انتقل منه الإلكترون.

f: تردّد الفوتون المنبَعِث أو المُمتَصّ.

4. المدارات المسموح للإلكترون أن يحتلها هي تلك التي يكون فيها مقدار زخمه الزاويّ $L = m_e vr$ يساوي عددًا صحيحًا من مضاعفات $\hbar$، حيث $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \times 10^{-34}$ J.s. أيْ إنّ

$$L = n\hbar = m_e v r$$

حيث

n: رقم المدار ويأخذ قيمًا صحيحة 1,2,3,... وهكذا.

m_e: كتلة الإلكترون وتساوي 9.11×10^{-31} kg

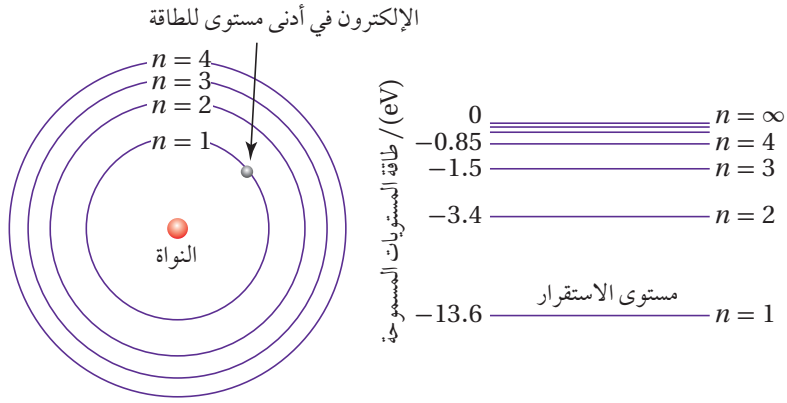
r: نصف قطر مدار الإلكترون.

ففي المدار الأول (n=1) يكون الزخم الزاويّ للإلكترون $\hbar$، وفي المدار الثاني $2\hbar$ وهكذا.

ويُعبَّر عن طاقة الإلكترون في مستوى الطاقة (n) في ذرة الهيدروجين بوحدة (eV) بالعلاقة الآتية:

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}$$

أصمّم باستخدام برنامج (Scratch) عرضاً لمستويي طاقة، أوضح فيه انبعاث أو امتصاص فوتون عند انتقال الإلكترون بين المستويين. ثم أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.



الشكل (11): مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين بحسب نموذج بور.

حيث ($n = 1, 2, 3, 4, \ldots$) هو رقم المدار (مستوى الطاقة) الرقمُ الكميُّ الرئيسُ.

أُلاحظ من العلاقة السابقة أنّ مستويات الطاقة غير متصلة (منفصلة) وتأخذ قيمًا محدّدة، أيْ إنّها مكمّاة، فمثلاً طاقة المستوى الأول (-13.6 eV) وطاقة المستوى الثاني (-3.40 eV). والشكل (11) يبيّن مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين، حيث يُمثَّل كلُّ مستوًى بخطٍّ أفقيٍّ مُبيَّنًا بجانبه الرقمُ الكميُّ الرئيسُ (n)، وطاقةُ المستوى بوحدة (eV).

أُلاحظ من الشكل (11) أنّ الإلكترون في مستوى الطاقة الأول يمتلك أقلّ طاقة وهي ($E_1 = -13.6$ eV)، ويُسمّى مستوى الاستقرار Ground state. أمّا مستويات الطاقة E_n حيث ($n > 1$)، فتُسمّى مستويات الإثارة Excited states، ينتقل إليها الإلكترون عندما يمتص فوتونًا ذا طاقة مناسبة. فمثلًا حتى ينتقل إلكترون من مستوى الطاقة الأول ($E_1 = -13.6$ eV) إلى مستوى الطاقة الثاني ($E_2 = -3.4$ eV) يجب أن يمتص فوتونًا طاقته تساوي الفرق بين طاقتي المستويين، أيْ (10.2 eV). أمّا لنقل إلكترون من مستوى الطاقة الأول ($n = 1$) إلى مستوى الطاقة ($n = \infty, E_\infty = 0$)، فيتطلّب امتصاص فوتون طاقته (13.6 eV)، وتُسمّى **طاقة التأيُّن Ionization energy**؛ وهي أقلّ طاقة لازمة لتحرير الإلكترون من الذرة دون إكسابه طاقة حركية. فالإشارة السالبة لطاقة المستوى n ($E_n = -\frac{13.6}{n^2}$ eV) تعني ضرورة تزويد الإلكترون بطاقة مقدارها ($+\frac{13.6}{n^2}$) لتحريره من الذرة.

الربط بالتكنولوجيا

معرفة مستويات الطاقة في الذرات المنفصلة أو الموادّ الصلبة، مكّن العلماء من تطوير كثيرٍ من الأجهزة التي تسهّل حياة البشر مثل؛ أنابيب الفلورسنت، والميكروويف، وأجهزة الهاتف المحمول والحاسوب، وتطوير تكنولوجيا الليزر المستخدمة في الطب والصناعة وتشكيل الصور ثلاثية الأبعاد (هولوغرام).

✓ **أتحقّق:** أُعدّد فرضيات بور لذرة الهيدروجين.

أُفكّر: ماذا يحدث للإلكترون إذا زادت طاقة الفوتون الذي يمتصّه على طاقة التأيُّن؟

المثال 10

اعتمادًا على الشكل (11)، أجد طاقة الفوتون المنبعث عند انتقال الإلكترون في ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثالث إلى مستوى الطاقة الثاني بوحدة eV، ثمّ أحوّله إلى وحدة J.

المُعطيات: $1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J},\ E_3 = -1.50\ \text{eV},\ E_2 = -3.40\ \text{eV}$

المطلوب : $E = ?$

$$E = |\Delta E| = |E_2 - E_3| = |-3.40-(-1.50)|$$
$$= 1.9\ \text{eV}$$
$$= 1.90\ \text{eV} \times \frac{1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}}{1\ \text{eV}} = 3.04 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

المثال 11

اعتمادًا على الشكل (11)، أجد طاقة الفوتون اللازمة لنقل الإلكترون في ذرة الهيدروجين من مستوى الاستقرار ($n = 1$) إلى مستوى الطاقة الثالث بوحدة eV.

المُعطيات: $E_3 = -1.50\ \text{eV},\ E_1 = -13.6\ \text{eV}$

المطلوب: $E = ?$

$$E = |\Delta E| = |E_3 - E_1| = |-1.5 - (-13.6)|$$
$$= 12.1\ \text{eV}$$

المثال 12

إلكترون في مستوى الطاقة الثاني لذرة الهيدروجين، أجد ما يأتي:

أ . الزخم الزاويّ للإلكترون.

ب. طاقة الإلكترون.

المُعطياتُ: $\hbar = 1.05 \times 10^{-34}\ \text{J.s},\ n = 2$

المطلوبُ: $L = ?,\ E_2 = ?$

الحلّ:

أ. $L = n\hbar = 2\hbar = 2 \times 1.05 \times 10^{-34} = 2.1 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$

ب. $E_2 = -\frac{13.6}{n^2} = -\frac{13.6}{2^2} = -3.4\ \text{eV}$

المثال 13

أجد تردّد الفوتون اللازم لنقل إلكترون في ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الثالث.

المُعطيات: $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s},\ 1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J},\ n_i = 2,\ n_f = 3$

المطلوب: $f = ?$

الحلّ:

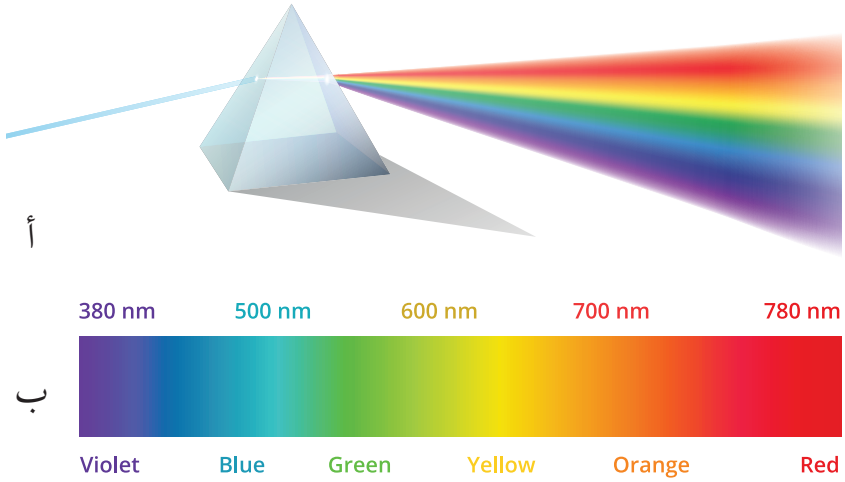
$$E = |E_f - E_i| = \left|\frac{-13.6}{n_f^2} - \frac{-13.6}{n_i^2}\right|$$

$$E = \left|\frac{-13.6}{3^2} - \frac{-13.6}{2^2}\right| = |-1.5-(-3.4)| = 1.9\ \text{eV} = 1.9 \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.0 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{3.0 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 4.5 \times 10^{14}\ \text{Hz}$$

تمرين

انتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة n_i إلى مستوى الطاقة الثاني، فانبعث فوتون بطاقة (4.08×10^{-19} J).
أجد رقم مستوى الطاقة n_i.



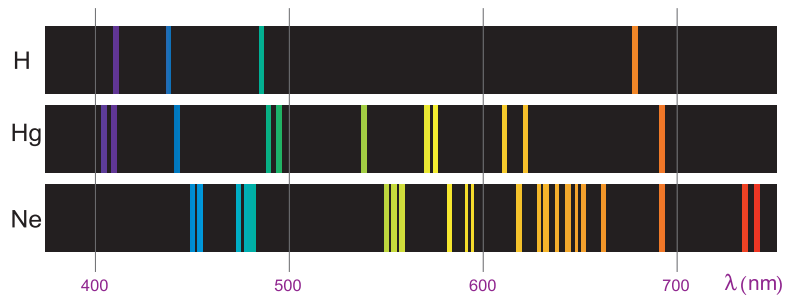
الشكل (12): تحليل ضوء الشمس الأبيض إلى ألوان الطيف المختلفة باستخدام منشور.

الأطياف الذريّة Atomic Spectra

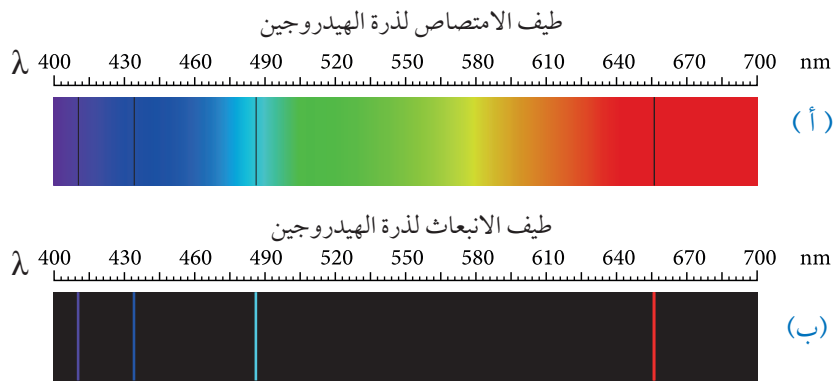
يوضّح الشكل (12/ أ) منشورًا يعمل على تحليل ضوء الشمس الأبيض إلى ألوان الطيف المتصل Continuous spectrum؛ وسُمّي متّصلًا لأنّه يحتوي الأطوال الموجيّة كلها بدءًا من اللون الأحمر وصولًا إلى اللون البنفسجي، أتأمّل الشكل (12/ ب).

وبخلاف الطيف الشمسي فإنّ الأطياف الناتجة من ذرات عنصر واحد ليست متصلة. ولتفسير الطيف الذريّ غير المتصل Discontinuous spectrum أفترضُ وجود ذرة هيدروجين في مستوى الاستقرار، وانتقل الإلكترون إلى مستوى طاقة أعلى نتيجة امتصاصه فوتونًا ذا طاقة معينة، هنا تصبح الذرة في مستوى إثارة، لكنّها تعود إلى مستوى الاستقرار ببعث فوتون طاقته (E) تساوي الفرق بين طاقتي المستويين اللذين ينتقل بينهما.

وبذلك، فإنّ للأشعة المنبعثة طولًا موجيًّا (لونًا) محدّدًا. وكلّما تغيّر أحد المستويين أو كلاهما تتغيّر طاقة الفوتون المنبعث، ما يؤدّي إلى إشعاع الذرة ألوانًا مختلفة تكون غير متصلة؛ لأنّ مستويات الطاقة غير متصلة أيضًا. والشكل (13) يوضّح أطياف الانبعاث لذرات عناصر بعد إثارتها، منها عنصر الهيدروجين، كلٌّ منها يتكوّن من خطوط من الألوان غير المتصلة (المنفصلة) على خلفيّة سوداء، ويُسمّى **طيف الانبعاث الخطّي Emission line spectrum.**



الشكل (13): طيف الانبعاث الخطي لبعض العناصر.



الشكل (14):
(أ) طيف الامتصاص الخطي،
(ب) طيف الانبعاث الخطي لذرة الهيدروجين.

وإذا مُرِّر ضوء الشمس خلال غاز عنصر معيّن، فإنّ ذرات الغاز تمتص أطوالًا موجيّةً معيّنة فقط، وبتحليل الطيف النافذ لوحظ وجود خطوط معتمة منفصلة على خلفية مضيئة كما في الشكل (14/ أ)، ويُسمّى هذا الطيف **طيف الامتصاص الخطّي Absorption line spectrum**، والخطوط المعتمة ناتجة من فقدان أطوال موجيّة معينة امتصّتها ذرات الغاز، وهي تقابل تمامًا الخطوط المضيئة التي ظهرت في طيف الانبعاث الخطّي لذرات العنصر نفسه، ألاحظ الشكل (14/ ب)؛ لأنّ الأطوال الموجيّة المحدّدة من الطيف التي تمتصّها ذرات عنصر معيّن هي الأطوال الموجيّة نفسها التي تشعّها؛ لذا يُعدّ طيف العنصر صفة مميّزة خاصّة به كالبصمة للإنسان، ولا يمكن لعنصرين أن يكون لهما الطيف الخطّي نفسه.

✓ **أتحقّق:** ما الفرق بين الطيف الناتج من أشعة الشمس المرئيّة (ضوء الشمس) والطيف الناتج من غاز عنصرٍ ما عند عبور ضوء الشمس خلاله؟

نموذج بور وطيف ذرة الهيدروجين
Bohr's Model and the Hydrogen Spectrum

طيف ذرة الهيدروجين من أبسط الأطياف؛ لأنّها تحتوي على إلكترون واحد فقط، ويوضّح الشكل (15) الأطوال الموجيّة لطيف الانبعاث الخطي لذرة الهيدروجين في منطقة الضوء المرئي.

لقد نجح نموذج العالم بور في حساب الأطوال الموجيّة لطيف ذرة الهيدروجين. فعند انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة (n_i) إلى مستوى الطاقة (n_f)، فإنّ طاقة الفوتون (hf) بوحدة الجول، هي:

$$hf = |E_f - E_i| = 13.6\, e \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

الشكل (15): الأطوال الموجيّة لطيف الانبعاث الخطي لذرة الهيدروجين.

حيث e هي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون، وبالتعويض عن التردّد $f = \frac{c}{\lambda}$، وقسمة المعادلة على hc نحصل على:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{13.6\, e}{hc}\left|\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right|$$

المقدار $\frac{13.6\, e}{hc}$ يساوي $1.097 \times 10^7\ \mathrm{m^{-1}}$، قيمة ثابت يُسمّى ثابت ريدبيرغ (R_H)، لذا فإنّ:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left|\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right|$$

حيث (λ) الطول الموجي للفوتون المنبعث. وعلى الرغم من اتّفاق نتائج نموذج بور مع النتائج التجريبية لطيف ذرة الهيدروجين والأيونات ذات الإلكترون الواحد، فإنّه فشل في تفسير أطياف الذرات عديدة الإلكترونات.

أُفكّر: هل يمكن تفسير الأطياف الذريّة باستخدام مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية؟ أفسّر إجابتي.

✓ **أتحقّق:** هل نجح نموذج بور في التنبّؤ بالأطوال الموجيّة لطيف انبعاث ذرّة الهيدروجين؟

المثال 14

أجدُ طول موجة الفوتون المنبعِث عند انتقال إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الأول.

المُعطيات: $R_H = 1.097 \times 10^7\ \mathrm{m^{-1}},\ n_f = 1\ ,\ n_i = 2$

المطلوب: $\lambda = ?$.

الحلّ :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left|\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right| = 1.097 \times 10^7\left|\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right|$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \times \frac{3}{4} = 8.23 \times 10^6\ \mathrm{m^{-1}}$$

$$\lambda = 1.215 \times 10^{-7}\ \mathrm{m} = 121.5\ \mathrm{nm}$$

المثال 15

أجـدُ الأطـوال الموجيّـة للفوتونـات المنبعِثـة عند انتقـال إلكتـرون ذرة الهيدروجين من مسـتويات الطاقـة: الثالث، والرابـع، والخامـس، والسـادس إلـى مسـتوى الطاقـة الثاني. وأقـارن الأطـوال الموجيّة التـي حصلـت عليها بتلك الموجـودة فـي الشـكل (15)، وفـي ضوء ذلـك أصـدر حُكمًا علـى صحة نمـوذج بور.

المُعطيات: $R_H = 1.097 \times 10^7\ \text{m}^{-1},\ n_f = 2,\ n_i = 3, 4, 5, 6$

المطلوب: $\lambda = ?$.

الحلّ :

أحسب طول موجـة الفوتون المنبعث عند انتقال الإلكترون من مستوى الطاقـة الثالث إلى مستوى الطاقـة الثاني من العلاقة الآتية:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left| \frac{1}{n_{\text{f}}^2} - \frac{1}{n_{\text{i}}^2} \right| = 1.097 \times 10^7 \left| \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right|$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.523 \times 10^6\ \text{m}^{-1}$$

$$\lambda = 6.563 \times 10^{-7}\ \text{m} = 656.3\ \text{nm}$$

نكرّر العملية عندما $n_i = 4, 5, 6$

n_{i}	3	4	5	6
λ القيم المحسوبة	656.3 nm	486.2 nm	434.1 nm	410.2 nm
λ القيم التجريبيّة	656.2 nm	486.1 nm	434.0 nm	410.1 nm

نلاحظ أنّ الأطوال الموجيّة تقع كلّها ضمن الأطوال الموجيّة للطيف المرئي، وأنّ القيم المحسوبة من علاقة بور قريبة جدًّا من القيم التجريبية، ما يدلّ على صحة نموذج بور لذرة الهيدروجين.

تمرين

انتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الأول، بحسب نموذج بور.
أحسبُ طول موجة الفوتون المنبعث وتردّده وطاقته وزخمه الخطيّ.

الطبيعة الموجيّة-الجُسيميّة المزدوجة Wave-Particle Duality

لقد تعلّمتُ أنّ بعض الظواهر المتعلقة بالضوء، مثل الحيود والتداخل يمكن تفسيرها بافتراض أنّ الضوءَ موجاتٌ كهرمغناطيسية. لكن توجد ظواهر أخرى، مثل: إشعاع الجسم الأسود، والظاهرة الكهرضوئية، وظاهرة كومبتون، والأطياف الذريّة لا يمكن تفسيرها إلّا على افتراض أنّ الضوء يتكوّن من جُسيمات (فوتونات) تمتلك زخمًا خطّيًّا يُحسب مقداره من العلاقة الآتية: $p = \frac{h}{\lambda}$

فـافترض العلماء أنّ للإشعـاع الكهرمغناطيسي طبيعـة **موجيّـة-جُسيميّـة مزدوجة Wave–particle duality of light**. وعلى غرار الطبيعة الموجيّة-الجسيميّة للإشعاع، اقترح العالم دي بروي de Broglie عام 1923 أنّ للأجسام الماديّة طبيعة موجيّة. واستخدم العلاقة السابقة في حساب الطول الموجيّ لجسم ما على النحو الآتي:

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

حيث λ: طول موجة دي بروي، ويُطلق عليها اسم الموجة المصاحِبة للجسم.

h: ثابت بلاك

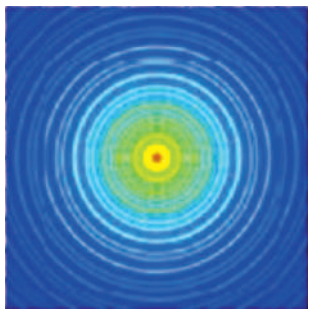
p: مقدار الزخم الخطّي للجسم.

m: كتلة الجسم

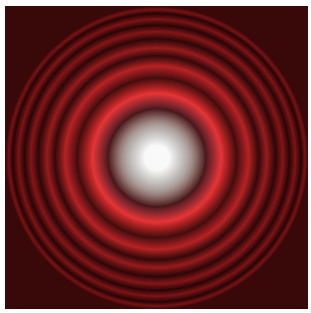
v: سرعة الجسم

ومن الجدير بالذكر أنّ الموجات المصاحِبة للأجسام ليست موجات ميكانيكية أو كهرمغناطيسية، وهي ذات أهميّة كبيرة في مجال فيزياء الكمّ. وعند حساب طول موجة دي بروي المصاحِبة لجسم كبير (جاهري)، نجد أنّها صغيرة جدًّا بل أصغر بكثير من أبعاد الجسم. وفي المقابل، فإنّ طول موجة دي بروي المُصاحِبة لجُسيم صغير مثل الإلكترون قريب من قيمة المسافة الفاصلة بين الذرات في الموادّ الصُّلبة، لذلك تمكّن العالمان دافسون Davisson وجيرمر Germer بعد ثلاث سنوات من وضع دي بروي لفرضيته من الكشف بالتجربة عن الطبيعة الموجيّة للإلكترونات عند إسقاط حزمة من الإلكترونات المسرّعة على بلورة من النيكل، حيث المسافة بين ذرات النيكل مُقارِبة لطول موجة دي بروي المصاحِبة للإلكترونات. وقد أظهرت نتائج التجربة وجود نمط حيود للإلكترونات كما في الشكل (16/ أ) الذي يشبه نمط حيود الضوء المبيَّن في الشكل (16/ ب).

✓ **أتحقّق:** أذكر فرضيّة دي بروي.



(أ)



(ب)

الشكل (16): نمط حيود
(أ) إلكترونات أُسقطت على بلورة من النيكل،
(ب)حزمة ضوئية أُسقطت على فتحة دائريّة.

الربط بعلوم الحياة

بعد اكتشاف الطبيعة الموجيّة للإلكترون، استُخدِمت في مجهر من نوع خاص الإلكترونات بدلًا من الضوء، يُسمّى مجهرًا إلكترونيًّا. يمكنه إظهار تفاصيل أدقّ للأجسام من المجهر الضوئي ما مكّن العلماء من رؤية الفيروسات والتفاصيل الدقيقة للخلية. أتأمّل الشكل.

المثال 16

أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة لـ:

أ . إلكترون سرعته $1.00 \times 10^6\ \text{m/s}$.

ب. رصاصة كتلتها $m_b = 50.0\ \text{g}$ تتحرك بسرعة $v_b = 400\ \text{m/s}$.

المُعطيات: $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s},\ m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg},\ v_e = 1.00 \times 10^6\ \text{m/s}$

$m_b = 50.0 \times 10^{-3}\ \text{kg},\ v_b = 400\ \text{m/s}$

المطلوب: $\lambda_e = ?,\ \lambda_b = ?$

الحلّ:

أ. $$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 1.00 \times 10^6} = 7.27 \times 10^{-10}\ \text{m} = 0.727\ \text{nm}$$

أُلاحظ أنّ طول موجة دي بروي المصاحِبة للإلكترون تقارِب المسافة الفاصلة بين الذرات في البلورات، لذلك يمكن ملاحظة نمط الحيود للإلكترونات كما في تجربة دافسون وجيرمر.

ب. $$\lambda_b = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{50.0 \times 10^{-3} \times 400} = 3.32 \times 10^{-35}\ \text{m} = 3.32 \times 10^{-26}\ \text{nm}$$

من الواضح أنّ طول موجة دي بروي المصاحبة للرصاصة صغير جدًّا حتى مع المقارنة بالمسافات الفاصلة بين الذرات في البلورات، لذلك لا يمكن مشاهدة نمط حيود للأجسام الجاهريّة.

المثال 17

تسارع إلكترون من السكون بفرق جهد مقداره (2.7 V) ، أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة له عند نهاية مدّة تسارُعه.

المُعطيات: $v_i = 0,\ h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J.s},\ m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg},\ \Delta V = 2.7\ \text{V}$

المطلوب: $\lambda_e = ?$

الحلّ:

أجد أولاً مقدار السرعة النهائيّة للإلكترون من العلاقة الآتية:

$$KE = \frac{1}{2} m_e v^2 = e\,\Delta V$$

$$\frac{1}{2} \times 9.11 \times 10^{-31} \times v^2 = 1.6 \times 10^{-19} \times 2.7$$

$$v = 0.97 \times 10^{6}\ \text{m/s}$$

ثمّ أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة له:

$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 0.97 \times 10^{6}} = 7.5 \times 10^{-10}\ \text{m} = 0.75\ \text{nm}$$

تمرين

1. طول موجة دي بروي لحزمة من الإلكترونات يساوي (2.24×10^{-10} m). أجد فرق الجهد المستَخدم في تسريع الإلكترونات.
2. ضربت مريم كرة تنس كتلتها (60 g) وقطرها (6.5 cm)، فتحرّكت بسرعة (25 m/s).
   أ . أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة لها.
   ب. أقارن بين طول موجة دي بروي وقطر كرة التنس.

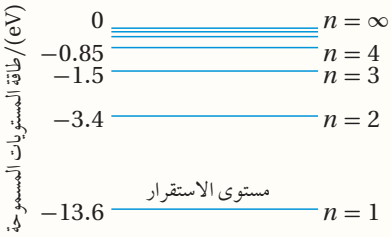
مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بكلٍّ من: طيف الامتصاص الخطّي، طيف الانبعاث الخطّي.

2. **أذكر** محدّدات نموذج بور.

3. **أستخدمُ الأرقام:** أجدُ الزخم الزاويّ وطاقة الإلكترون في المدار الرابع لذرة الهيدروجين.

4. **أحلّل الشكل:** إلكترون موجود في مستوى الاستقرار لذرة الهيدروجين. بالاعتماد على الشكل المجاور، أجدُ أصغر ثلاث قيم للطاقة يمكن لهذا الإلكترون أن يمتصّها.

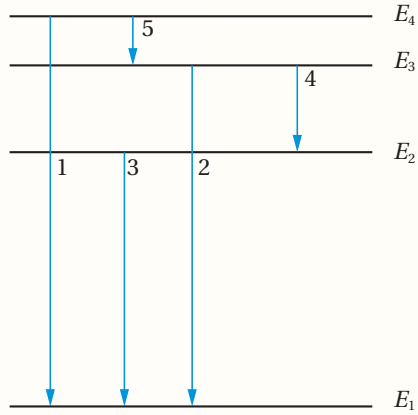


5. **أصنّف** الكميّات الفيزيائيّة الآتية: (الطول الموجيّ، التردّد، الطاقة، الزخم الخطّي) من حيث ارتباطها بالطبيعة الموجيّة أو الجُسيميّة للمادّة.

6. **أستنتج:** إلكترون في مستوى الطاقة الرابع لذرة الهيدروجين، ما الانتقالات التي يمكن أن يفقد بها الإلكترون طاقته، أوضّح ذلك على رسم لمستويات الطاقة.

7. **أحسب** طول موجة الإشعاع اللازم لنقل إلكترون من مستوى الاستقرار لذرة الهيدروجين إلى مستوى الطاقة الثالث.

8. **أحلّل الشكل:** يمثّل الشكل المجاور مستويات الطاقة المسموح بها لإلكترون في ذرة ما، والانتقالات بين مستويات الطاقة (الأرقام من 1 إلى 5).



أ . أيّ الانتقالات ينتج عنه انبعاث فوتون بأكبر طول موجيّ؟

ب. أيّ الانتقالات ينتج عنه انبعاث فوتون بأكبر طاقة؟

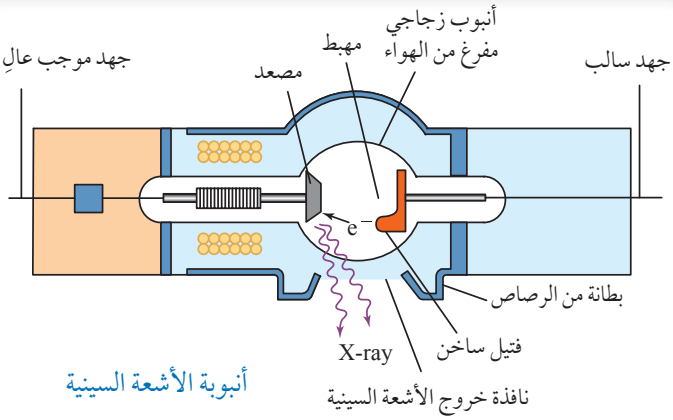
جـ. أيّ الانتقالات ينتج عنه انبعاث فوتون بأقلّ تردّد؟

9. **أستخدم الأرقام:** بروتون طاقته (10 MeV)، أجد طول موجة دي بروي المصاحِبة له حيث كتلة البروتون (1.67×10^{-27} kg).

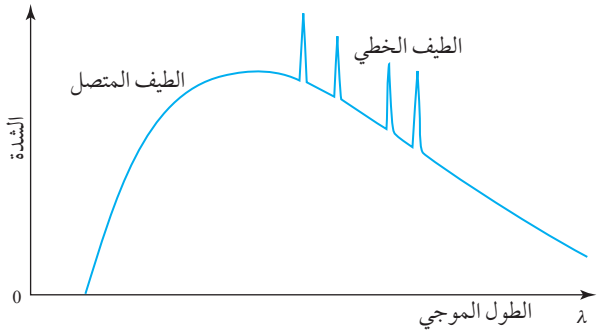
الفيزياء والطبّ: الأشعة السينيّة
Physics in Medicine: X-Ray

لاحظ العالم رونتغن أنّ أشعة ذات طاقة كبيرة (أطوال موجيّة قصيرة $\lambda = 10^{-11} - 10^{-8}\ m$) تنبعث من سطح فلزّ عند اصطدام إلكترونات ذات طاقة عالية به، أطلق عليها اسم الأشعة السينيّة X–ray.

ويتكوّن أنبوب الأشعة السينيّة المبيَّن في الشكل المجاور من أنبوب مفرَّغ من الهواء يحتوي على فتيل فلزيّ تنبعث منه إلكترونات عند تسخينه. تُسرَّع الإلكترونات المنبعِثة من الفتيل باستخدام فرق جهد كهربائي كبير لتصطدم بعدها بالمِصعد، وهو مادّة فلزيّة فتنبعث منه الأشعة السينيّة. وقد وجد أنّ طيف الأشعة السينية يتكوّن من طيف متّصل وطيف خطّي كما في الشكل المجاور. عند اقتراب الإلكترونات المُسرَّعة من ذرات المِصعد تتباطأ بفعل القوّة الكهربائية، وتفقد جزءًا من طاقتها الحركية التي تظهر على شكل أشعة كهرمغناطيسية ذات طاقة متّصلة. وقد يصطدم أحد الإلكترونات المُسرّعة بأحد الإلكترونات في مستويات الطاقة الداخلية لذرة المصعد فيحرّره، ونتيجة لذلك، ينتقل إلكترون من المستويات الخارجية للطاقة لملء الفراغ الداخلي، ويصاحِب ذلك انبعاث فوتون بطاقة محدّدة تساوي فرق الطاقة بين المستويين، ويظهر ذلك على شكل طيف خطّي في طيف الأشعة السينيّة.

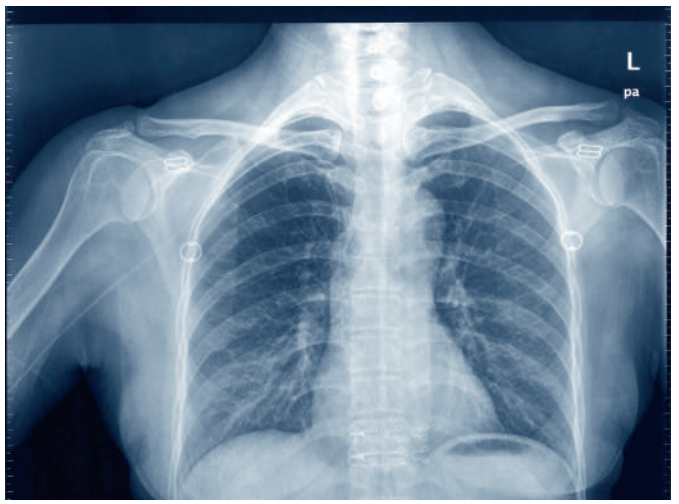


أنبوبة الأشعة السينية



الطيف الخطّي والمتصل للأشعة السينية.

تمتاز الأشعة السينيّة بقدرتها على النفاذ في الأوساط المادّية، ويعتمد ذلك على الوسط؛ فمثلًا قدرتها على النفاذ خلال الكتلة العضلية تكون أكبر من قدرتها على النفاذ خلال العظام. ولهذا السبب، استُخدمت الأشعة السينيّة في الطبّ لتصوير العظام داخل جسم الإنسان، كما في الشكل المجاور، والتحقّق من وجود كسور فيها.



صورة مأخوذة عن طريق الأشعة السينيّة للقفص الصدري.

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

1. أيٌّ ممّا يأتي يؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة من سطح فلزّ؟

أ . زيادة شدة الضوء الساقط على الفلزّ
ب. تقليل شدة الضوء الساقط على الفلزّ
جـ. زيادة تردّد الضوء الساقط على الفلزّ
د. تقليل تردّد الضوء الساقط على الفلزّ

2. وفقاً لتصوّر الفيزياء الكلاسيكية للظاهرة الكهرضوئية:

أ. تتحرّر الإلكترونات تحرّرًا فوريًّا.
ب. تزداد الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة بزيادة تردّد الضوء الساقط.
جـ. يستغرق تحرّر الإلكترونات بعض الوقت حتى تتمكّن من اكتساب الطاقة اللازمة للتحرّر.
د . لا تتحرّر الإلكترونات من سطح الفلزّ عند التردّدات العالية للضوء.

3. طبقًا لظاهرة كومبتون، فإنّ:

أ. سرعة الفوتونات الساقطة وتردّدها أكبر من سرعة وتردّد الفوتونات المشتَّتة.
ب. تردّد الفوتونات المشتَّتة أكبر من تردّد الفوتونات الساقطة.
جـ. طول موجة الفوتونات المشتَّتة أكبر من طول موجة الفوتونات الساقطة.
د . طاقة الفوتونات المشتَّتة أكبر من طاقة الفوتونات الساقطة.

4. إذا تضاعف الطول الموجيّ للفوتون مرتين فإنّ:

أ . طاقته تقلّ إلى النصف، وكذلك زخمه الخطي.
ب. طاقته تبقى ثابتة ويقلّ زخمه الخطي إلى النصف.
جـ. طاقته تتضاعف مرتين ويبقى زخمه الخطي ثابتًا.
د. طاقته تبقى ثابتة ويبقى زخمه الخطي كذلك.

5. يُحسب الزخم الخطي للفوتون من العلاقة الآتية:

أ. $m v$
ب. $E c$
جـ. $\frac{E}{c}$
د. $\frac{h}{f}$

6. شدّة الطاقة المنبَعثة من جسم أسود درجة حرارته مقارِبة لدرجة حرارة الشمس تكون:

أ. أكبر ما يمكن عند الأطوال الموجيّة الكبيرة جدًّا للإشعاع.
ب. أكبر ما يمكن عند الأطوال الموجيّة القصيرة جدًّا للإشعاع.
جـ. أكبر ما يمكن في منطقة الأطوال الموجيّة للضوء المرئي.
د . متساوية عند جميع الأطوال الموجيّة للإشعاع.

7. لم يتطابق نموذج رايلي–جينز مع نتائج التجربة لإشعاع الجسم الأسود في منطقة:

أ. الأطوال الموجيّة الكبيرة .
ب. الأطوال الموجيّة القصيرة.
جـ. الترددات الصغيرة.
د . الأطوال الموجيّة جميعها للإشعاع.

8. إذا انتقل إلكترون من مستوى الطاقة الرابع إلى مستوى الطاقة الثاني في ذرة الهيدروجين، فإنّ الفرق في الزخم الزاويّ للإلكترون بحسب نموذج بور، هو:

أ. $2\hbar$ ب. $3\hbar$ جـ. $\hbar$ د. $4\hbar$

9. يزداد طول موجة دي بروي المُصاحِبة لجُسيم إذا :

أ. زادت طاقته الحركيّة. ب. زادت كتلته. جـ. زادت سرعته. د. قلّ زخمه الخطّيّ.

10. يزداد عدد الإلكترونات المتحررة من سطح فلز عند سقوط ضوء عليه بزيادة:

أ. شدّة الضوء ب. تردّد الفوتون جـ. طول موجة الضوء د. طاقة الفوتون

11. عندما تتفاعل الفوتونات مع الإلكترونات كما في الظاهرة الكهرضوئية، فأيّ العبارات الآتية صحيحة؟

أ . يفقد الفوتون جزءًا من طاقته، ويزداد تردده.

ب. يفقد الفوتون جزءًا من طاقته، ويقلّ طول موجته.

جـ. يمتصّ الإلكترون طاقة الفوتون كلّها.

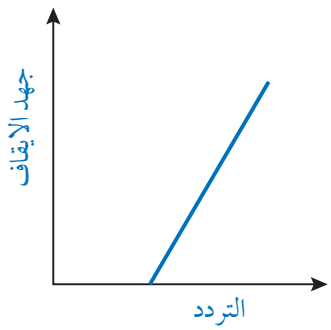
د. يفقد الفوتون جزءًا من طاقته، ويبقى تردّده ثابتًا.

12. أُسقط فوتونان مختلفان في التردّد على الفلزّ نفسه، فانطلق إلكترونان متساويان في الطاقة الحركيّة. فإنّ ذلك يعود إلى:

أ . أنّ الإلكترونين انطلقا من عمقين مختلفين من الفلزّ. ب. اختلاف اقتران الشغل.

جـ. اختلاف طاقة الفوتونين. د. اختلاف شدّة الضوء.

13. يمثّل الرسم البياني المجاور العلاقة بين جهد الإيقاف وتردّد الضوء الساقط في الخلية الكهرضوئية، ميل هذه العلاقة هو:



أ . h ب. $\frac{e}{h}$

جـ. $\frac{h}{e}$ د. $\frac{\Phi}{h}$

2. أستخدم المتغيّرات: إلكترون ذرة الهيدروجين زخمه الزاويّ $3\hbar$، أجد طاقته.

3. أستخدم المتغيّرات: سقط ضوء طول موجته (300 nm) على سطح فلزّ اقتران الشغل له (2.2 eV)، أجد ما يأتي:

أ. تردّد العتبة للفلزّ.

ب. الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

4. أُصدر حُكمًا: سقط ضوء على سطح فلزّ فتحرّرت منه إلكترونات، أُبيّن ما يحدث لعدد الإلكترونات المتحرّرة وطاقتها إذا:

أ . زادت شدّة الضوء مع بقاء تردّده ثابتًا.

ب. زاد تردّد الضوء مع بقاء شدّته ثابتة.

5. أناقش: إلكترون في مستوى الاستقرار لذرة الهيدروجين، أناقش ما يحدث للإلكترون إذا سقط عليه فوتون طاقتُه:

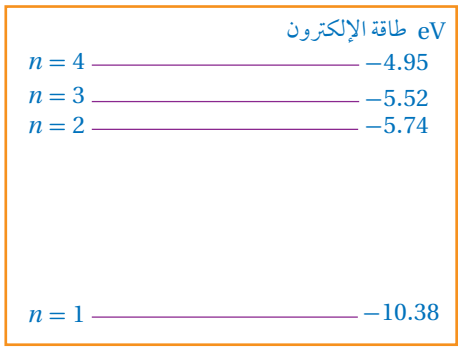
أ. 7.0 eV

ب. 12.1 eV

جـ. 20.0 eV

6. أتوقّع: إلكترون في مستوى الطاقة الثالث لذرة الهيدروجين، أتنبّأ بقيم الطاقة التي يمكن أن يخسرها الإلكترون.

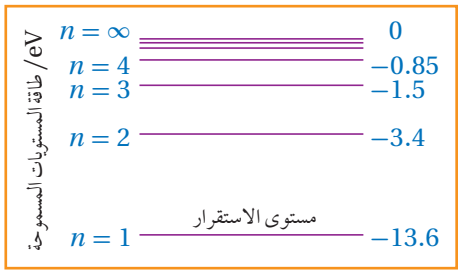
7. أحلّل الشكل: يبيّن الشكل المجاور بعض مستويات الطاقة لإلكترون في ذرة الزئبق:



أ. أجد أعلى طاقة فوتون يمكن أن ينبعث من الانتقالات بين هذه المستويات.

ب. أجد أقلّ طاقة فوتون يمكن أن ينبعث من الانتقالات بين هذه المستويات.

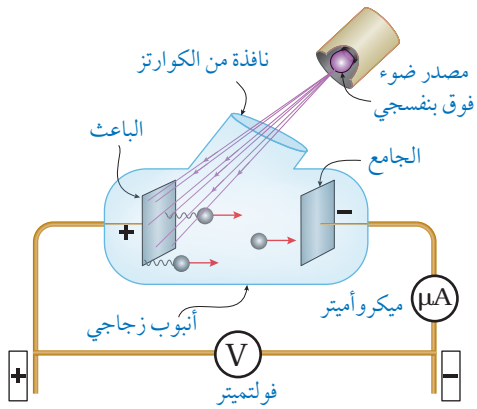
8. حلّ المشكلات: ظهر خط مُعتم في طيف الامتصاص لذرة الهيدروجين عند التردّد $(6.15 \times 10^{14}\ \text{Hz})$، بالاعتماد على مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين في الشكل، أُبيّن بالحسابات بينَ أيّ مستويي طاقة انتقل الإلكترون ليظهر هذه الخط المعتم.



9. أستخدم المتغيّرات: سُرِّعَ إلكترون بفرق جهد (ΔV)، أثبتُ أنّ طول موجة دي بروي المصاحِبة له يساوي $\frac{h}{\sqrt{2\,m\,e\,\Delta V}}$.

10. التفكير الناقد يمثّل الشكل المجاور تجربة لدراسة الظاهرة الكهرضوئية أجراها العالم لينارد، وكان تردّد الضوء الساقط $(8 \times 10^{14}\ \text{Hz})$. اعتمادًا على ذلك، أُجيب عمّا يأتي:

أ. أبيّن ماذا يحدث لقراءة الميكروأميتر عند زيادة فرق الجهد، وأناقشُ أفراد مجموعتي في سبب ذلك.



ب. عند فرق جهد (2 V) أصبحت قراءة الأميتر (صفرًا). فماذا يُسمّى فرق الجهد في هذه الحالة؟

جـ. أناقش أفراد مجموعتي في تأثير زيادة شدة الضوء في قراءة الميكروأميتر عندما تكون قراءته صفرًا.

د. أناقش أفراد مجموعتي في تأثير زيادة تردّد الضوء في قراءة الميكروأميتر عندما تكون قراءته صفرًا.

هـ. كيف تعارضت النتائج في (جـ) و(د) مع الفيزياء الكلاسيكية؟

و. أحسب تردّد العتبة لفلزّ الباعث.

11. يظهر في طيف امتصاص غاز الهيليوم (12) خطٌّ مُعتِم في منطقة الضوء المرئي:

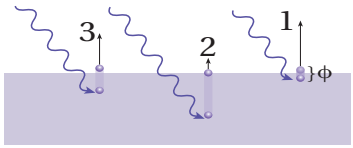
أ . **أفسّر** سبب ظهور هذه الخطوط.

ب. **أحسب:** أحدُ الخطوط يقابل الطول الموجيّ (686.7 nm)، أحسُب الطاقة التي امتصها الإلكترون لينتج هذا الخط بوحدة (eV).

12. أحسُب: سقط ضوء على سطح فلزٍّ، فكانت الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات المنبعثة (2 eV)، وكان أكبر طول موجيّ يتطلّبه تحرير إلكترونات من سطح الفلزّ يساوي (682 nm). أحسب ما يأتي:

أ . اقتران الشغل للفلز. ب. فرق جهد القطع (الإيقاف)

13. أفسّر: يبيّن الشكل المجاور توضيحًا بسيطًا للتصوّر الذي وضعه أينشتين للظاهرة الكهرضوئية.



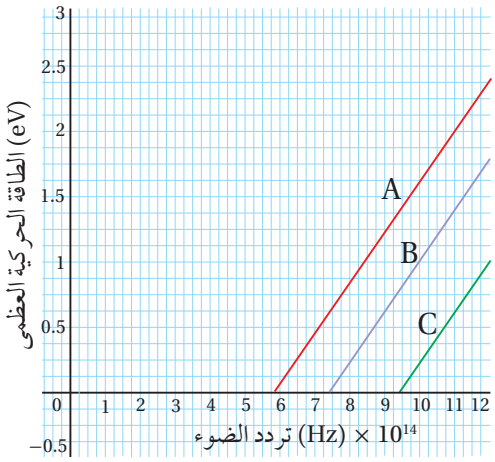
أ . ما فرضيته فيما يتعلق بالضوء؟

ب. ما علاقة عدد الإلكترونات المتحرّرة بشدة الضوء الساقط على الفلزّ؟

جـ. رتّب الطاقة الحركية للإلكترونات المتحرّرة (1،2،3) من الأصغر إلى الأكبر.

د . كيف فسّر أينشتين التفاوت في الطاقة الحركية للإلكترونات المتحرّرة؟

14. أحلّل رسمًا بيانيًّا: يمثّل الشكل المجاور رسمًا بيانيًّا لتغيّر الطاقة الحركيّة العظمى مع تردّد الضوء الساقط لثلاثة فلزّات مختلفة، اعتمادًا على الشكل أجيب عمّا يأتي:



أ . أفسّر توازي المنحنيات الثلاثة.

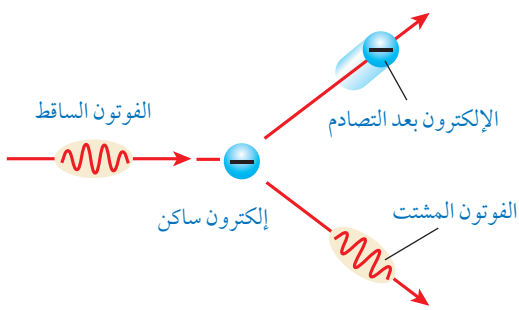
ب. أجد مقدار ثابت بلانك بوحدة (eV.s) وبوحدة (J.s) (أستخدم الخط A).

جـ. أجد اقتران الشغل للفلزِ (A).

د . إذا سقط ضوء تردّده (8×10^{14} Hz)، أُحدّد أيّ الفلزات الثلاثة تنطلق منه إلكترونات ضوئية. وأيّها تنطلق منه الإلكترونات بطاقة حركيّة عظمى أكبر.

هـ. أرتّب اقتران الشغل للفلزات تصاعديًّا من الأصغر إلى الأكبر.

15. أحلل: أسقط كومبتون أشعة سينيّة على هدف من الغرافيت كما في الشكل المجاور:



أ . أقارن بين الأشعّة المشتّتة والأشعّة الساقطة من حيث التردّد والطول الموجيّ والسرعة.

ب. ماذا تساوي طاقة الإلكترون بعد التصادم؟

16. أستخدم المتغيّرات: أجد النسبة بين الزخم الخطّي لفوتون طاقته (E)، والزخم الخطّي لإلكترون حرّ يملك الطاقة الحركية نفسها.

17. أذكر: للضوء طبيعة مزدوجة موجيّة–جُسيميّة، أذكر ظواهر فيزيائية تدلّ على أنّ للضوء طبيعة موجيّة، وظواهرَ أخرى تدلّ على أنّ له طبيعة جُسيميّة.

18. أستنتج: الأجسام كلّها في الغرفة تبعث أشعّة كهرمغناطيسيّة، فلماذا لا نستطيع رؤية هذه الأجسام في غرفة مُعتمة؟

19. أستخدم المتغيّرات: إذا كان الطول الموجيّ لفوتون قبل الاصطدام بإلكترون حرّ ساكن (60×10^{-9} m)، وبعد الاصطدام به صار (80×10^{-9} m)، أحسب مقدار ما يأتي:

أ . الزخم الخطيّ للفوتون قبل التصادم.

ب. الطاقة التي اكتسبها الإلكترون في أثناء عملية التصادم.

20. أفسّر اعتمادًا على النموذج الجُسيميّ للضوء:

أ . زيادة شدّة الضوء الساقط تؤدّي إلى زيادة التيار الكهرضوئيّ دون زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحرّرة.

ب. الانبعاث الفوري للإلكترونات من سطح الفلزّ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسيّ بتردّد مناسب على سطحه.

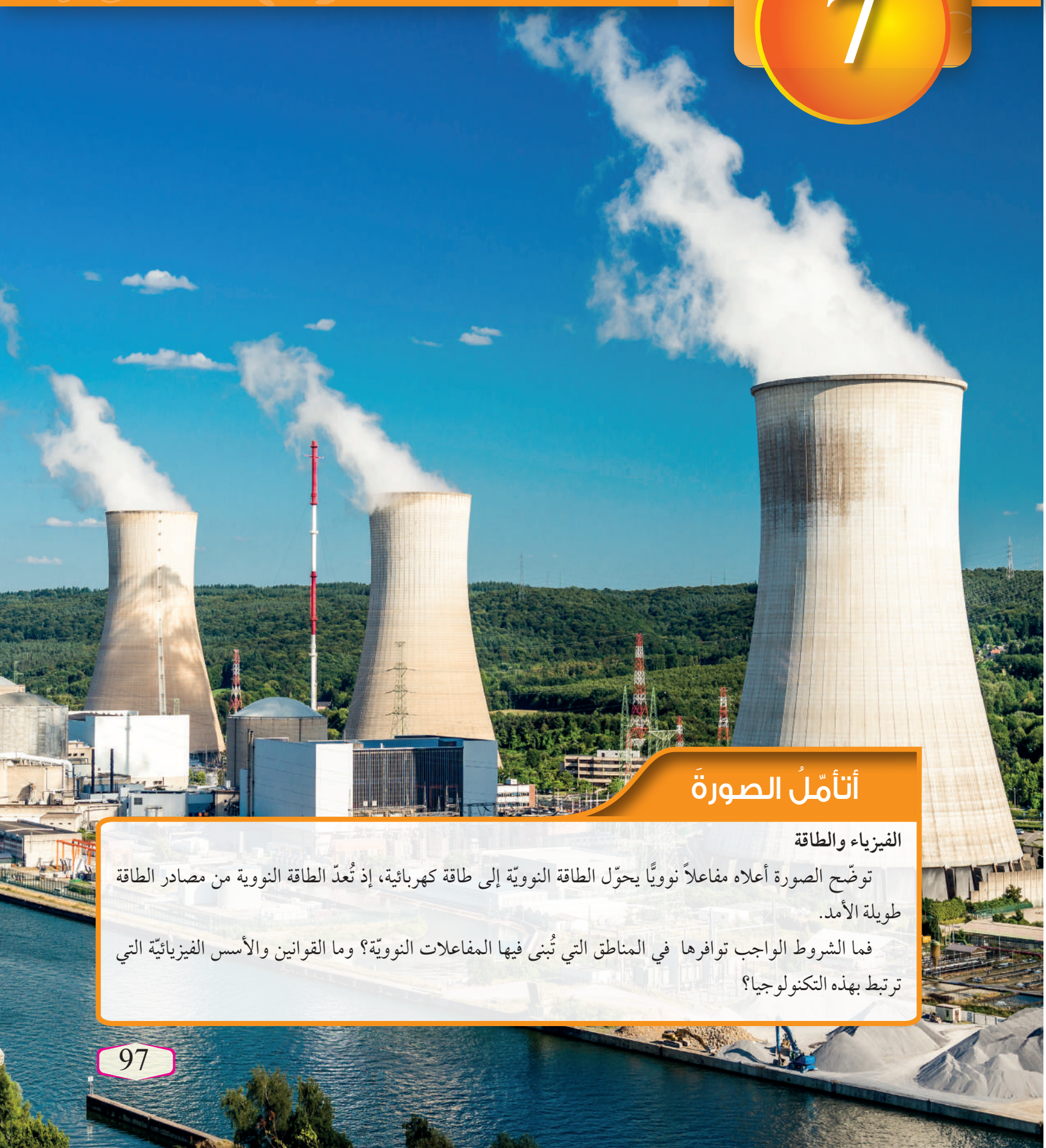
21. أفسر: سقطت حزمتان ضوئيتان بتردّدين مختلفين (f_1, f_2) على سطحي فلزّين مختلفين على الترتيب (X, Y)، اقتران الشغل لهما ($\Phi_X > \Phi_Y$)، فتحرّرت إلكترونات لها الطاقةُ الحركية العظمى نفسُها من سطحي الفلزّين، فأيُّ الحزمتين تردّدها أكبر؟ أفسّر إجابتي.

22. أستخدم المتغيرات: في الخلية الكهرضوئيّة، إذا كانت الطاقة الحركيّة العظمى للإلكترونات الضوئيّة المُنطلِقة من سطح فلزّ الباعث (1.6×10^{-19} J) جول عند سقوط ضوء طول موجته (380 nm)، أحسبُ ما يأتي :

أ . اقتران الشغل لفلزّ الباعث. ب. تردّد العتبة للفلزّ جـ. جهد الإيقاف.

الوحدة 7

الفيزياء النوويّة
Nuclear Physics



أتأمّلُ الصورةَ

الفيزياء والطاقة

توضّح الصورة أعلاه مفاعلاً نوويًّا يحوّل الطاقة النوويّة إلى طاقة كهربائية، إذ تُعدّ الطاقة النووية من مصادر الطاقة طويلة الأمد.

فما الشروط الواجب توافرها في المناطق التي تُبنى فيها المفاعلات النوويّة؟ وما القوانين والأسس الفيزيائيّة التي ترتبط بهذه التكنولوجيا؟

الفكرةَ العامةُ:

للفيزياء النوويّة تطبيقات كثيرة في حياتنا تشمل توليد الطاقة الكهربائية، وتشخيص الأمراض وعلاجها، وتدخل في كثير من التطبيقات الصناعية.

الدرسُ الأولُ: تركيب النواة وخصائصها

Nucleus Structure and its Properties

الفكرةُ الرئيسةُ: تتكوّن النواة من بروتونات ونيوترونات. وفي الطبيعة بعض النوى تكون مستقرة، وبعضها الآخر يكون مُشعًّا.

الدرسُ الثاني: الإشعاع النوويّ الطبيعي

Natural Nuclear Radiation

الفكرةُ الرئيسةُ: تبعث النوى غير المستقرة إشعاعات بطاقات مختلفة، ولهذه الإشعاعات مزايا ولها أيضًا أخطار.

الدرس الثالث: التفاعلات النوويّة

Nuclear Reactions

الفكرة الرئيسة: للتفاعلات النوويّة تطبيقات مهمّة في الحياة مثل توليد الطاقة، وإنتاج النظائر المُشعّة التي تُستخدم في تشخيص الأمراض وعلاجها، وفي كثير من التطبيقات الصناعية.

استقصاء التفاعل المتسلسل

(أ)

المواد والأدوات: 15 قطعة من قطع الدومينو، ساعة توقيت ، قُفّازان، نظارة واقية.

إرشادات السلامة: ارتداء القُفّازين والنظارة الواقية.

خطوات العمل:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أُنفِّذ الخطوات الآتية:

النموذج الأول:

1. أرتّب قطع الدومينو كما في الشكل (أ)، على أن تكون كل قطعة مواجِهة لقطعتين من الدومينو.

(ب)

2. **أقيس:** أضرب بسبّابتي الطرف العلوي للقطعة الأولى على أن تسقط نحو القطعتين المقابِلتين لها، وأقيس الزمن اللازم لسقوط القطع جميعها، وأسجّل الزمن في الجدول.

3. أكرّر الخطوتين السابقتين ثلاث مرات، وأحسب متوسط الزمن.

النموذج الثاني:

4. **أقيس:** أرتّب قطع الدومينو مرة أخرى كما في الشكل (ب) على أن تُسقِط القطعة الأولى قطعتي الدومينو في الصف الثاني، وتُسقِط قطعة واحدة من الصف الثاني قطعتي الدومينو في الصف الثالث، وهكذا دواليك. ثم أقيس الزمن اللازم لسقوط القطع جميعها، وأسجّل الزمن في الجدول.

5. أكرّر الخطوة السابقة ثلاث مرات لحساب متوسط الزمن اللازم لسقوط القطع جميعها.

التحليل والاستنتاج:

1. **أقارن** بين المتوسط الزمني لسقوط القطع جميعها في النموذجين.

2. **أستنتج:** أفترض أنّ كل قطعة دومينو تنتج طاقة عند سقوطها. فأيّ النموذجين تكون كميّة الطاقة الناتجة في وحدة الزمن أكبر؟

3. **أحلّل:** أتخيّل أنّ كل قطعة دومينو تسقط تمثّل انشطار نواة، فأيّ النموذجين يمثّل تفاعلًا يمكن السيطرة عليه؟

الدرسُ 1

تركيب النواة وخصائصها

Nucleus Structure and its Properties

الفكرةُ الرئيسةُ:

تتكوّن النواة من بروتونات ونيوترونات. وفي الطبيعة بعض النوى تكون مستقرة، وبعضها الآخر يكون مشعًّا.

نتاجاتُ التعلّمِ:

- أميز بين العدد الذري والعدد الكتلي لعنصر ما.
- أنفّذ استقصاءً باستخدام رسوم توضيحية لتحديد مكوّنات النواة الأساسية، مُحدِّدًا خصائص كلٍّ منها من حيث الكتلة والشحنة وعدد كل منها.
- أحلّل منحنى الاستقرار النووي.
- أحسب متوسط طاقة الربط النووية لنواة عنصر بدلالة النقص في كتلة مكوّنات النواة.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

نيوكليون	Nucleon
العدد الذريّ	Atomic Number
العدد الكتلي	Mass Number
النظائر	Isotopes
وحدة الكتلة الذريّة	Atomic Mass Unit
نطاق الاستقرار	Stability Valley
طاقة الربط النوويّة	Nuclear Binding Energy
قوة نوويّة قوية	Strong Nuclear Force

الجدول (1):
كتلة كلٍّ من البروتون والنيوترون والإلكترون.

الجُسيم	الكتلة (kg)	الكتلة (*amu*)
إلكترون	9.1094×10^{-31}	0.000549
بروتون	1.672619×10^{-27}	1.007276
نيوترون	1.674929×10^{-27}	1.008665

بِنية النَّواة Structure of the Nucleus

تتكوّن الذرّة من نواة موجبة الشحنة تتحرّك حولها إلكترونات سالبة الشحنة، ونظرًا إلى أنّ الذرة متعادلة كهربائيًّا، فإنّ شحنة النواة الموجبة تساوي عدديًّا شحنة الإلكترونات السالبة. وعلى الرغم من أنّ حجم النواة صغير جدًّا مقارنة بحجم الذرة، فإنّ معظم كتلة الذرة تتركز في النواة على نحو ما بيّنت نتائج تجربة رذرفورد.

تتكوّن النواة من نوعين من الجُسيمات؛ بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة، وكتلة النيوترون مقاربة لكتلة البروتون، ويُطلق اسم **نيوكليون Nucleon** على كلٍّ من البروتون والنيوترون.

يُطلق على عدد البروتونات داخل النواة اسم **العدد الذري Atomic number** ويُرمز إليه بالرمز Z، في حين يُسمّى مجموع عدد البروتونات والنيوترونات داخل النواة **العدد الكتلي Mass number** ويُرمز إليه بالرمز A. والعدد الذري يعبّر عن شحنة النواة، ويساوي عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة. ويُعبَّر عن نواة أيّ عنصر برمزه الكيميائي، إضافة إلى عددها الذري وعددها الكتلي على النحو الآتي:

$${}^{A}_{Z}X$$

حيث X تمثّل الرمز الكيميائي للعنصر.

وتتساوى نوى عنصر معيّن في عددها الذري، ولكنّها قد تختلف في عددها الكتلي؛ بسبب اختلاف عدد النيوترونات فيها، وتُسمّى **نظائر Isotopes**. ومثال ذلك ${}^{12}_{6}C$ و ${}^{14}_{6}C$، وهي ذرات للعنصر (الكربون) نفسه كونها تمتلك العدد الذريّ نفسه.

ونظرًا إلى صغر كتل النوى، فإنّ وحدة الكيلوغرام (kg) غير مناسبة للتعبير عن كتلها؛ لذا عُرِّفت وحدة كتلة جديدة تتناسب مع كتل النوى تُسمّى **وحدة الكتلة الذرية Atomic mass unit (*amu*)**، وتساوي $\frac{1}{12}$ من كتلة نظير الكربون 12 $\left({}^{12}_{6}C\right)$:

$$1\ amu = 1.660539 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

ويوضّح الجدول (1) كتلة كل من البروتون والنيوترون والإلكترون، بوحدة الكيلوغرام ووحدة الكتل الذرية (*amu*) حيث أُضيف الإلكترون من أجل المقارنة.

✓ **أتحقّق:** أُعرّف العدد الكتليّ والعدد الذريّ للنواة.

كثافة النواة Density of the Nucleus

معظم النوى تأخذ شكلاً كرويًّا تقريبًا، وقد أثبتت التجارب العملية أنّ نصف قطر النواة (r) يتناسب مع الجذر التكعيبي لعددها الكتلي:

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

حيث r_0: ثابت يساوي تقريبًا $1.2 \times 10^{-15}\ \text{m}$

وعليه، فإنّ حجم النواة (V) يتناسب طرديًّا مع عددها الكتلي:

$$V = \frac{4\pi}{3} r^3 = \frac{4\pi}{3} r_0^3 A$$

ونظرًا إلى أنّ النواة تتكوّن من نيوكليونات (بروتونات ونيوترونات) كتلها متقاربة، فإنّه يمكن التعبير عن كتلة النواة بدلالة كتلة النيوكليون على النحو الآتي:

$$m = m_{\text{nuc}} A$$

حيث m_{nuc}: متوسط كتلة النيوكليون وتساوي تقريبًا $(1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg})$.

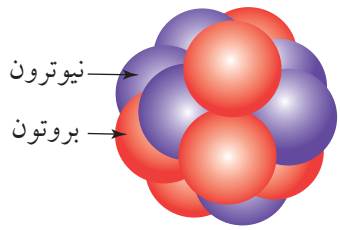
وبقسمة كتلة النواة على حجمها أجد أنّ كثافة النواة لا تعتمد على عددها الكتلي، ما يعني أنّ كثافة المادّة النووية عند مركز النواة متساوية في النوى جميعها، وهي كثافة كبيرة جدًّا تساوي تقريبًا $(2.3 \times 10^{17}\ \text{kg/m}^3)$، فلو افترضنا أنّ الأرض مصنوعة من مادّة نووية فقط (نيوكليونات)، لكانت كرة نصف قطرها تقريبًا 180 m فقط.

أفكّر: هل تختلف النظائر بعضها عن بعض في الخصائص الكيميائيّة أم الفيزيائية؟

أتحقّق: هل تزداد كثافة النواة بزيادة العدد الكتلي أم تبقى ثابتة؟ أفسّر إجابتي.

المثال 1

يمثّل الشكل (1) رسما تخطيطيا لنواة عنصر الكربون ورمزه C، حيث تمثّل الكرات الحمراء البروتونات، والكرات الزرقاء النيوترونات. باستخدام الشكل المجاور أجد ما يأتي: العدد الذريّ، الشحنة الكهربائية للنواة، عدد النيوترونات، العدد الكتلي، عدد النيوكليونات.



الشكل (1): نواة الكربون.

المُعطيات: الشكل

المطلوب: $Z = ?\ ,\ A = ?\ ,\ N = ?\ ,\ q = ?$

الحلّ:

العدد الذريّ يساوي عدد البروتونات وهو: $Z = 6$

الشحنة الكهربائية للنواة: $q = Ze = 6 \times 1.6 \times 10^{-19} = 9.6 \times 10^{-19}\text{C}$

عدد النيوترونات: $N = 6$

العدد الكتلي للنواة: $A = Z + N = 6 + 6 = 12$، وهو يساوي عدد النيوكليونات.

لذا تُكتب النواة على الشكل: ${}^{12}_{6}C$

المثال 2

أجد لكلٍّ من النوى الآتية العدد الذريّ والعدد الكتليّ، وعدد النيوكليونات والنيوترونات، وأضعها في جدول:
$^{16}_{8}O$, $^{17}_{8}O$, $^{206}_{82}Pb$, $^{208}_{82}Pb$

المُعطيات: $^{16}_{8}O$, $^{17}_{8}O$, $^{206}_{82}Pb$, $^{208}_{82}Pb$

المطلوب: Z , A , N

الحلّ:

النواة	Z	N	A	عدد النيوكليونات
$^{16}_{8}O$	8	8	16	16
$^{17}_{8}O$	8	9	17	17
$^{206}_{82}Pb$	82	124	206	206
$^{208}_{82}Pb$	82	126	208	208

المثال 3

أجد كتلة البروتون بوحدة الكتلة الذريّة.

المُعطيات: كتلة البروتون $m_p = 1.672622 \times 10^{-27}\ \text{kg}$ من جدول (1).

المطلوب: $m_p = ?$ بوحدة amu.

الحلّ:

$$m_p = 1.672622 \times 10^{-27}\ \text{kg} \times \frac{1\ amu}{1.660539 \times 10^{-27}\ \text{kg}} = 1.007276\ amu$$

المثال 4

أجد نسبة نصف قطر النواة $^{A}_{Z_1}X$ إلى نصف قطر النواة $^{8A}_{Z_2}Y$.

المُعطيات: $A_X = A, A_Y = 8A$

المطلوب: $\frac{r_X}{r_Y}$

الحلّ:

$$\frac{r_X}{r_Y} = \frac{r_0\sqrt[3]{A_X}}{r_0\sqrt[3]{A_Y}} = \frac{\sqrt[3]{A}}{\sqrt[3]{8A}} = \frac{1}{\sqrt[3]{8}} = \frac{1}{2}$$

نطاق الاستقرار Stability Valley

تتكوّن النواة من نيوترونات متعادلة الشحنة، وبروتونات موجبة الشحنة محصورة في حيّز صغير جدًّا، وتؤثر البروتونات بعضها في بعض بقوة تنافر كهربائيّة. ولو كانت قوة التنافر الكهربائية هي القوة الوحيدة التي تؤثر في البروتونات، لانفصلت وابتعد بعضها عن بعض، فما الذي يمنع النواة من التفكك؟ لا بدّ من وجود قوة تجاذب بين البروتونات لتتغلّب على قوة التنافر الكهربائية، وهذه القوة هي **القوة النووية القويّة Strong nuclear force**. وسنكتفي في هذا الكتاب بتسميتها قوة نووية، وهي قوة تجاذب كبيرة بين النيوكليونات، ولا تعتمد على الشحنة الكهربائية؛ أيْ إنّها تكون قوة تجاذب بين: بروتون وبروتون، بروتون ونيوترون، نيوترون ونيوترون. والقوة النووية قصيرة المدى لا يظهر تأثيرها إلا إذا كانت النيوكليونات قريبة جدًّا بعضها من بعض. فإذا زادت المسافة بين نيوكليون وآخر عن 3 fermi تقريبًا، فإنّ القوة النووية تنعدم بينهما، علماً أنّ ($1\ \text{fermi} = 10^{-15}\ \text{m}$)، حيث تُستخدم هذه الوحدة في الفيزياء النووية نظرًا إلى أنّ المسافات متناهية في الصغر على مستوى الأبعاد النووية.

يوجد في الطبيعة العديد من النوى المستقرة التي تبقى على حالها بمرور الزمن، ويوجد أيضًا نوى أخرى غير مستقرة قد تفقد طاقة أو تشعّ جُسيمات نوويّة، وتتحوّل إلى نوى أخرى أكثر استقرارًا، على نحو ما سأتعلّم لاحقًا. فما الذي يجعل بعض النوى مستقرًّا، وبعضها الآخر غير مستقر؟ إن استقرار النواة يخضع لعوامل عدّة؛ أحدها نسبة عدد النيوترونات إلى عدد البروتونات في النواة، فلا يمكن لنواة تحتوي على البروتونات فقط (باستثناء ذرة الهيدروجين التي تتكوّن نواتها من بروتون واحد فقط) أن تكون مستقرة؛ لأنّ قوة التنافر الكهربائية بين البروتونات ستؤدي إلى عدم استقرار النواة؛ لذا حتى تكون النواة مستقرة فلا بدّ من أن تحتوي على عدد مناسب من النيوترونات. والنيوترونات متعادلة كهربائيًّا؛ لذا فإنها تسهم في إضافة قوة تجاذب نووية دون أن تزيد من قوة التنافر الكهربائية داخل النواة. ما يعني أن نسبة عدد النيوترونات إلى عدد البروتونات عامل مهمّ في استقرار النواة. ولمعرفة المزيد عن هذا العامل، أتأمّل نسبة عدد النيوترونات إلى عدد البروتونات $\frac{N}{Z}$ لبعض النوى المستقرة المبينة في جدول (2)، وأستقصي هذه النسبة.

الجدول (2): نسبة عدد النيوترونات إلى عدد البروتونات لبعض النوى المستقرة.

النواة	عدد البروتونات (Z)	عدد النيوترونات (N)	النسبة $\frac{N}{Z}$
${}^{12}_{6}C$	6	6	1
${}^{16}_{8}O$	8	8	1
${}^{40}_{20}Ca$	20	20	1
${}^{56}_{26}Fe$	26	30	1.15
${}^{120}_{50}Sn$	50	70	1.4
${}^{208}_{82}Pb$	82	126	1.54

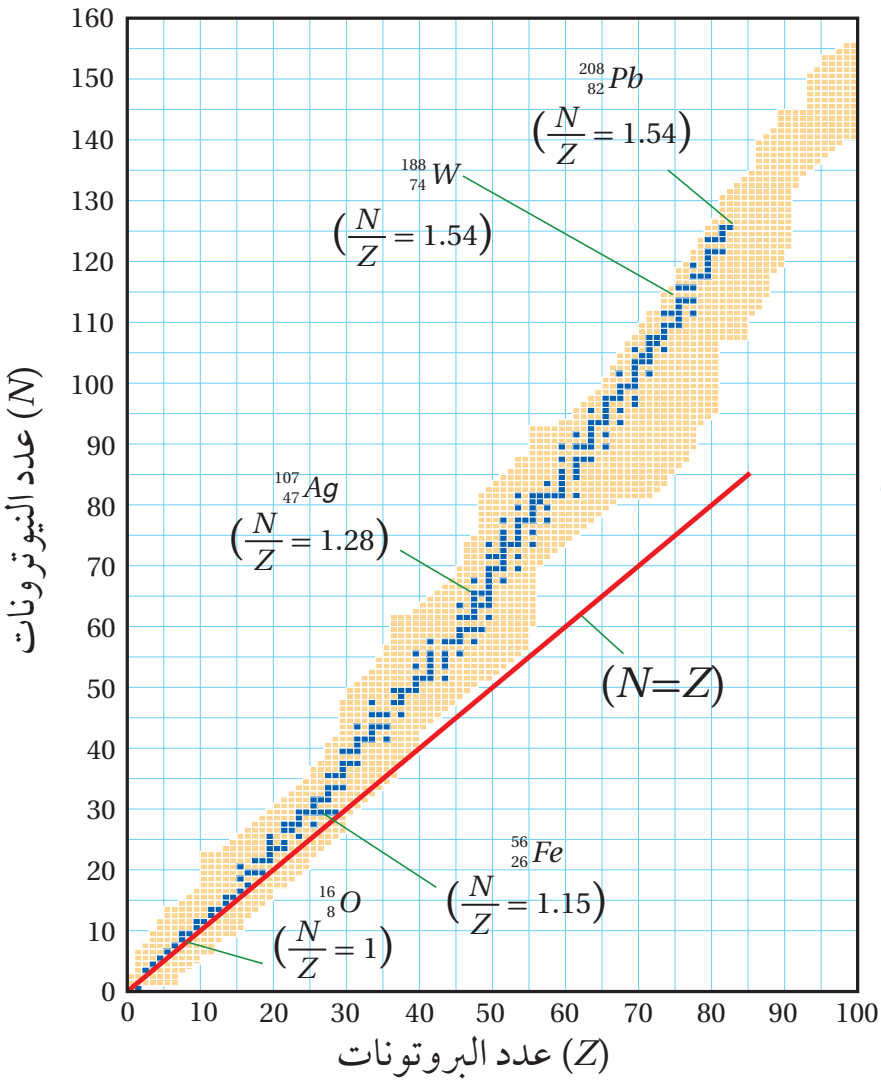
أُلاحظ من الجدول (2) ما يأتي:

1 . بعض النوى المستقرة التي يقلّ عددها الذري عن 20 أو يساويه مثل ${}^{12}_{6}C$ تمتلك العدد نفسه من البروتونات و النيوترونات.

2 . النوى المستقرة التي عددها الذري أكبر من 20 وأقل من 83 تحوي عددًا من النيوترونات أكبر من عدد البروتونات.

3 . تزداد نسبة $\frac{N}{Z}$ مع زيادة العدد الذري للنوى المستقرة التي يقع عددها الذري بين 20 و 83.

وعند تمثيل العلاقة بين عدد البروتونات وعدد النيوترونات للنوى بيانيًّا، نحصل على منحنى يُسمى منحنى $(N-Z)$. أتأمّل الشكل (2)، حيث مثّلت النوى المستقرة بنقاط زرقاء في حين تمثل النقاط الصفراء النوى غير المستقرّة، ويُلاحظ من الشكل (2) أنّ النوى المستقرة تقع ضمن نطاق ضيق يُسمّى **نطاق الاستقرار Stability valley** ممثلا بالنقاط الزرقاء.



الشكل (2): توزيع النوى بحسب عدد البروتونات والنيوترونات ونطاق الاستقرار.

أُلاحظ من الرسم أنّ معظم النوى المستقرة التي عددها الذري ($Z \leq 20$) لها نسبة ($\frac{N}{Z} = 1$) مثل ${}^{12}_{6}C$، ${}^{16}_{8}O$ و ${}^{40}_{20}Ca$، وهناك نوًى مثل ${}^{7}_{3}Li$ نسبة $\frac{N}{Z}$ لها لا تساوي 1، وبزيادة عدد البروتونات تزداد قوة التنافر بينها، فيتطلّب ذلك عددًا أكبر من النيوترونات لجعل القوة النووية هي القوة السائدة في النواة ما يؤدي إلى استقرارها. وتزداد قيمة النسبة $\frac{N}{Z}$ بزيادة عدد البروتونات لتصل إلى 1.54 تقريبًا لنواة الرصاص ${}^{208}_{82}Pb$. إنّ امتلاك نواة الرصاص 126 نيوترونًا مقابل 82 بروتونًا يسهم في زيادة القوة النووية؛ كي تتغلب على قوى التنافر الكهربائية المتبادلة بين البروتونات، ما يؤدي إلى استقرار النواة.

ولا يوجد نوى مستقرة عددها الذري ($Z > 82$)؛ لأنّ عدد البروتونات يصبح كبيرًا، فتزداد قوة التنافر الكهربائية إلى حدٍّ يؤدي إلى عدم استقرار النواة. إنّ إضافة بروتون واحد يؤدي إلى زيادة كبيرة في مقدار قوة التنافر الكهربائي؛ لأنّه يتنافر مع 82 بروتونًا، أمّا إضافة نيوترون واحد فلا يضيف إلّا قليلًا من قوة التجاذب النووية؛ لأنّها قوة قصيرة المدى، والنيوترون الإضافي يتفاعل مع النيوكليونات القريبة منه فقط.

أُفكّر: أيّهما أكبر القوة النووية المؤثرة في نيوكليون موجود على سطح النواة أم المؤثّرة في نيوكليون موجود داخل النواة؟ أفسّر ذلك.

✓ **أتحقّق:** ما نسبة $\frac{N}{Z}$ التي تستقرّ عندها النوى التي يقلّ عددها الذري عن 20؟

طاقة الربط النوويّة Nuclear Binding Energy

بيّن العالم أينشتين عام 1905 أنّ الطاقة (E) ترتبط بالكتلة (m) بالعلاقة الآتية:

$$E = mc^2$$

حيث c: سرعة الضوء في الفراغ $c = 3 \times 10^8$ m/s

و E: الطاقة المكافئة للكتلة بوحدة الجول (J)

و m: كتلة الجسم بوحدة (kg)

وتُسمّى العلاقة السابقة تكافؤَ (الكتلة – الطاقة).

خلُص أينشتين إلى أنّ كتلة الجسم هي مقياس لمحتوى الجسم من الطاقة وتتحوّل الكتلة إلى طاقة أو العكس بحسب العلاقة $E = \Delta mc^2$، حيث Δm تمثّل التغيّر في كتلة الجسم. وهذه التغيّرات يمكن ملاحظتها على مستوى الأجسام الذريّة أو دون الذريّة (دون الجاهرية) على نحو ما هو موجود في التفاعلات النووية. وعليه، فإنّه عند دراسة التغييرات على المستوى دون الجاهري لا بدّ من تطبيق مبدأ حفظ (الكتلة –الطاقة) بدلًا من مبدأ حفظ الطاقة.

ونظرًا إلى أنّ سرعة الضوء كبيرة جدًّا، فإنّ تغيّرًا صغيرًا جدًّا في الكتلة ينتج عنه مقدار كبير من الطاقة. فتغيُّر الكتلة بمقدار ($1\ amu = 1.660539 \times 10^{-27}$ kg) ينتج منه طاقة مقدارها (1.494449×10^{-10} J)، وهذا يساوي (931.5 MeV) تقريبًا، أيْ أنّ:

$$1\ amu = 931.5\ \text{MeV}$$

وبذلك عند استخدام الكتلة بوحدة (amu)، يمكن كتابة معادلة تكافؤ (الكتلة – الطاقة) على الصورة:

$$E = \Delta m \times 931.5\ \text{MeV}$$

ومن الناحية العمليّة، فهذه الصورة لمعادلة تكافؤ (الكتلة–الطاقة) هي المستخدمة في الحسابات النووية.

✓ **أتحقّق:** أكتب بالرموز علاقة تكافؤ (الكتلة – الطاقة).

ترتبط النيوكليونات داخل النواة بعضها ببعض بقوة التجاذب النووية القوية. ولفصل النيوكليونات بعضها عن بعض يجب تزويدها بطاقة تمكّنها من التغلّب على قوة التجاذب النووية. وتُعرّف **طاقة الربط النووية Nuclear binding energy (*BE*)** بأنّها الطاقة التي يجب تزويدها للنواة لفصل مكوّناتها (النيوكليونات) بعضها عن بعض نهائيًّا.

إنّ الفرق بين كتلة النواة ومجموع كتل مكوّناتها مضروبًا بمربع 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

و m_p: كتلة البروتون

و m_n: كتلة النيوترون

علما أنّ مجموع كتل مكوّنات النواة دائمًا أكبر من كتلة النواة.

وتُحسب طاقة الربط النووية (BE) بوحدة (MeV) لأيّ نواة من العلاقة الآتية:

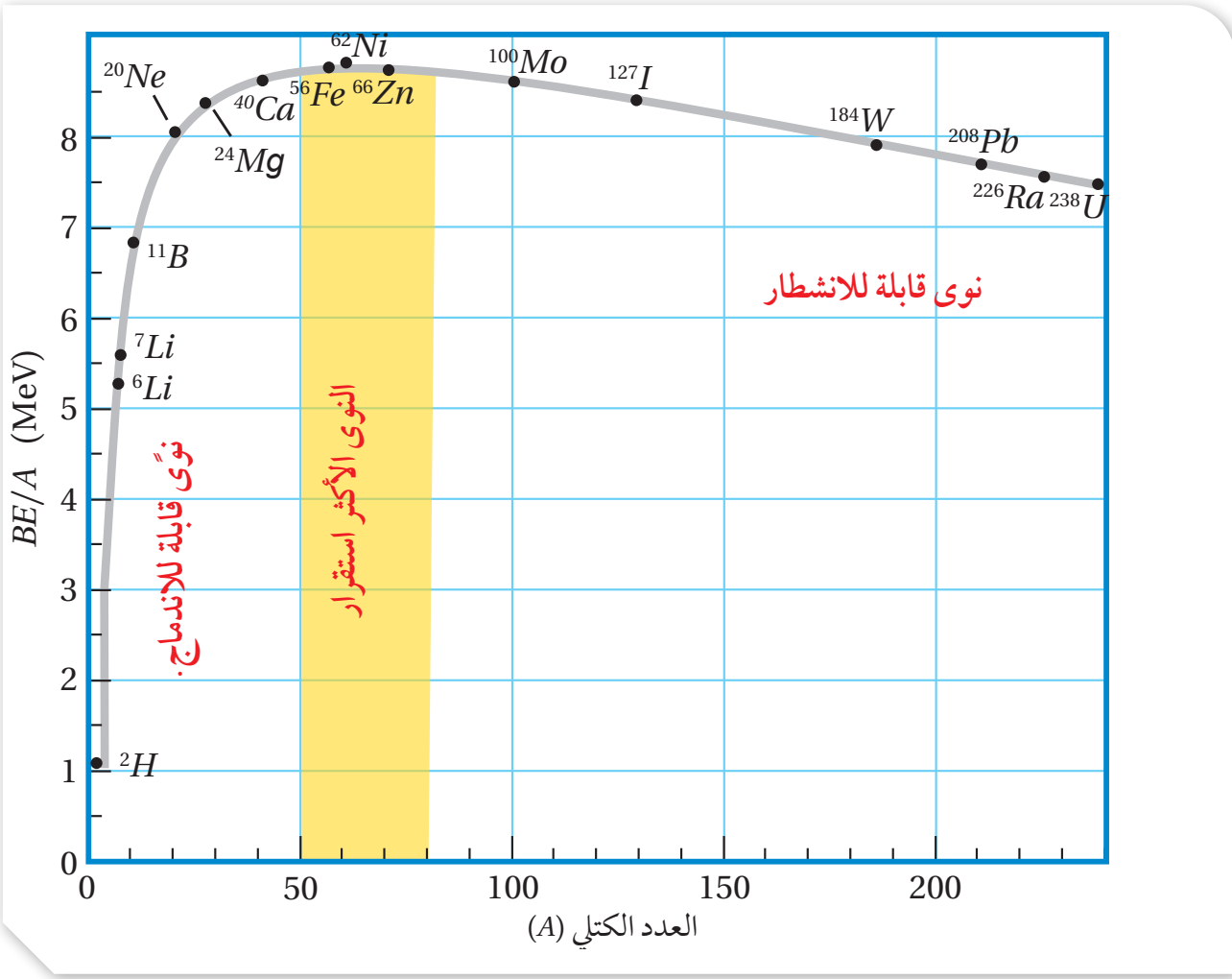
$$BE = \Delta m \times 931.5 = (Z\,m_p + N\,m_n - M) \times 931.5$$

ويبيّن الجدول (3) طاقة الربط النووية لبعض النوى، وعلى نحو ما هو متوقع، كلّما زاد عدد النيوكليونات، زادت الطاقة اللازمة لفصلها، أيْ زادت طاقة الربط النووية.

عند تزويد النواة بطاقة (تساوي طاقة الربط النووية) لفصل مكوّناتها كلّها، فإنّ هذه الطاقة تتوزّع على النيوكليونات. ويمكن حساب متوسط الطاقة التي حصل عليها كلّ نيوكليون بقسمة طاقة الربط النووية للنواة (BE) على عدد النيوكليونات التي تحتويها (A). وتُسمّى (BE/A) طاقة الربط النووية لكل نيوكليون التي تُعدّ مؤشرًا على مدى استقرار النواة. فنواة ($^{62}_{28}Ni$) لها أكبر طاقة ربط نووية لكل نيوكليون (8.795 MeV)، لذا فهي أكثر استقرارًا من النوى الثلاث الأخرى المُبيَّنة في الجدول (3). فكلما زادت طاقة الربط النووية لكل نيوكليون، زاد استقرار النواة.

الجدول (3): طاقة الربط النووية وطاقة الربط لكل نيوكليون لبعض النوى.

النواة	A	BE (MeV)	BE/A (MeV)
ليثيوم ($^{7}_{3}Li$)	7	39.24	5.606
نيكل ($^{62}_{28}Ni$)	62	545.26	8.795
فضة ($^{107}_{47}Ag$)	107	915.26	8.554
رصاص ($^{206}_{82}Pb$)	206	1622.32	7.875



الشكل (3): منحنى يمثل علاقة طاقة الربط النووية لكل نيوكليون بالعدد الكتلي. اندماج نواتين خفيفتين أو انشطار نواة ثقيلة يحرّر طاقة؛ لأنّ النوى الناتجة ذات طاقة ربط نووية لكل نيوكليون أكبر.

الشكل (3) يمثّل العلاقة بين طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون والعدد الكتلي. أُلاحظ أنّ طاقة الربط النوويّة لكلّ نيوكليون تصل إلى قيمة عظمى عند نواة النيكل (^{62}Ni) يليها نواة الحديد (^{56}Fe) ما يعني أنّهما أكثر استقرارًا من غيرهما.

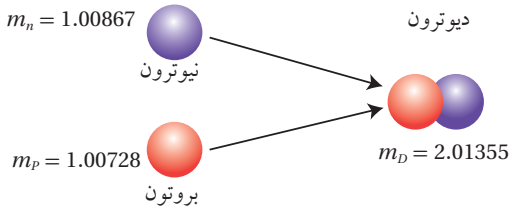
لذلك فإن النوى الخفيفة تميل إلى الاندماج لتكوين نواة أثقل ذات طاقة ربط نوويّة لكل نيوكليون أكبر. وكذلك فإن انشطار نواة ثقيلة ينتج منه نوى ذات طاقة ربط نوويّة لكل نيوكليون أكبر على نحو ما سأدرس لاحقا في هذه الوحدة.

إن طاقة الربط النوويّة لكل نيوكليون تتغير بمقدار قليل مع زيادة العدد الكتلي للنوى التي عددها الكتلي ($A > 60$). ويعزى ذلك إلى أن القوة النووية قصيرة المدى، بمعنى أن النيوكليون داخل النواة يتجاذب مع النيوكليونات المحيطة به فقط، ولا يتأثر ببقية النيوكليونات وهذا ما يعرف بإشباع القوة النووية القوية.

✓ **أتحقّق:** أيّ النوى أكثر استقرارًا؟

المثال 5

تُسمّى نواة الديتيريوم بالديوترون ($_1^2H \equiv D$)، وتتكوّن من بروتون ونيوترون كما في الشكل (4)، أحسب فرق الكتلة بين كتلة الديوترون ومجموع كتلتي البروتون والنيوترون، ثم أحسب الطاقة المكافئة لها، معتمدًا على الجدول الآتي:



الشكل (4): اندماج النيوترون والبروتون لتكوين الديوترون.

الجسيم أو النواة	الكتلة (*amu*)
m_p	1.00728
m_n	1.00867
m_D	2.01355

المُعطيات: الكتل في الجدول

المطلوب: $\Delta m = ?\ ,\ BE = ?$

الحلّ:

$$\Delta m = m_n + m_p - m_D = 2.01595 - 2.01355 = 0.00240\ amu$$

$$BE = \Delta m \times 931.5 = 0.00240 \times 931.5 = 2.2356\ \text{MeV}$$

أُلاحظ أنّ مجموع كتلتي البروتون والنيوترون منفردين أكبر من كتلة الديوترون، فأين ذهب فرق الكتلة؟ عند إندماج البروتون والنيوترون لتكوين الديوترون يتحوّل فرق الكتلة إلى طاقة، وتساوي طاقة الربط النووي للديوترون.

المثال 6

إذا كان فرق الكتلة بين كتلة نواة ($_{82}^{208}Pb$) وكتلة مكوّناتها يساوي (2.90×10^{-27} kg)، أحسب طاقة الربط النووية للنواة بوحدة J وبوحدة MeV.

المُعطيات:

$$\Delta m = 2.90 \times 10^{-27}\ \text{kg},\ c = 3 \times 10^8\ \text{m/s},\ 1\ amu = 931.5\ \text{MeV}$$

المطلوب: BE بوحدة J وبوحدة MeV.

الحلّ:

بوحدة الجول

$$BE = \Delta m\, c^2 = 2.90 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 2.61 \times 10^{-10}\ \text{J}$$

لحساب الطاقة بوحدة (MeV)، أحوّل الطاقة من وحدة (J) إلى وحدة (MeV) على النحو الآتي:

$$BE = 2.61 \times 10^{-10}\,\text{J} \times \frac{1\,\text{e V}}{1.6 \times 10^{-19}\,\text{J}} = 1.631 \times 10^{9}\,\text{eV} = 1631\,\text{MeV}$$

المثال 7

أجد طاقة الربط النووية وطاقة الربط النووية لكلِّ نيوكليون لنواة كلٍّ من (الرصاص $^{206}_{82}Pb$ والليثيوم $^{7}_{3}Li$)، علمًا أنّ كتل النوى مرفقة في الجدول الآتي:

الجُسيم أو النواة	m_p	m_n	$m_{^{7}_{3}Li}$	$m_{^{206}_{82}Pb}$
الكتلة (amu)	1.00728	1.00867	7.01436	205.92945

المُعطيات: الجدول، $amu = 931.5\,\text{MeV}$

المطلوب: $BE=?,\ BE/A=?$

الحلّ:

$$\begin{aligned}
BE(Pb) &= (Z\,m_p + N\,m_n - M) \times 931.5 \\
&= (82 \times 1.00728 + 124 \times 1.00867 - 205.92945) \times 931.5 \\
&= 1.7426 \times 931.5 = 1623\,\text{MeV} \\
\frac{BE(Pb)}{A} &= \frac{1623}{206} = 7.878\,\text{MeV} \\
BE(Li) &= (Z\,m_p + N\,m_n - M) \times 931.5 \\
&= (3 \times 1.00728 + 4 \times 1.00867 - 7.01436) \times 931.5 \\
&= 0.04216 \times 931.5 = 39.27\,\text{MeV} \\
\frac{BE(Li)}{A} &= \frac{39.27}{7} = 5.61\,\text{MeV}
\end{aligned}$$

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بما يأتي: العدد الذري، العدد الكتلي، النيوكليون، طاقة الربط النووية، نطاق الاستقرار.

2. **أستخدم المتغيّرات:** 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).

   جـ. كثافة النواة (X) إلى كثافة النواة (Y).

3. أجد للنواة $\left({}^{7}_{3}Li\right)$، عدد البروتونات وعدد النيوترونات وعدد النيوكليونات.

4. **أناقش:** للنيوترون دور مهمّ في استقرار النواة، أناقش زملائي/ زميلاتي في صحّة هذه العبارة.

5. **أتوقّع** أيّ النواتين الآتيتين مستقر، وأيّهما غير مستقر، مع بيان السبب:

$$^{24}_{12}Mg \quad , \quad ^{238}_{92}U$$

6. **أحسب** طاقة الربط النووية وطاقة الربط النووية لكل نيوكليون لنواتي (النيكل $^{62}_{28}Ni$ ، والحديد $^{56}_{26}Fe$)، حيث:

الجسيم أو النواة	m_p	m_n	$m_{^{62}_{28}Ni}$	$m_{^{56}_{26}Fe}$
الكتلة (amu)	1.00728	1.00867	61.91297	55.92066

7. **أستنتج:** يمثّل الجدول الآتي: طاقة الربط النوويّة والعدد الكتلي لبعض النوى، فأيّ النوى أكثر استقرارًا ؟ أفسّر إجابتي.

النواة	طاقة الربط النوويّة	العدد الكتلي
X	1600 MeV	200
Y	492 MeV	56
Z	28 MeV	4

8. **التفكير الناقد:** يُلاحظ من منحنى طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون مع العدد الكتلي أنّ طاقة الربط النووية لكل نيوكليون لا تتغيّر كثيرًا بعد العدد الكتلي (60). فهل لذلك علاقة بأنّ القوة النوويّة قصيرة المدى؟ أفسّر إجابتي.

الدرس 2

الإشعاع النوويّ
Nuclear Radiation

الفكرةُ الرئيسةُ:

تبعث النوى غير المستقرّة إشعاعات بطاقات مختلفة، ولهذه الإشعاعات مزايا ولها أيضًا أخطار.

نتاجاتُ التعلّمِ:

- أقارن بين جُسيمات ألفا وبيتا وأشعة غاما اعتمادًا على تفاعلاتها مع الأوساط المادّيّة.
- أستقصي التغيّرات التي تطرأ على خصائص النواة عند انبعاث أحد الإشعاعات النووية منها (ألفا أو بيتا أو غاما).
- أحلّل رسومًا بيانيّة لتوضيح المقصود بمعدل الاضمحلال النووي لعينة من نوى نظير مشع، وأربط ذلك بعمر النصف للنظير المشع.

المفاهيمُ والمصطلحاتُ:

الاضمحلال الإشعاعي Radioactive Decay

عمر النصف Half–Life

النشاطيّة الإشعاعيّة Activity

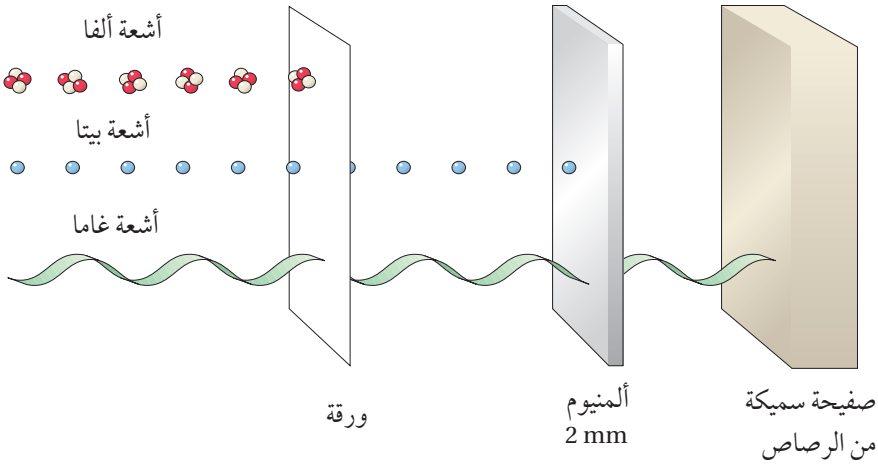
سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي Natural Radioactive Decay Series

الاضمحلال الإشعاعيّ Radioactivity 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 تلقائيًّا، دون الحاجة إلى تحفيز خارجيّ، نوعًا جديدًا من الإشعاع. وفي نهاية القرن التاسع عشر، اكتشفت ماري كوري وزوجها بيير كوري عنصرين جديدين يُصدران نوعًا مماثلًا للإشعاع الصادر عن أملاح اليورانيوم، وأطلقا عليهما اسمي البولونيوم والراديوم.

وبيّنت التجارب أن هناك ثلاثة أنواع من الإشعاعات؛ أُطلِق عليها أسماء ألفا (α) وبيتا (β) وغاما (γ). وجُسيمات ألفا هي نوى الهيليوم $\left({}^{4}_{2}He^{+2}\right)$، أمّا جُسيمات بيتا، فقد تكون بيتا السالبة (β^-) وهي إلكترونات $\left({}^{0}_{-1}e\right)$، أو بيتا الموجبة وهي بوزيترونات $\left({}^{0}_{+1}e\right)$. والبوزيترون جُسيم له كتلة الإلكترون نفسها، لكنّه يحمل شحنة موجبة مساوية لشحنة الإلكترون ($+1.6 \times 10^{-19}\ C$). أمّا أشعّة غاما، فهي أشعّة كهرمغناطسية (فوتونات) ذات تردّد عالٍ ليس لها كتلة أو شحنة. والاضمحلال الإشعاعي **Radioactive decay** هو التحوّل التلقائي لنواة غير مستقرة إلى نواة أكثر استقرارًا عن طريق انبعاث جسيمات مثل جُسيم ألفا أو جُسيم بيتا، وغالبًا ما يصاحب ذلك انبعاث أشعة غاما.

الإشعاعات النووية الثلاثة؛ ألفا وبيتا وغاما، تُعدّ جميعها من الإشعاعات النووية المؤيّنة بسبب قدرتها على تأيين ذرات الوسط الذي تمرّ فيه. ولهذه الأشعة خصائص مميزة مثل، قدرتها على التأيين، وقدرتها على النفاذ. إنّ كتلة جسيمات ألفا نحو أربعة أضعاف كتلة البروتون تقريبًا، وشحنتها ضعفا شحنة البروتون، ما يجعل تفاعلها مع ذرات الوسط الذي تمرّ فيه كبيرًا مقارنة بتفاعل جسيمات بيتا وأشعة غاما، فتفقد طاقتها بسرعة؛ لذا فإنّ قدرتها على تأيين ذرات الوسط الذي تمرّ فيه أكبر من قدرة جسيمات بيتا وأشعة غاما، في حين أنّ قدرتها على النفاذ أصغر. وفي المتوسط، تعبر جسيمات ألفا في الهواء مسافة (3.7 cm) تقريبًا قبل أن



الشكل (5): قدرة الأشعة النووية ألفا وبيتا وغاما على النفاذ.

لماذا اخترقت أشعة غاما الورقة والألمنيوم في حين لم تخترق ألفا الورقة؟

تُمتصَّ طاقتها كاملة. ويمكن أيضًا امتصاص طاقة جُسيم ألفا كاملة باستخدام حاجز رقيق من الورق. أمّا أشعة غاما، فهي الأقل قدرة على التأيين والأكثر قدرة على الاختراق؛ لأنّها لا تحمل شحنة كهربائية، وليس لها كتلة. ولمقارنة قدرة الإشعاعات النووية الثلاثة على اختراق الأوساط المادّية أتأمّل الشكل (5). ويمثّل الجدول (4) مقارنة بين خصائص الإشعاعات النوويّة.

يُطلق على انبعاث جُسيمات ألفا أو انبعاث جسيمات بيتا أو انبعاث أشعة غاما اضمحلالًا. وفيما يأتي سأتعرّف المزيد عن هذه الاضمحلالات الثلاثة.

الجدول (4): خصائص الإشعاعات النووية.

نوع الأشعة	ألفا	بيتا	غاما
الشحنة	$+2e$	$+e$ أو $-e$	ليس لها شحنة
الكتلة	4.0015 *amu*	0.0005 *amu*	صفر
القدرة على النفاذ	قليلة (تُمتصّ باستخدام حاجز رقيق من الورق)	متوسطة (بضعة ملمترات من الألمنيوم)	كبيرة (سنتمترات عدة من الرصاص)
القدرة على التأيين	كبيرة	متوسطة	قليلة

✓ **أتحقّق:** أقارن بين الإشعاعات النووية ألفا وبيتا وغاما من حيث قدرة كلٍّ منها على التأيين، وقدرتها على الاختراق.

الربط بالحياة

تحوي أجهزة إنذار الدخان مصدرًا إشعاعيًّا صغيرًا يُطلِق جسيمات ألفا، وعادةً ما يكون نظير الأمريسيوم -241. حيث تعمل جسيمات ألفا على تأيين جزيئات الهواء داخل جهاز الإنذار، ما يؤدي إلى مرور تيار كهربائي. وعندما يمتصّ الدخان بعض جسيمات ألفا، فإنّه يقلّل من عدد الأيونات في الهواء ويقل التيار الكهربائي، فينطلق جهاز إنذار الحريق، أتأمّل الشكل.

اضمحلال ألفا Alpha Decay

جسيمات ألفا (α) تنبعث في الغالب من النوى الثقيلة ($Z > 82$) غير المستقرة، وينتج نواة جديدة تختلف في عددها الذري وعددها الكتلي عن النواة الأم، على نحو ما هو موضَّح فيما يأتي:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

فجُسيم ألفا انبعث من نواة نظير اليورانيوم $\left(^{238}_{92}U\right)$ غير المستقر (النواة الأم) لينتج عن ذلك نواة نظير الثوريوم $\left(^{234}_{90}Th\right)$. وعندما يغادر جسيم ألفا النواة، فإنّها تخسر بروتونين ونيوترونين؛ لذا فإنّ العدد الذريّ للنواة الناتجة يقلّ 2، في حين يقلّ عددُها الكتلي بمقدار 4 مقارنة بالنواة الأم، كما في المعادلتين السابقتين.

ويمكن التعبير عن معادلة اضمحلال ألفا بالمعادلة الآتية:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

ألاحظُ أن مجموع العدد الذريّ للنوى والجسيمات الناتجة من الاضمحلال يساوي العدد الذري للنواة المضمحلّة، وكذلك مجموع العدد الكتلي للنوى والجسيمات الناتجة من الاضمحلال يساوي العدد الكتلي للنواة المضمحلّة.

✓ **أتحقّق:** أُبيّن ما التغيّر الذي يطرأ على كلٍّ من العدد الذري والعدد الكتلي للنواة الأم عند انبعاث جسيم ألفا منها.

اضمحلال بيتا Beta Decay

إنّ النوى التي تقع فوق نطاق الاستقرار تمتلك فائضًا من النيوترونات، ويلزمها تقليل عدد النيوترونات وزيادة عدد البروتونات لتقترب نسبة $\left(\frac{N}{Z}\right)$ فيها من نسبة الاستقرار، ويتم ذلك عن طريق إشعاع جسيم بيتا السالبة (β^-)، وهو إلكترون ($^{0}_{-1}e$) ومثال ذلك التفاعل الآتي:

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu}$$

أُلاحظ أنّ العدد الذري للنواة الناتجة قد زاد بمقدار (1)، في حين بقي العدد الكتلي ثابتًا مقارنة بالنواة الأم. والرمز ($\overline{\nu}$) يمثّل جسيمًا يُسمّى ضديد النيوترينو، وهو جسيم متعادل الشحنة، وكتلته متناهية في الصغر.

وينتج جسيم بيتا السالبة من تحلّل أحد نيوترونات النواة (وهي نواة الكربون $^{14}_{6}C$ في هذا المثال) وتحوّله إلى بروتون، وجسيم بيتا السالبة، وضديد النيوترينو ($\overline{\nu}$) على نحو ما في المعادلة الآتية:

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{+1}p + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu}$$

أمّا النوى التي تقع أسفل نطاق الاستقرار، فإنّها تمتلك فائضًا من البروتونات، ولكي تصل إلى حالة الاستقرار يتطلّب ذلك تقليل عدد البروتونات وزيادة عدد النيوترونات، ويتحقّق ذلك بإشعاع جسيم بيتا الموجبة (β^+) وهو بوزترون ($^{0}_{+1}e$). ومثال ذلك التفاعل الآتي:

$$^{12}_{7}N \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

أُلاحظ أنّ العدد الذري للنواة الناتجة يقلّ بمقدار (1) عن النواة الأم، في حين بقي العدد الكتلي ثابتاً. ويُطلق على الجسيم (ν) اسم النيوترينو، وهو جُسيم متعادل الشحنة ذو كتلة متناهية في الصغر.

وينتج جسيم بيتا الموجبة من تحلُّل أحد بروتونات النواة الأم (وهي $^{12}_{7}N$ في هذا المثال) وتحوِّله إلى نيوترون وجسيم بيتا الموجبة ونيوترينو على نحو ما في المعادلة الآتية:

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

وتجدر الإشارة إلى أنّ النواة لا تحتوي على إلكترونات أو بوزترونات، وهذه الجسيمات تنشأ لحظة تحوّل بروتون إلى نيوترون، أو العكس عند حدوث اضمحلال بيتا، وتغادر النواة مباشرة.

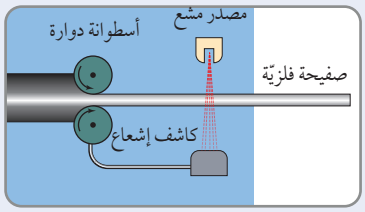
ويمكن التعبير عن معادلتي اضمحلال بيتا السالبة وبيتا الموجبة بالمعادلتين الآتيتين:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu}$$

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

الربط بالتكنولوجيا

تُستخدم أشعة بيتا في التكنولوجيا لضبط سُمك الورق والصفائح الفلزيّة كما في الشكل أدناه، فعند زيادة سمك الصفيحة أو نقصه يتغيّر عدد جسيمات بيتا التي تصل إلى الكاشف؛ فيتغيّر التيار الذي يسري عبر جهاز التحكّم والذي يقوم بدوره بضبط المسافة بين الاسطوانتين للحصول على السمك المطلوب.



أُفكّر: تُستخدم أشعة بيتا في ضبط سُمك الورق، فهل تصلح أشعة غاما أو ألفا لذلك؟ أفسر إجابتي.

✓ **أتحقّق:** أبيّن ما التغيير الذي يطرأ على كلٍّ من العدد الذري والعدد الكتلي للنواة عند انبعاث جسيم β^+ أو جسيم β^- منها.

اضمحلال غاما Gamma Decay

تعلّمتُ أنّ الإلكترونات تتوزّع في مستويات طاقة في الذرة، كذلك تتوزّع النيوكليونات في مستويات طاقة داخل النواة تبدأ من **مستوى الاستقرار** Ground state؛ وهو المستوى الأقل طاقة للنواة. وعند إشعاع النواة لجسيمات

بيتا أو جسيمات ألفا، قد تكون النواة الناتجة في مستوى الاستقرار أو في مستوى إثارة (مستوى طاقة أعلى من مستوى الاستقرار). فإذا كانت النواة الناتجة في مستوى إثارة، فإنّها قد تنتقل إلى مستوى الاستقرار عن طريق إطلاق أشعة غاما، وهي أشعة كهرمغناطيسية (فوتونات) ذات تردّد كبير جدًّا، وليس لها شحنة أو كتلة؛ لذلك لا يتغيّر العدد الذري أو العدد الكتلي للنواة عند انبعاثها. ويمكن التعبير عن اضمحلال غاما بالمعادلة الآتية:

$$^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$$

حيث $^{A}_{Z}X^{*}$: النواة في مستوى إثارة.

$^{A}_{Z}X$: النواة في مستوى الاستقرار.

γ : أشعة غاما المنبعثة.

وطاقة أشعة غاما المنبعثة تساوي فرق الطاقة بين مستوى الإثارة ومستوى الاستقرار للنواة الناتجة. ومن الأمثلة على ذلك، نواة البورون $^{12}_{5}B$، حيث تُعدّ نواة البورون من باعثات بيتا السالبة؛ لأنّها تمتلك عددًا من النيوترونات أكبر من عدد البروتونات، وعددها الذري أقل من 20، لذا فهي تقع فوق نطاق الاستقرار. ويبيّن الشكل (6) رسمًا تخطيطيًّا لتغيّرات الطاقة عند اضمحلال نواة البورون ($^{12}_{5}B$) بطريقتين؛ الطريقة الأولى تنتج نواة الكربون −12 في مستوى الاستقرار حسب المعادلة الآتية:

$$^{12}_{5}B \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

حيث يتحرّر 13.4 MeV من الطاقة نتيجة لهذا الاضمحلال. والطريقة الثانية ينتج عنها نواة الكربون −12 في مستوى إثارة طاقته 4.4 MeV، كما هو مبيَّن في المعادلة الآتية:

$$^{12}_{5}B \rightarrow {}^{12}_{6}C^{*} + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

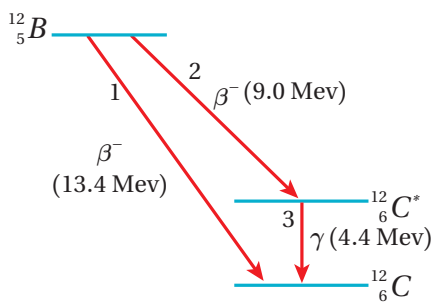
حيث $^{12}_{6}C^{*}$ نواة الكربون المُثارة، ويتحرّر مقدارٌ من الطاقة يساوي 9.0 MeV نتيجةً لهذا الاضمحلال. وتتخلّص ذرة الكربون المثارة ($^{12}_{6}C^{*}$) من الطاقة الفائضة بإطلاق أشعة غاما طاقتها تساوي 4.4 MeV لتصل إلى مستوى الاستقرار، بحسب المعادلة الآتية:

$$^{12}_{6}C^{*} \rightarrow {}^{12}_{6}C + \gamma$$

✓ **أتحقّق:** أبيّن ما يحدث لكلٍّ من العدد الذري والعدد الكتلي للنواة عند انبعاث أشعة غاما منها.

الربط بالتكنولوجيا

تُستخدم أشعة غاما في الصناعة للكشف عن الشقوق في لحام المعادن، حيث يوضع مصدر غاما على أحد جانبي اللحام، وتوضع لوحة فوتوغرافية على الجانب الآخر. وسوف تظهر نقاط الضعف في اللحام على اللوحة الفوتوغرافية بطريقة مشابهة لصورة الأشعة السينية للعظم المكسور.



الشكل (6): اضمحلال نواة البورون −12 بطريقتين.

أصمّم باستخدام برنامج (Scratch) عرضاً لثلاثة مستويات طاقة، أوضّح فيه نوًى تشع ألفا وبيتا وغاما، مُوضِّحًا فيه التغيرات التي تطرأ على العدد الذري والعدد الكتلي للنواة الأم. ثم أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

المثال 8

أدرس المعادلة الآتية، ثمّ أُقارن بين كلٍّ من: العدد الذري، والعدد الكتلي للنواة الناتجة والنواة الأم، وأفسّر سبب هذا التغيّر.

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

المُعطيات: المعادلة

المطلوب: المقارنة بين كلٍّ من: العدد الذري، والعدد الكتلي للنواة الناتجة والنواة الأم، وتفسير سبب هذا التغيّر.

الحلّ:

يتكوّن جسيم ألفا من بروتونين ونيوترونين، وعند انبعاث جسيم ألفا من النواة الأم فإنّها تخسر بروتونين ونيوترونين؛ لذا يقلّ عددها الذريّ بمقدار (2)، وعددها الكتلي بمقدار(4).

المثال 9

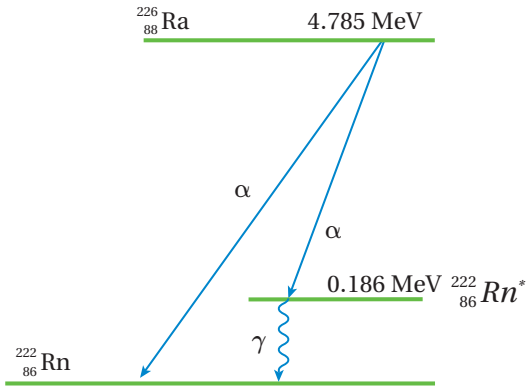
يمثّل الشكل (7) اضمحلال نواة الراديوم $(^{226}_{88}Ra)$ إلى نواة الرادون $(^{222}_{86}Rn)$.عند الكشف عن جسيمات ألفا، وجِد أنّها توجد بطاقتين مختلفتين.

أ . ما مقدار طاقتي جُسيم ألفا؟

ب. ما مقدار طاقة أشعّة غاما؟

جـ. أكتب معادلة اضمحلال أشعّة غاما.

د . أكتب معادلة اضمحلال ألفا الذي ينتج عنه طاقة أكبر.



الشكل (7): اضمحلال نواة الراديوم –226.

المُعطيات: الشكل (7).

المطلوب: E_α، E_γ ، معادلة اضمحلال غاما، معادلة الاضمحلال التي تُنتج جسيم ألفا بطاقة أكبر.

الحلّ:

أ . طاقتا جُسيم ألفا هما: $E_\alpha = 4.785$ MeV و $E_\alpha = 4.785 - 0.186 = 4.599$ MeV

ب. طاقة أشعة غاما $E_\gamma = 0.186$ MeV

جـ. معادلة اضمحلال غاما $^{222}_{86}Rn^* \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + \gamma$

د . معادلة اضمحلال ألفا الذي ينتج عنه طاقة أكبر $^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$

المثال 10

أدرس التفاعلين النوويين الآتيين، ثمّ أبيّن التغيّرات التي طرأت على كلٍّ من العدد الذري والعدد الكتلي للنواة التي تشعّ جُسيمات بيتا السالبة أو بيتا الموجبة.

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

$$^{12}_{7}N \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

الحلّ:

عند انبعاث جسيم بيتا السالبة، فإنّ العدد الذري للنواة الأم يزداد بمقدار (1)، في حين يبقى العدد الكتلي ثابتًا.

أمّا عند انبعاث جسيم بيتا الموجبة، فإنّ العدد الذري للنواة الأم يقلّ بمقدار (1)، في حين يبقى العدد الكتلي ثابتًا.

تمرين

أُكمل المعادلات النوويّة الآتية:

1. $^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + \ldots\ldots + \ldots\ldots$
2. $^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + \ldots\ldots + \ldots\ldots$
3. $^{234}_{92}U \rightarrow {}^{230}_{90}Th + \ldots\ldots$
4. $^{234}_{91}Pa^{*} \rightarrow {}^{234}_{91}Pa + \ldots\ldots$

التجربة ١ استقصاء الاضمحلال الإشعاعي

الموادُّ والأدواتُ: 50 قطعة نقد معدنيّة، قُفّازان، نظارة واقية.

إرشاداتُ السلامةِ: ارتداء النظارة الواقية والقُفّازين.

خطواتُ العملِ:

بالتعاون مع أفراد مجموعتي أُنفِّذ الخطوات الآتية:

1 . أُلقي بقطع النقد معًا على سطح الطاولة، ثم أحصي عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى، وأرمز إليه بالرمز (N)، وأدوّنه في الجدول.

(تُعَدُّ القطعةُ التي ظهرت فيها الكتابةُ إلى الأعلى نواةً اضمحلت، والقطعة التي ظهرت فيها الصورة إلى الأعلى نواة مشعّة).

2 . أجمع القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى (المشعّة) ثم أُلقيها مرة أخرى، وأُحصي عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى، وأدوّنه في الجدول.

3 . أكرّر الخطوة السابقة حتى يصبح عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى أقلّ من أربع قطع.

ثمّ أدوّن النتائج في الجدول.

التحليل والاستنتاج:

1 . ما العلاقة بين مقدار النقص في عدد القطع النقدية التي ظهرت فيها الصورة للأعلى (ΔN) وعدد القطع النقدية التي أُلقيت في كلّ محاولة.

2 . **أمثّل بيانيًّا** النتائج المرصودة في الجدول بوضع عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى على محور y، وعدد المحاولات على محور x.

3 . **أستنتج:** أقسم عدد الصور في كل محاولة على عدد الصور في المحاولة التي تسبقها. هل يُمكن استنتاج نمط رياضي يربط ($\frac{N}{N_0}$) بعدد المحاولات (n)؟

4 . **أستنتج:** إنّ احتمال الحصول على صورة أو كتابة في رمي قطع النقد يساوي ($\frac{1}{2}$)، ما يعني توقّع الحصول على نصف العدد من الصور في كل محاولة، وهذا يشبه عمر النصف في الاضمحلال الإشعاعي ($t_{1/2}$)، أستنتج العلاقة بين عدد المحاولات وعمر النصف وزمن الاضمحلال.

5 . **أتوقّع:** إذا بدأت بعدد قطع يساوي (1000)، فما عدد القطع المتبقي لديّ بعد محاولتين؟

عمر النصف Half–life

عندما تطلق النواة المشعة جسيم ألفا أو جسيم بيتا فإنها تضمحل، وقد أظهرت التجارب أن بعض النظائر المشعة يضمحل خلال مدد زمنية قصيرة، وبعضها الآخر يضمحل خلال مدد زمنية طويلة. ويسمى الزمن اللازم لاضمحلال نصف عدد النوى المشعة **عمر النصف Half–life** ($t_{1/2}$). ويبين الجدول (5) بعض النظائر المشعة وعمر النصف لكل منها.

الجدول (5): عمر النصف لبعض النظائر المشعّة.

العنصر	عمر النصف
$^{238}_{92}U$	4.47×10^{9} y
$^{235}_{92}U$	7.04×10^{8} y
$^{232}_{90}Th$	1.41×10^{10} y
$^{137}_{55}Cs$	30.08 y
$^{60}_{27}Co$	5.27 y
$^{191}_{76}Os$	15.4 days
$^{211}_{83}Bi$	2.14 min
$^{144}_{56}Ba$	11.9 s

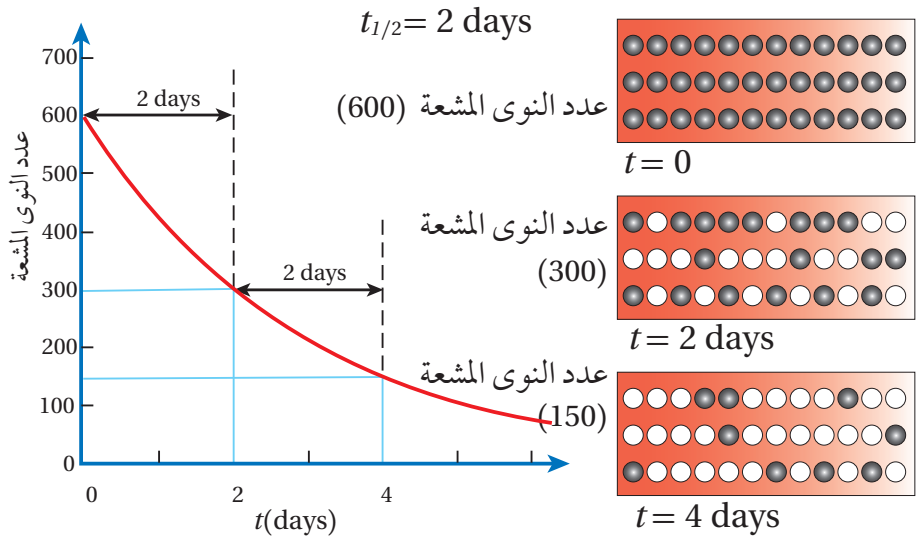
بالرجوع إلى التجربة (1)، فإنه يمكن معاملة المحاولة الواحدة لإلقاء قطع النقد معاملة عمر نصف واحد، فبعد كل محاولة يقل عدد القطع التي ظهرت فيها الصورة للأعلى إلى النصف تقريبًا، أي بعد كل عمر نصف، فإن عدد النوى المشعة يقل إلى النصف. فلو بدأنا بعينة؛ عدد النوى المشعة فيها ($N_0 = 600$)، وعمر النصف لها ($t_{1/2} = 2$ 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:

$$N_0 \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{2} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{4} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{8} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{N_0}{16} \cdots\cdots$$

وعليه، يمكن التوصل إلى العلاقة الرياضية الآتية:

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$



الشكل (8): تناقص عدد النوى المشعّة مع الزمن.

حيث ($t_{1/2}$) عمر النصف، (N_0) عدد النوى المشعة عند لحظة ($t = 0$)، (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. وتُعبّر **النشاطيّة الإشعاعيّة Activity** عن عدد الاضمحلالات في الثانية الواحدة، ويرمز إليها بالرمز (A). وتتناسب النشاطية الإشعاعية طرديًّا مع عدد النوى المشعة عند لحظة زمنية معينة، فعند الزمن (t) تحسب النشاطية الإشعاعية من العلاقة:

$$A = \lambda N$$

حيث (λ) : ثابت التناسب، ويسمى ثابت الاضمحلال، و (N) عدد النوى المشعة عند اللحظة نفسها، وعند الزمن ($t = 0$)، فإن ($A_0 = \lambda N_0$)، وهي النشاطية الإشعاعية الابتدائية. تقاس النشاطية بوحدة بيكرل (Bq) وتساوي اضمحلالًا واحدًا في الثانية، أو بوحدة كوري (Ci) حيث ($1\ \text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\ \text{Bq}$).

عند مرور زمن يساوي عمر النصف على العينة المشعة، فإن النشاطية الإشعاعية لها تقل إلى النصف. ويمكن الربط بينهما على النحو الآتي:

$$A_0 \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{2} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{4} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{8} \xrightarrow{t_{1/2}} \frac{A_0}{16} \ldots\ldots$$

وعليه، يمكن التوصل إلى العلاقة الرياضية الآتية:

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

ويرتبط عمر النصف ($t_{1/2}$) بثابت الاضمحلال بالعلاقة الاتية:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

يلاحظ من هذه العلاقة أن عمر النصف يتناسب عكسيًّا مع ثابت الاضمحلال؛ فعندما يكون ثابت الاضمحلال كبيرًا يكون عمر النصف صغيرًا.

✓ **أتحقّق:** أُعرّف النشاطيّة الإشعاعيّة وعمر النصف.

المثال 11

يُستخدم الغاليوم –67 في التشخيص الطبّي. إذا علمت أنّ ثابت الاضمحلال له ($2.4 \times 10^{-6}\ s^{-1}$)، وقستُ النشاطيّة الإشعاعيّة لعينة منه فكانت (4680 Bq)، فأجد الزمن اللازم حتى تصبح النشاطيّة الإشعاعيّة (1170 Bq).

المُعطيات: $A_0 = 4680\ Bq,\ \lambda = 2.4 \times 10^{-6}\ s^{-1},\ A = 1170\ Bq$

المطلوب: $t = ?$

الحلّ:

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \quad \Rightarrow \quad \frac{1170}{4680} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

$$\frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{1}{2}\right)^{2} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

وهذا يعني أنّ

$$\frac{t}{t_{1/2}} = 2 \quad \Rightarrow \quad t = 2t_{1/2} = \frac{2 \times 0.693}{\lambda} = \frac{1.39}{2.4 \times 10^{-6}} = 5.8 \times 10^{5}\ s$$

المثال 12

يستخدم نظير الكوبالت –60 في تعقيم الأجهزة الطبية وفي علاج مرض السرطان. عمر النصف لنظير الكوبالت ($^{60}_{27}Co$) يساوي (5.27 y)، قِستُ النشاطيّة الإشعاعيّة لعينة منه عند لحظة زمنيّة معينة فوجدتها (0.200 μCi). أجد ما يأتي:

أ . عدد النوى المشعّة في العينة.

ب. النشاطيّة الإشعاعيّة بعد زمن يساوي ثلاثة أضعاف عمر النصف.

المُعطيات: $A_0 = 0.200\ \mu Ci,\ t_{1/2} = 5.27\ y$

المطلوب: $N_0 = ?,\ A(t = 3t_{1/2}) = ?$

الحلّ:

أ . أولاً نحوِّل النشاطيّة الإشعاعيّة من وحدة μCi إلى وحدة Bq

$$A_0 = 0.200\ \mu Ci = 0.200 \times 3.7 \times 10^{10} \times 10^{-6} = 7.40 \times 10^{3}\ Bq$$

أحوّل عمر النصف إلى وحدة (s)

$$t_{1/2} = 5.27\ y = 5.27 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 166 \times 10^{6}\ s$$

وأجد λ من العلاقة

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{166 \times 10^{6}} = 4.18 \times 10^{-9}\ s^{-1}$$

ثم أعوّض في العلاقة

$$A_0 = \lambda\ N_0$$

$$7.4 \times 10^{3} = 4.18 \times 10^{-9}\ N_0$$

$$N_0 = 1.8 \times 10^{12}\ nuclei$$

ب. بعد مرور زمن بمقدار عمر نصف واحد تقلّ النشاطيّة الإشعاعيّة للنصف، وتصبح (0.100 μCi)، وبعد مرور عمر نصف ثانٍ تصبح النشاطيّة الإشعاعيّة (0.050 μCi)، وبعد عمر نصف ثالث تصبح النشاطيّة الإشعاعيّة (0.025 μCi).

تمرين

يُستخدم اليود المشعّ في علاج سرطان الغدة الدرقيّة، فإذا كان عمر النصف له (8 days) تقريبًا، أجد الزمن اللازم حتى يضمحلّ (75%) منه.

سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي Natural Radioactive Decay Series

اليورانيوم ($^{238}_{92}U$) عنصر مشعّ يضمحلّ لينتج منه نظير الثوريوم ($^{234}_{90}Th$)، حسب التفاعل الآتي:

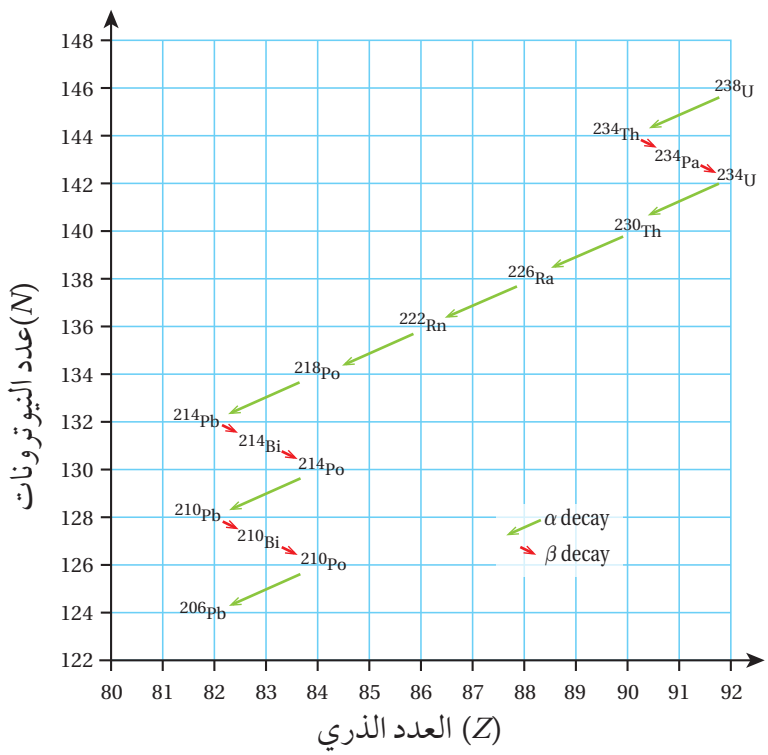
$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

لكن نظير الثوريوم ($^{234}_{90}Th$) مشعّ أيضًا، ويضمحلّ لينتج منه نظير مشعّ جديد $^{234}_{91}Pa$، وتستمر سلسلة الاضمحلالات عن طريق إشعاع جسيمات ألفا أو بيتا حتى تنتهي بعنصر مستقر على النحو الآتي:

$$^{238}_{92}U \xrightarrow{\alpha} {}^{234}_{90}Th \xrightarrow{\beta^-} {}^{234}_{91}Pa \xrightarrow{\beta^-} {}^{234}_{92}U \xrightarrow{\alpha} {}^{230}_{90}Th \xrightarrow{\alpha} {}^{226}_{88}Ra \ldots \longrightarrow {}^{206}_{82}Pb\ (\text{مستقر})$$

تُسمّى مجموعة الاضمحلالات التلقائيّة التي تبدأ بعنصر مشعّ ثقيل (موجود في الطبيعة)، وتنتهي بعنصر مستقر من خلال اضمحلالات عدة لألفا وبيتا **بسلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي Natural radioactive decay series.**

وسلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي ثلاث سلاسل، هي: سلسلة اليورانيوم وتبدأ بنظير اليورانيوم $^{238}_{92}U$، وسلسلة الثوريوم وتبدأ بنظير الثوريوم $^{232}_{90}Th$، وسلسلة الأكتينيوم وتبدأ بنظير اليورانيوم $^{235}_{92}U$. وجميع هذه السلاسل تبدأ بنظير



الشكل (9): سلسلة اضمحلال اليورانيوم.

الربط بعلوم الأرض

غاز الرادون المشع أحد النظائر في سلسلة اليورانيوم. يستقصي الجيولوجيون نسبة الرادون في المياه الجوفية والتربة للتنبؤ بالنشاط الزلزالي. فزيادة تركيزه قد تكون علامة على وقوع زلزال قريب. ويستطيع الجيولوجيون تقدير عمر الصخور من معرفة نسبة الرصاص إلى اليورانيوم –238 في الصخور.

ثقيل مشعّ عمر النصف له كبير، وتنتهي بأحد نظائر الرصاص المستقر. وتُسمّى كل سلسة باسم النظير المشعّ الذي له أطول عمر نصف فيها.

ونظرًا إلى أنّ اليورانيوم $^{238}_{92}U$ له أكبر عمر نصف $(4.47 \times 10^9\ \text{y})$ بين النظائر المشعّة في سلسلة اليورانيوم، فقد سُمّيت باسمه. ويمكن التعبير عن هذه السلسلة بيانيًّا على منحنى $(N–Z)$ كما في الشكل (9).

ويمكن التعبير عن هذه السلسلة أيضًا بالمعادلة الآتية:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{206}_{82}Pb + 8^{4}_{2}He + 6\,^{0}_{-1}e + 6\bar{\nu}$$

أُلاحظ من المعادلة السابقة أنّ العدد الذريّ والعدد الكتلي محفوظان.

الربط بعلم الآثار

تحتوي أجسام الكائنات الحية على نظير الكربون المشع $(^{14}_{6}C)$، ونسبته لنظير الكربون المستقر $(^{12}_{6}C)$ ثابتة في أجسام الكائنات الحيّة خلال وجودها على قيد الحياة. وبمجرد موت الكائن الحي تقل هذه النسبة. وبمعرفة هذه النسبة يستطيع علماء الآثار حساب زمن وفاة الكائن الحيّ.

✓ **أتحقّق:** ما المقصود بسلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي؟

المثال 13

يمكن التعبير عن سلسلة اضمحلال الثوريوم بالمعادلة:

$$^{232}_{90}Th \rightarrow {}^{208}_{82}Pb + n\,{}^{4}_{2}He + m\,{}^{0}_{-1}e + m\,\bar{\nu}$$

أجد عدد جُسيمات بيتا السالبة (m)، وعدد جسيمات ألفا (n) في المعادلة السابقة.

المُعطيات: المعادلة النوويّة.

المطلوب: $n = ?\ ,\ m = ?$

الحلّ:

أُطبّق مبدأ حفظ العدد الكتلي لحساب (n)

$$\sum A_{before} = \sum A_{after}$$

$$232 = 208 + 4n + 0(m)$$

$$n = \frac{232 - 208}{4} = 6$$

ثمّ أطبّق مبدأ حفظ العدد الذري لحساب (m)

$$\sum Z_{before} = \sum Z_{after}$$

$$90 = 82 + 2 \times 6 - m$$

$$m = 4$$

تمرين

تمثّل المعادلة الآتية جزءًا من سلسلة اليورانيوم:

$$^{238}_{92}U \xrightarrow{h} {}^{234}_{90}Th \xrightarrow{g} {}^{234}_{91}Pa \ \ldots \rightarrow {}^{A}_{Z}X \ \ldots.$$

أ . ما اسم الجُسيمين (g) و (h)؟

ب. إذا انبعث 6 جُسيمات ألفا وجُسيما بيتا السالبة للوصول إلى النواة $({}^{A}_{Z}X)$، أجد Z و A.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بالاضمحلال الإشعاعي وعمر النصف والنشاطيّة الإشعاعيّة.

2. **أفسّر** انبعاث أشعة غاما من النواة.

3. **أستخدم المتغيّرات:** يقوم أسامة بدراسة نظير مشع في مختبر الإشعاع في جامعته. قاس نشاطيّته الإشعاعيّة فوجدها (400) اضمحلال لكل دقيقة، وبعد ثلاث ساعات أصبحت (100) اضمحلال لكل دقيقة. أجد عمر النصف للنظير المشعّ بالدقيقة.

4. **أحسب:** نظير مشعّ نشاطيّته الإشعاعيّة الآن (800 Bq)، وثابت الاضمحلال له ($4\ln(2)\ days^{-1}$)، فما المدّة الزمنيّة اللازمة حتى تصبح نشاطيّته الإشعاعيّة (100 Bq)؟

5. **أستخدم المتغيرات:** عينة من نظير الثوريوم ($^{228}_{90}Th$) تحتوي على ($2.53 \times 10^{21}\ atoms$)، وثابت الاضمحلال له يساوي ($1.15 \times 10^{-8}\ s^{-1}$)، أجد:

   أ . عمر النصف للثوريوم ($^{228}_{90}Th$).

   ب. النشاطيّة الإشعاعيّة لهذه العينة.

6. **أحلل:** الفلور –18 ($^{18}_{9}F$) نظير مشع مُعَدّ صناعيًّا، عمر النصف له (110 min)، يُستخدم في التصوير الطبّي حيث يضمحلّ ليعطي أحد نظائر الأكسجين وبوزيترون. أعدّت سارة عينة منه تحتوي على ($2.1 \times 10^{16}\ atoms$) لتصوير أحد المرضى.

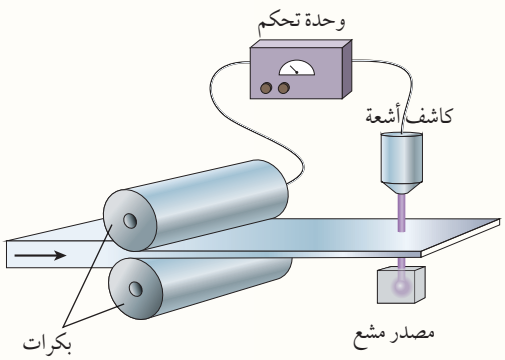
   أ . أكتب معادلة موزونة لاضمحلال الفلور.

   ب. أحسب ثابت الاضمحلال له.

   جـ. ما عدد النوى المشعّة بعد مضي (220 min)؟

7. **أفسّر:** انبعاث جُسيمات بيتا السالبة من النواة بالرغم من عدم احتواء النواة على إلكترونات.

8. **التفكير الناقد:** تُستخدم الأشعّة النوويّة في التحكّم في سُمك الموادّ المصنَّعة كما في الشكل. حيث يوضع أسفل الشريط مصدر مشعّ، وتُستقبل الأشعة بعد نفاذها من الشريط عن طريق كاشف يُرسِل بدوره إشارة إلى جهاز التحكّم عن مقدار الأشعة التي وصلت إليه. فأيّ الأشعّة النوويّة أفضل في هذا الاستخدام؟ ولماذا؟



الدرس 3

الفكرة الرئيسة:

للتفاعلات النوويّة تطبيقات مهمّة في الحياة مثل توليد الطاقة، وإنتاج النظائر المشعّة التي تستخدم في تشخيص الأمراض وعلاجها، وفي كثير من التطبيقات الصناعية.

نتاجات التعلّم:

- أفسر إمكانية حدوث الاندماج النووي بين نواتين خفيفتين، وإمكانية حدوث الانشطار للنوى الثقيلة.
- أستخدم رسومًا توضيحية لأشرح كيف يولّد المفاعل النووي الطاقة الكهربائية.
- أذكر استخدامات النظائر المشعّة في مجالات الحياة المختلفة، وفوائدها ومضارها.
- أُبيّن الآثار الإيجابية والآثار السلبية الناجمة عن استخدام الطاقة النووية.
- أذكر أنّ الطاقة النووية أحد مصادر الطاقة البديلة وأبيّن استخداماتها السلميّة.
- أحسب الطاقة الناتجة من تفاعل نووي انشطاري أو اندماجي.

المفاهيم والمصطلحات:

التفاعل النووي	Nuclear Reaction
النواة المركّبة	Compound Nucleus
التفاعل المتسلسل	Chain Reaction
التَّخصيب	Enrichment
الكتلة الحرجة	Critical Mass
الانشطار النووي	Nuclear Fission
الاندماج النووي	Nuclear Fusion

التفاعل النوويّ Nuclear Reaction

يحدث **تفاعلٌ نوويٌّ Nuclear reaction** عند اصطدام نواتي ذرتين، أو اصطدام جُسيم نووي مثل، البروتون أو النيوترون بنواة ذرة أخرى، وقد ينتج من ذلك نواة جديدة أو أكثر.

ولإحداث تفاعل نووي بين جُسيم ونواة، تقذف النواة بذلك الجسيم وعندما يقترب منها مسافة كافية، يبدأ عندها تأثير القوة النوويّة. ويمكن التعبير عن التفاعل النووي بالصورة الآتية:

$$a + X \rightarrow b + Y$$

حيث يُسمّى الجسيم (a) **القذيفة** Projectile في حين تُسمى (X) **النواة الهدف** Target، و (b) الجُسيم الناتج من التفاعل النووي، و (Y) النواة الناتجة.

في بعض التفاعلات النووية، تمتصّ النواة الهدف القذيفةَ لتشكّل **نواة مركّبة Compound nucleus (CN)** والتي لا تلبث أن تضمحلّ لتعطي نوًى وجسيمات من الممكن أن تختلف عن تلك الداخلة في التفاعل. ومن الأمثلة على ذلك، ما قام به رذرفورد عام 1919 عندما قذف نواة النيتروجين ($^{14}_{7}N$) بجسيمات ألفا (α)، ونتج من ذلك تحرّر بروتون على النحو الآتي:

$$\alpha + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{18}_{9}F^{*} \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}p$$

لقد بدأ هذا التفاعل بنواة النيتروجين ($^{14}_{7}N$) المستقرة مع جسيم ألفا (α) لتكوين نواة مركّبة وهي نظير الفلور ($^{18}_{9}F^{*}$) غير المستقر، والتي لا تلبث أن تضمحلّ لينتج عنها نواة مستقرة ($^{17}_{8}O$) وبروتون ($^{1}_{1}p$). ومن الأمثلة الأخرى على القذائف النووية، البروتونات ونواة الديتيريوم، والنيوترونات. إنّ شحنة جسيمات ألفا والبروتونات موجبة، لذا تُسرَّع حتى تمتلك طاقة حركيّة كافية تُمكّنها من التغلب على قوة التنافر الكهربائية مع النواة الهدف. أمّا النيوترونات لكونها متعادلة كهربائيًّا، فلا تتأثر بقوة تنافر كهربائية؛ لذا تُعدّ من القذائف المهمّة في إنتاج النظائر المشعّة، التي تُستخدم في العديد من مجالات الحياة.

أحسب الطاقة الممتَصّة أو المتحرّرة من التفاعل (Q) من الفرق في الكتلة بين كتل النوى والجسيمات الداخلة في التفاعل وتلك الناتجة منه، باستخدام العلاقة الآتية:

$$Q = [m_a + m_X - (m_b + m_Y)] \times 931.5$$

حيث الكتل بوحدة (amu) و Q بوحدة (MeV).

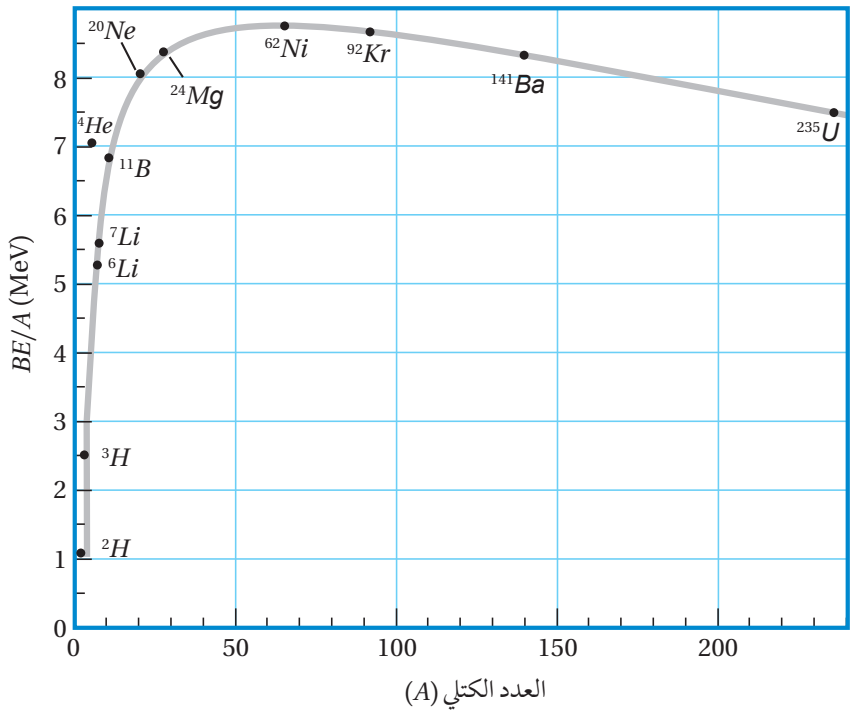
إذا كانت قيمة (Q) موجبة يكون التفاعل **منتجًا للطاقة** Exoergic، وإذا كانت قيمة (Q) سالبة يكون التفاعل **ماصًّا للطاقة** Endoergic.

✓ **أتحقّق:** أوضّح المقصود بالتفاعل النووي.

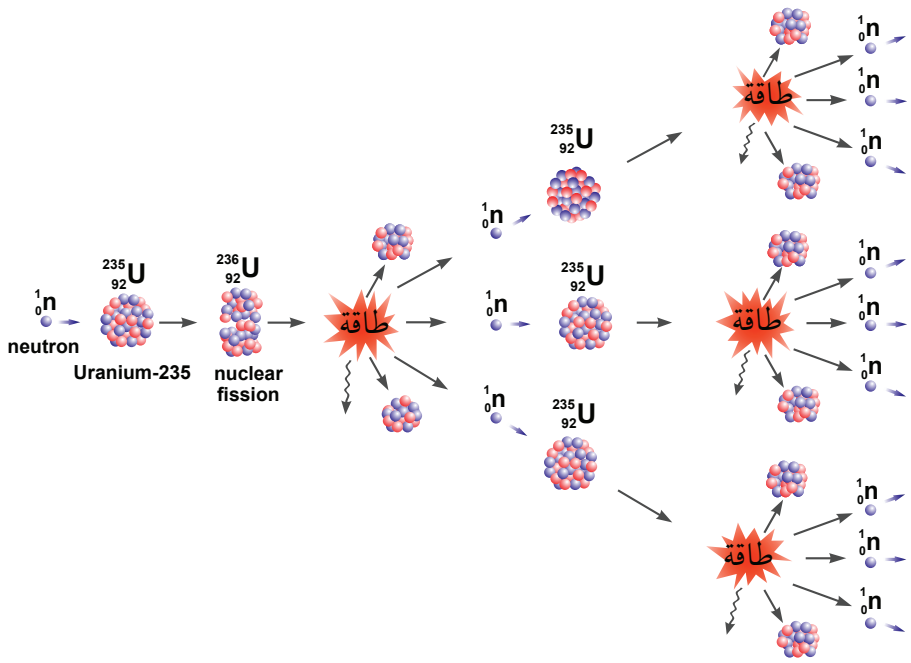
أفكّر: في التفاعلات النووية تُسرَّع القذيفة وتُوجَّه نحو النواة الهدف. فما المجالات المستخدَمة في تسريع القذيفة وتوجيهها نحو النواة الهدف؟ وما دور كلٍّ منها؟

الانشطار النووي Nuclear Fission

الانشطار النووي Nuclear fission عبارة عن انقسام نواة ثقيلة لنواتين أو أكثر، أصغر منها في الكتلة. والنوى الأكثر قابلية للانشطار هي النوى الثقيلة التي تقع على يمين المنحنى الموضَّح في الشكل (10). فمثلاً، عند قذف نواة $(^{235}_{92}U)$ بنيوترون بطيء تنشطر إلى نواتين، هما: $(^{141}_{56}Ba)$ و $(^{92}_{36}Kr)$، وينتج 3 نيوترونات، وتمتلك النوى الناتجة من هذا الانشطار طاقات ربط نووية لكل نيوكليون أكبر



الشكل (10): تغيّر طاقة الربط النووية لكل نيوكليون مع العدد الكتلي. اندماج نواتين خفيفتين أو انشطار نواة ثقيلة يحرّر طاقة؛ لأنّ النوى الناتجة ذات طاقة ربط نووية لكل نيوكليون أكبر.



الشكل (11): التفاعل المتسلسل.

كما في الجدول (6)، ويصاحب ذلك نقص في الكتلة يتحوّل إلى طاقة. ويمكن التعبير عن هذا الانشطار بالمعادلة النووية الآتية:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U^{*} \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n $$

حيث نواة $({}^{236}_{92}U^{*})$ المثارة تمثل النواة المركّبة في هذا التفاعل.

إنّ انشطار كلّ نواة ${}^{235}_{92}U$ ينتج عنه طاقة تساوي (200 MeV) تقريبًا، أو ما يعادل $(3.2 \times 10^{-11}\ \text{J})$، أمّا الطاقة الناتجة من انشطار (1 kg)، فتساوي $(82 \times 10^{12}\ \text{J})$. وهذه الطاقة تكفي لتزويد نحو (45) ألف منزل تقريبًا مدة شهر، يستهلك كلٌّ منها طاقة كهربائية بمقدار (500 kWh).

تنبعث نيوترونات نتيجة انشطار نواة نظير اليورانيوم $({}^{235}_{92}U)$، وهذه النيوترونات قد تمتصّها نواة $({}^{235}_{92}U)$ أخرى التي بدورها تنشطر، وتُنتج نيوترونات جديدة قد تمتصّها نوى يورانيوم أخرى، وهذا ما يُسمّى **تفاعلاً متسلسلاً Chain reaction** على نحو ما يظهر في الشكل (11).

وكي يكون التفاعل المتسلسل ممكنًا من الناحية العمليّة يجب توافر أمور عدّة أهمّها، توافر **اليورانيوم المخصّب** Enriched uranium. حيث يحتوي اليورانيوم الخام على (0.71%) تقريبًا من اليورانيوم $({}^{235}_{92}U)$ المستخدم في التفاعل المتسلسل، ونحو (99.27%) تقريبًا من اليورانيوم $({}^{238}_{92}U)$، ونسبة قليلة جدًّا من

الجدول (6): طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

النواة	$\frac{BE}{A}$ (MeV)
${}^{235}_{92}U$	7.5909
${}^{141}_{56}Ba$	8.3261
${}^{92}_{36}Kr$	8.5127

أفكّر: لماذا يحتاج البروتون إلى طاقة أكبر من النيوترون ليقترب من النواة ويحدث تفاعلًا نوويًّا؟

نظائر أخرى. ونظرًا إلى أنّ نسبة $({}^{235}_{92}U)$ قليلة، لذا يجب معالجة اليورانيوم الخام لزيادة نسبة النظير $({}^{235}_{92}U)$ الذي يُستخدم في الوقود النووي. إنّ العمليّة التي تُزاد فيها نسبة اليورانيوم $({}^{235}_{92}U)$ تُسمّى **التخصيب Enrichment**. إضافةً إلى ذلك، يجب توفير الحدّ الأدنى من الكتلة التي تضمن استمرار حدوث التفاعل، وتُسمّى **الكتلة الحرجة Critical mass** وهي أقلّ كتلة من الوقود النووي تضمن استمرار حدوث التفاعل المتسلسل، وتضمن عدم تسرّب النيوترونات خارجه.

✓ **أتحقّق:** أوضّح المقصود بتفاعل الانشطار النووي.

أصمّم باستخدام برنامج السكراتش (Scratch) عرضًا يُوضّح التفاعل المتسلسل، أوضح فيه تأثير زيادة عدد نوى اليورانيوم -235 على عدد الانشطارات التي تحدث في وحدة الزمن، ثم أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

المثال 14

أحسب الطاقة Q الناتجة من تفاعل الانشطار الآتي:

$${}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U^{*} \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n$$

حيث كتل النوى مُعطاة في الجدول الآتي:

${}^{235}_{92}U$	${}^{141}_{56}Ba$	${}^{92}_{36}Kr$	${}^{1}_{0}n$
234.9934	140.8840	91.9064	1.0087

المُعطيات: الكتل في الجدول

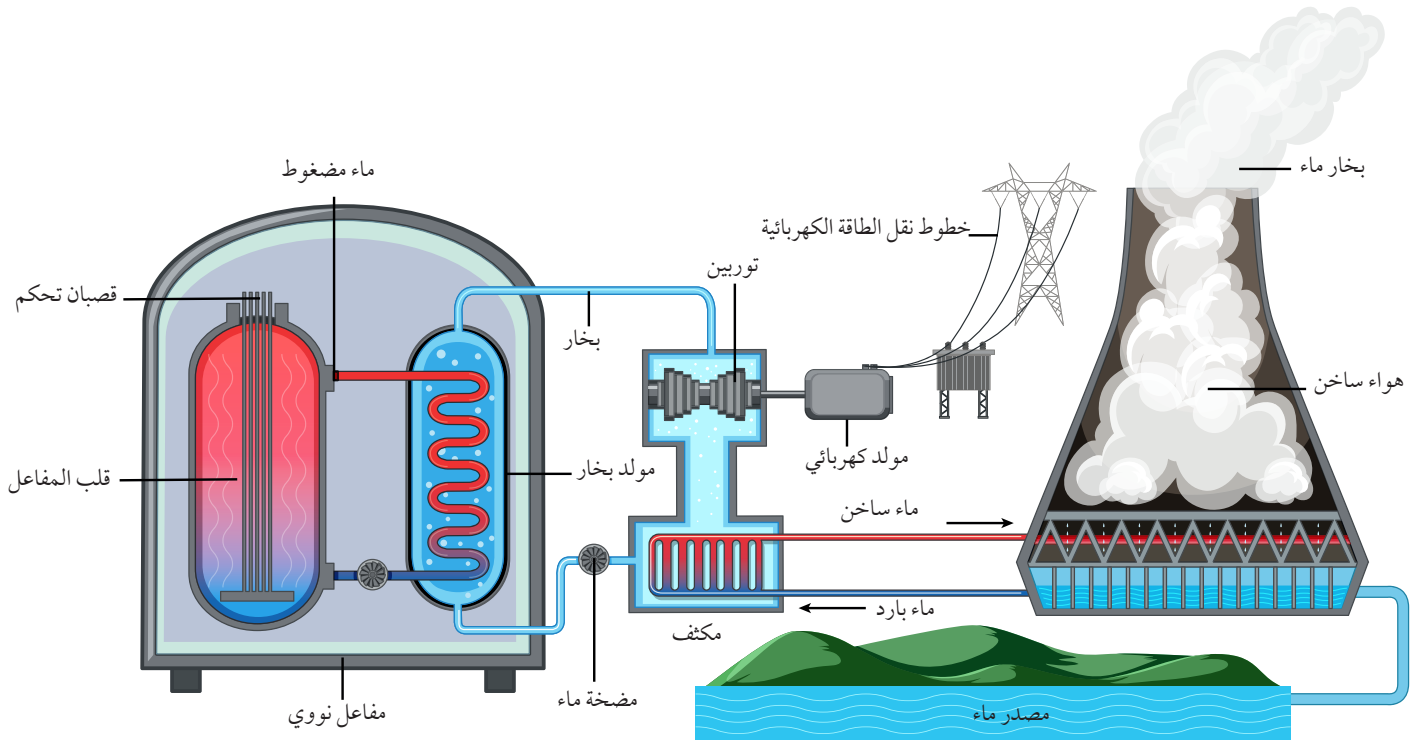
المطلوب: $Q = ?$

الحل:

$$Q = [m_a + m_X - (m_b + m_Y)] \times 931.5$$

$$= (1.0087 + 234.9934 - (140.8840 + 91.9064 + 3 \times 1.0087)) \times 931.5$$

$$= 0.1856 \times 931.5 = 172.9 \text{ MeV}$$



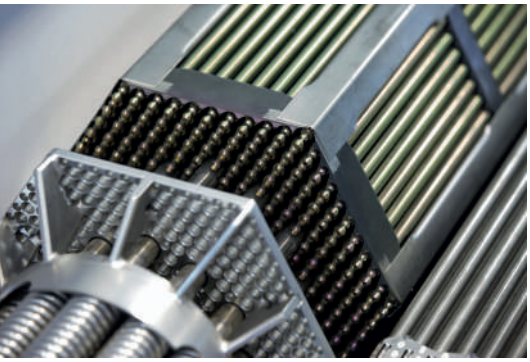
الشكل (12): رسم تخطيطي لمحطّة طاقة نوويّة تستخدم مفاعل الماء المضغوط.

المفاعل النوويّ Nuclear Reactors

يُسمّى النظام الذي يهيّئ الظروف المناسبة لاستمرار حدوث التفاعل المتسلسل والسيطرة عليه بالمفاعل النووي. والشكل (12) يبيّن الأجزاء الرئيسة لمفاعل نووي يَستخدم الماء في عملية التبريد، يُسمّى مفاعل الماء المضغوط Pressurized water reactor.

ويتكوّن المفاعل النووي الموضَّح في الشكل من الأجزاء الأساسية الآتية:

1. **الوقود النوويّ Nuclear fuel:** تكون مادّة الوقود النوويّ على الغالب من اليورانيوم المخصّب، حيث تُعَدّ على شكل أقراص يوضع بعضها فوق بعض في أنابيب طويلة لتشكيل قضبان الوقود النووي، كما في الشكل (13).
2. **قضبان التحكّم Control rods:** تُصنع من موادّ لديها مقدرة عالية على امتصاص النيوترونات مثل، الكادميوم –113، والبورون –10. فعند إدخال عدد مناسب منها بين حزم الوقود النووي تمتص بعضًا من النيوترونات ما يؤدي إلى إبطاء التفاعل المتسلسل، وبذلك يتم التحكم في الطاقة الناتجة من المفاعل.
3. **الموادّ المُهدّئة Moderators:** وهي موادّ ذات أعداد كتلية صغيرة، مثل: الماء الثقيل، والماء العادي، والغرافيت. وتبطّئ الموادّ المهدّئة النيوترونات الناتجة من الانشطار؛ لتتمكّن من إحداث تفاعلات انشطارية جديدة. علمًا أنّ احتماليّة انشطار نواة اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) تزداد كلما كانت الطاقة الحركية للنيوترونات الممتصَّة أقل.



الشكل (13): قضبان الوقود النووي.

الربط بالفضاء

مكّنت التكنولوجيا النووية في إنتاج الطاقة العلماء من استكشاف الفضاء بدقة، إذ تُستخدم الطاقة الناتجة من البلوتونيوم لتوليد الكهرباء في مولّدات المركبات الفضائية، مثل المركبة الفضائية فوياجر 1 التي أُطلقت عام 1977 لدراسة النظام الشمسي الخارجي والتي ما زالت ترسل بيانات إلى يومنا هذا.

الشكل (14): أبراج التبريد يتصاعد منها بخار الماء.

4. **نظام التبريد Cooling system:** تُستخدم أبراج تبريد تُزوِّد المفاعل والمكثّف بالماء البارد باستمرار؛ لتبريد المفاعل النووي، أتأمّل الشكل (14).

5. **مولّد بخار الماء Steam generator:** يُحوِّل الماءَ الساخن والمضغوط القادم من قلب المفاعل إلى بخار ماء يُستخدم في إدارة توربينات متّصلة بمولّدات كهربائية لتوليد الطاقة الكهربائيّة.

✓ **أتحقّق:** أُعدّد أجزاء المفاعل النووي الرئيسة.

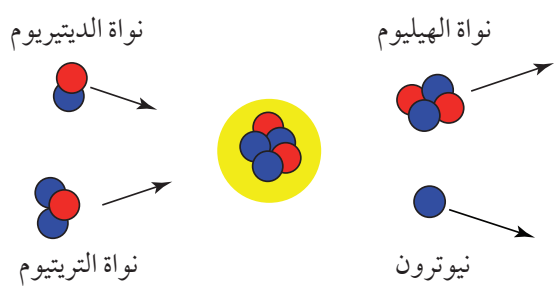
أستخدم برمجية movie maker لإنشاء فيلم قصير عن أجزاء المفاعل النووي، ثم أعرضه على زملائي/ زميلاتي في الصف.

الاندماج النوويّ Nuclear Fusion

يُسمّى التفاعل الذي تندمج فيه نواتان خفيفتان لتكوين نواة كتلتها أقلّ من مجموع كتلتي النواتين المندمجتين، ولها طاقة ربط نووية لكل نيوكليون أكبر ممّا لهما، بتفاعل **الاندماج النووي Nuclear fusion**. يحدث الاندماج النووي للنوى الخفيفة (المنطقة اليسرى من المنحنى) في الشكل (10). فمثلاً قد تندمج نواتا نظيري الهيدروجين؛ الديتيريوم $({}^{2}_{1}H)$ والتريتيوم $({}^{3}_{1}H)$ لتكوين نواة الهيليوم $({}^{4}_{2}He)$ ونيوترون كما في الشكل (15). ويوضّح الجدول (7) طاقة الربط النووية لكل نيوكليون لكلٍّ منها. ألاحظ من الجدول أنّ اندماج نواتي الديتيريوم $({}^{2}_{1}H)$ والتريتيوم $({}^{3}_{1}H)$ نتج عنه نواة الهيليوم $({}^{4}_{2}He)$ ذات طاقة ربط نووية لكل نيوكليون أكبر منها لنواتي الديتيريوم والتريتيوم. ويصاحب عملية

الجدول (7): طاقة الربط النوويّة لكل نيوكليون.

النواة	$\frac{BE}{A}$ (MeV)
${}^{2}_{1}H$	1.11
${}^{3}_{1}H$	2.83
${}^{4}_{2}He$	7.07



الشكل (15): اندماج نواتي الديتيريوم والتريتيوم لتشكيل نواة الهيليوم.

الاندماج نقص في الكتلة ينتج عنه تحرّر طاقة كبيرة. ومن الأمثلة على تفاعلات الاندماج النوويّ:

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

$$^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{1}H + {}^{0}_{1}e^{+} + \nu$$

$$^{1}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma$$

مثل هذه التفاعلات النوويّة هي مصدر الطاقة التي تصلنا من الشمس، وتحتاج إلى درجات حرارة عالية جدًّا حتى تحدث؛ لذا تُسمّى هذه التفاعلات **التفاعلاتِ النوويّةَ الحراريّةَ** Thermonuclear fusion reactions. إنّ درجة الحرارة العالية تزوّد النواتين بطاقة حركيّة كافية للتغلّب على قوة التنافر الكهربائيّة بين النواتين عند اقترابهما من بعض لمسافة تبدأ عندها القوة النوويّة بالتأثير. وعلى الرغم من صعوبة إجراء تفاعل الاندماج النووي، فهناك أبحاث جارية للتغلب على تلك الصعوبات، وذلك للاستفادة من الطاقة الكبيرة التي يمكن الحصول عليها دون إنتاج نوى مشعّة على نحو ما يحدث في مفاعلات الانشطار النووي.

الربط بالتكنولوجيا

افتُتح المفاعل النوويّ الأردنيّ للبحوث والتدريب برعاية ملكية سامية عام 2016م في جامعة العلوم والتكنولوجيا في مدينة إربد، حيث يعمل بقدرة (5 MW) قابلة للزيادة إلى (10 MW). ويُستخدم هذا المفاعل في أغراض عدّة، منها:

البحث العلميّ، وإنتاج النظائر المشعّة للاستخدامات الطبية، إضافة إلى التدريب والتأهيل على التكنولوجيا الإشعاعية والنوويّة.

✓ **أتحقّق:** أوضّح المقصود بتفاعل الاندماج النووي.

المثال 15

أجد طاقة التفاعل Q لتفاعل الاندماج الآتي:

$$^{1}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma$$

حيث كتل النوى بوحدة (amu)

$^{1}_{1}H$	$^{3}_{2}He$	$^{2}_{1}H$
1.0073	3.0149	2.0136

المعطيات: الكتل في الجدول

المطلوب: $Q = ?$

الحل:

$$Q = [m_a + m_X - (m_b + m_Y)] \times 931.5$$

$$= (1.0073 + 2.0136 - 3.0149) \times 931.5$$

$$= 0.0060 \times 931.5 = 5.6 \text{ MeV}$$

تطبيقات على الفيزياء النووية Applications of Nuclear Physics

للفيزياء النووية تطبيقات عدّة في مختلف نواحي الحياة منها:

التعقُّب Tracing

تتكونُ المُتعقّبات من نظائر مشعّة تُحقن في الجسم للكشف عن خلل وظيفي في أحد أعضائه. فمثلا يُستخدم اليود –131 المشع للكشف عن خلل في عمل الغدة الدرقية، حيث يشربُ المريضُ كمية قليلة من محلول يوديد الصوديوم المشع، ويُشخَّص الخلل في عمل الغدة الدرقية بمعرفة كمية اليود المشع المتبقة فيها مع مرور الزمن. ومن التطبيقات الطبّية الأخرى حقن وريد في القدم بسائل يحتوي على الصوديوم المشع، وقياس الزمن اللازم حتى يصل السائل المشع إلى عضو معين في الجسم، وذلك باستخدام جهاز للكشف عن الإشعاع. والزمن المقاس يُمكّن من معرفة ما إذا كان هناك تضيُّق أو انسداد في الأوردة أو الشرايين. وفي التطبيقات الطبية يتم تعريض المريض لجرعات إشعاعية متدنيّة ومحسوبة بدقة بحيث لا تؤثر سلبًا فيه.

الربط بالحياة

يمكن استخدام التعقّب الإشعاعيّ في مراقبة تدفّق السوائل والغازات خلال الأنابيب لتحديد أماكن التسرّب. وتَرصد أدوات التعقّب الزراعية تدفّق المُغذّيات عبر النباتات.

العلاج بالإشعاع Radiation Therapy

تنقسم الخلايا السرطانية بسرعة كبيرة، والإشعاعات الناتجة من النظائر المشعة فعالة في قتل هذا النوع من الخلايا. فمثلا يستخدم نظير اليود–131 المشع في علاج سرطان الغدة الدرقية، كما يستخدم الكوبالت–60 في علاج سرطان الحنجرة.

تحليل المواد Materials Analysis

يمكنُ تحديدُ العناصر التي تُكوّن عينة معينة بطرق كيميائية، وهذا عادة يتطلب استخدام كمية كبيرة نسبيًّا من تلك العينة. يمكن التغلب على ذلك بقذف كمية قليلة من العينة المراد معرفة تركيبها بالنيوترونات، ما يؤدي إلى تحول العناصر التي امتصت النيوترونات إلى عناصر مشعة، وتُحدَّد هوية تلك العناصر بالكشف عن نوع الإشعاعات الصادرة عن العينة المشعّة وقياس طاقتها.

حفظ المواد الغذائية Food Preserving

تطبيقات الفيزياء النووية في مجال الأطعمة تشهد اهتمامًا متزايدًا لقدرة الإشعاعات النووية على تعطيل عمل البكتيريا و قتلها. لذلك تُعرَّض المواد الغذائية المراد تخزينها مددًا طويلة لأشعة غاما أو حزم من الإلكترونات ذات طاقة مرتفعة لقتل البكتيريا، ومن ثَمَّ، تُحفظ في علب مغلقة لمنع وصول بكتيريا جديدة إليها.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** أوضّح المقصود بتفاعل الانشطار النوويّ وتفاعل الاندماج النوويّ.

2. للتفاعلين النوويين الآتيين، أجيب عمّا يأتي:

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n$$

علمًا أنّ كتل النوى بوحدة (*amu*) موضّحة في الجدول الآتي:

$^{235}_{92}U$	$^{144}_{56}Ba$	$^{89}_{36}Kr$	$^{1}_{0}n$	$^{4}_{2}He$	$^{3}_{1}H$	$^{2}_{1}H$
234.9934	143.8922	88.8979	1.0087	4.0015	3.0155	2.0136

أ . أيّ التفاعلين تفاعل اندماج نووي؟ وأيّهما تفاعل انشطار نووي؟

ب. **أتوقّع:** لكلا التفاعلين، أيهما يمتلك طاقة ربط نوويّة لكل نيوكليون أكبر: النوى الناتجة من التفاعل أم النوى الداخلة فيه؟

جـ. **أستخدم المتغيّرات:** أحسب الطاقة الناتجة من التفاعل لكلا التفاعلين.

د . **أستخدم المتغيّرات:** أحسب الطاقة الناتجة لكل نيوكليون لكلا التفاعلين. أيّهما أكبر؟

هـ. **أتوقّع:** أيّ التفاعلين يُنتِج طاقة أكبر للكتلة نفسها من الموادّ الداخلة في التفاعل؟

3. **أُقارن:** أعدّد أوجه التشابه وأوجه الاختلاف بين تفاعل الاندماج وتفاعل الانشطار.

4. **أفسّر:** ما أهميّة استخدام كلٍّ ممّا يأتي في المفاعل النووي؟

أ. القضبان التي تحتوي على الكادميوم.

ب. مُهدِّئات النيوترونات.

5. **أفسّر** أهميّة درجة الحرارة العالية للتفاعل النووي الاندماجي.

6. **أفسّر:** هل يصلح اليورانيوم الخام للاستخدام في المفاعلات النوويّة؟ أفسّر إجابتي.

7. **التفكير الناقد:** لماذا يُعدّ استخدام تفاعلات الاندماج النووي، إن أمكن في توليد الطاقة، أقلّ خطرًا على البيئة من استخدام تفاعلات الانشطار النووي؟

المفاعل النوويّ الاندماجي
Nuclear Fusion Reactor

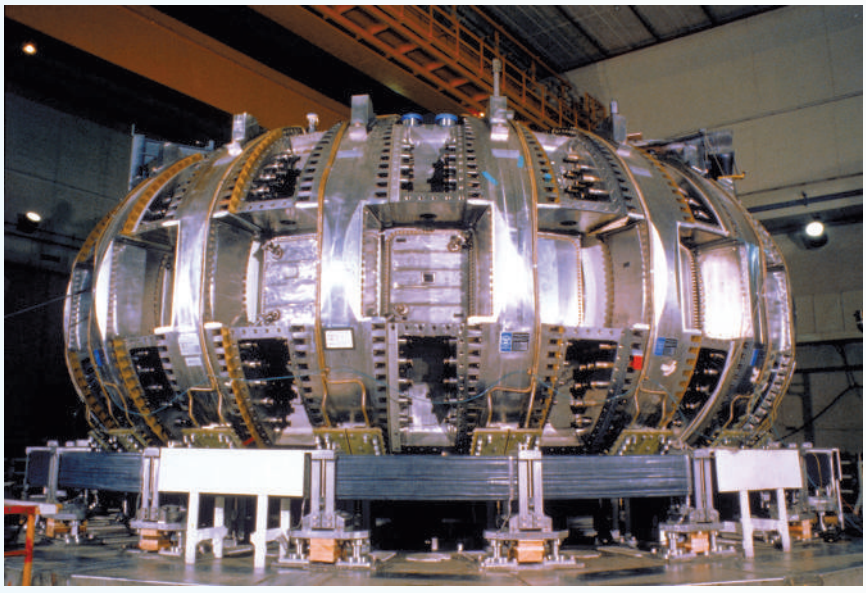
تُعدّ كميّة الطاقة الكبيرة المتولّدة من الاندماج النووي محفِّزًا أمام العلماء لتسخير هذه الطاقة لأغراض مفيدة، ويُبذل كثير من الجهود حاليًّا لتطوير مفاعل نووي اندماجي مستدام يمكن التحكّم فيه. ومن مزاياه: توافر الوقود النووي؛ الديتيريوم $({}^{2}_{1}H)$ والتريتيوم $({}^{3}_{1}H)$ ، وإنتاج طاقة كبيرة مقارنة بتفاعلات الانشطار النووي، وتكوين عدد قليل نسبيًّا من المنتجات الثانوية المشعّة مقارنة بمفاعلات الانشطار النووي. فوقود اليورانيوم بعد انشطاره يحتوي على نسبة عالية من الموادّ المشعّة التي يجب التخلص منها، وتتطلّب إجراءات صارمة عند نقل اليورانيوم المخصّب لا تلزم عند نقل الوقود المستخدم في الاندماج النووي.

وتُنتِج النجوم طاقتها من تفاعلات الاندماج النووي بدورة تُسمّى دورة البروتون-بروتون، وتَحدث هذه التفاعلات عند درجة حرارة عالية جدًّا وكثافة عالية جدًّا للبروتونات. ووُجِد أنّ التفاعل الأنسب للاستخدام في مفاعلات الاندماج، هو تفاعل الديتيريوم $({}^{2}_{1}H)$ والتريتيوم $({}^{3}_{1}H)$.

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n \quad , \quad Q = 17.6\,MeV $$

ويتوافر الديتيريوم بكميات كبيرة في البحيرات والمحيطات وهو غير مكلف. أمّا التريتيوم، فإنّه مشعّ $(t_{1/2} = 12.3\ \text{y})$ حيث يخضع لاضمحلال بيتا السالبة لينتج $({}^{3}_{2}He)$. ولهذا السبب لا يوجد التريتيوم طبيعيًّا بكميات كبيرة، ويجب إنتاجه صناعيًّا.

للحصول على الطاقة من الاندماج النووي يجب توافر درجات حرارة عالية (نحو 10^{8} K تقريبًا)؛ تؤدي إلى تأيين الذرّات وتكوين نظام من الإلكترونات والأيونات الموجبة يُسمّى بلازما. وبالإضافة إلى درجات الحرارة العالية، يجب التأثير بضغط كبير للحصول على كثافة عالية من الأيونات. إن درجات الحرارة المرتفعة تؤدي إلى نقصان في كثافة الأيونات وهذا يشكل أحد المشكلات الرئيسة التي تواجه انتاج الطاقة من تفاعلات الاندماج النووي. وقد استطاع العلماء تحقيق تفاعل اندماج الديتيريوم $({}^{2}_{1}H)$ والتريتيوم $({}^{3}_{1}H)$ مدّة زمنية قصيرة جدًّا باستخدام مفاعل اندماجي، يُعرف باسم توكاماك (tokamak). حيث تُحفظ البلازما داخل مجال مغناطيسي على نحو ما تعلّمت في الوحدة الرابعة.



مراجعة الوحدة

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

1. النيوترينو جُسيم يَنتج عن عمليّة:
   أ . تحلّل البروتون إلى نيوترون وبوزيترون.
   ب. تحلّل النيوترون إلى بروتون وإلكترون.
   جـ. اضمحلال غاما.
   د . خروج جُسيم ألفا من النواة.

2. النواة غير المستقرة تتحوّل تلقائيًّا إلى نواة ذات كتلة:
   أ . أقلّ وطاقة ربط أعلى لكل نيوكليون.
   ب. أكبر وطاقة ربط أقلّ لكل نيوكليون.
   جـ. أكبر وطاقة ربط أعلى لكل نيوكليون.
   د . أقلّ وطاقة ربط أقلّ لكل نيوكليون.

3. $({}^{A}_{Z}X)$ نواة نظير عنصر غير مستقرّة، تقع ضمن سلسلة اضمحلال. بعد سلسلة من التحولات أُطلِقت أربعة جُسيمات بيتا السالبة وجُسيم ألفا واحدًا، فإنّ النواة الناتجة تكون:
   أ . ${}^{A-4}_{Z+2}Y$ ب. ${}^{A-2}_{Z-4}Y$ جـ. ${}^{A+2}_{Z+4}Y$ د. ${}^{A+4}_{Z-2}Y$

4. عدد جُسيمات ألفا وبيتا السالبة المنبعِثة من سلسلة تحوّلات تضمحلّ خلالها نواة $({}^{238}_{92}U)$ إلى نواة $({}^{226}_{88}X)$ على الترتيب هي:
   أ . 2 ألفا ، 3 بيتا ب. 3 ألفا ، 4 بيتا جـ. 2 ألفا ، 2 بيتا د. 3 ألفا ، 2 بيتا

5. عدد النيوترونات في النوى المستقرّة الثقيلة يكون:
   أ . مساويًا لعدد البروتونات
   ب. أقلّ من عدد البروتونات
   جـ. أقلّ بكثير من عدد البروتونات
   د. أكبر من عدد البروتونات

6. طاقة الربط النووية هي الطاقة اللازمة لـ:
   أ . فصل مكوّنات النواة لتكون بعيدة بعضها عن بعض.
   ب. فصل الإلكترونات عن النواة.
   جـ. فصل بروتون واحد عن النواة.
   د . فصل نيوترون واحد عن النواة.

7. إنّ حجم النواة يتناسب:
   أ . طرديًّا مع عددها الكتلي.
   ب. عكسيًّا مع عددها الكتلي.
   جـ. طرديًّا مع مكعب عددها الكتلي.
   د. طرديًّا مع الجذر التكعيبي لعددها الكتلي.

8. تهدف عملية تخصيب اليورانيوم إلى إنتاج وقود نووي يحتوي على نسبة عالية من:
   أ . ${}^{238}_{92}U$ ب. ${}^{234}_{92}U$ جـ. ${}^{232}_{92}U$ د. ${}^{235}_{92}U$

9. نسبة نصف قطر النواة $({}^{27}_{13}Al)$ إلى نصف قطر النواة $({}^{64}_{29}Cu)$ تساوي:

أ. $\frac{3}{4}$ ب. $\frac{27}{64}$ جـ. $\frac{8}{3}$ د. $\frac{64}{27}$

10. نسبة حجم النواة $({}^{27}_{13}Al)$ إلى حجم النواة $({}^{64}_{29}Cu)$ تساوي:

أ. $\frac{3}{8}$ ب. $\frac{27}{64}$ جـ. $\frac{8}{3}$ د. $\frac{64}{27}$

11. تُبطِّأ النيوترونات في المفاعل النووي بـ:

أ. الماء الثقيل ب. الكادميوم جـ. اليورانيوم د. الهيدروجين

12. إذا كانت كتلة نواة نظير الليثيوم $({}^{7}_{3}Li)$ تَقلّ بمقدار (0.042 amu) عن مجموع كتل مكوّناتها، فإنّ متوسط طاقة الربط النووية لكل نيوكليون (MeV) لها تساوي:

أ. 3.910 ب. 5.589 جـ. 1.412 د. 7.120

2. أستخدم المتغيّرات: عينة من البولونيوم $({}^{210}_{84}Po)$ تحتوي على $(2.8 \times 10^{18}\ \text{atoms})$، وثابت الاضمحلال للبولونيوم $({}^{210}_{84}Po)$ يساوي $(5.8 \times 10^{-8}\ \text{s}^{-1})$، أجد:

أ. عمر النصف للبولونيوم $({}^{210}_{84}Po)$.

ب. النشاطيّة الإشعاعيّة.

جـ. عدد النوى المتبقيّة من البولونيوم $({}^{210}_{84}Po)$ بعد مرور مدة زمنية مقدارها أربعة أمثال عمر النصف.

3. أستخدم المتغيّرات: عينة من الأمريسيوم $({}^{241}_{95}Am)$ تحتوي على $(1.25 \times 10^{15}\ \text{atoms})$ ونشاطيّتها الإشعاعيّة (1.70 μCi)، أجد ثابت الاضمحلال للأمريسيوم $({}^{241}_{95}Am)$.

4. أستخدم المتغيّرات: يمثّل الشكل المجاور عينة من الكوبالت $({}^{60}_{27}Co)$ تُستخدم في المختبرات لدراسة طبيعة إشعاع غاما، بالاستعانة بالمعلومات المثبَتة على الشكل، أجد:

أ. عمر النصف.

ب. النشاطيّة الإشعاعيّة للعينة.

جـ. تاريخ تصنيع العينة.

د. النشاطيّة الإشعاعيّة في (JUL 2019)، أيْ بعد مرور زمن يساوي ضعفي عمر النصف.

5. أستخدم المتغيّرات: أحسب الطاقة اللازمة لفصل نواة النيكل $({}^{60}_{28}Ni)$ إلى مكوّناتها، علمًا أن كتلة نواة النيكل $({}^{60}_{28}Ni)$ تساوي (59.91541 *amu*).

6. إذا كانت طاقة الربط النووية لنواة $({}^{23}_{11}Na)$ تساوي (186.66 MeV)، ولنواة $({}^{23}_{12}Mg)$ تساوي (181.82 MeV)،

أ. **أستخدم المتغيرات:** أحسب طاقة الربط النوويّة لكل نيوكليون للنواتين.

ب. **أصدر حكمًا:** أيّ النواتين أكثر استقرارًا؟ أفسّر إجابتي.

7. أُكمل المعادلات النوويّة الآتية:

$^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + \cdots + \cdots$

$^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{7}_{3}Li + \cdots$

$^{242}_{96}Cm + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{245}_{98}Cf + \cdots$

$^{1}_{0}n + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{14}_{6}C + \ldots.$

$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + \cdots + \cdots$

$^{13}_{7}N \rightarrow {}^{13}_{6}C + \ldots. + \ldots..$

8. أكمل الجدول الآتي:

نوع الإشعاع / وجه المقارنة	ألفا	بيتا	غاما
طبيعة الإشعاع			
نوع الشحنة			
الكتلة			
القدرة على النفاذ			
القدرة على التأيين			

9. **أستخدم المتغيّرات:** قذفت نواة ($^{9}_{4}Be$) بجُسيم ألفا، وفقًا للتفاعل النووي الآتي:

$$^{4}_{2}He + {}^{9}_{4}Be \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n$$

فإذا علمت أنّ كتل النوى الداخلة في التفاعل تزيد بمقدار ($0.00612\ amu$) على كتل الموادّ الناتجة من التفاعل. واعتمادًا على كتل النوى والجُسيمات في الجدول الآتي أجيب عمّا يأتي:

النواة أو الجُسيم	$^{12}_{6}C$	$^{4}_{2}He$	$^{1}_{1}P$	$^{1}_{0}n$
الكتلة (amu)	11.9967	4.0015	1.0073	1.0087

أ . هل التفاعل النووي منتِج للطاقة أم ماصّ لها؟

ب. أحسب كتلة نواة ($^{9}_{4}Be$).

جـ. أحسب طاقة الربط النووية لكل نيوكليون لنواة ($^{12}_{6}C$)، بوحدة (MeV).

10. **أستخدم المتغيّرات:** في التفاعل النووي الآتي: $^{1}_{0}n + {}^{10}_{5}B \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He$

أحسب الطاقة الناتجة من التفاعل بوحدة الإلكترون فولت. علمًا أنّ كتل الجُسيمات والنوى مُبيَّنة في الجدول الآتي:

النواة أو الجُسيم	$^{7}_{3}Li$	$^{4}_{2}He$	$^{10}_{5}B$	$^{1}_{0}n$
الكتلة (amu)	7.0144	4.0015	10.0103	1.0087

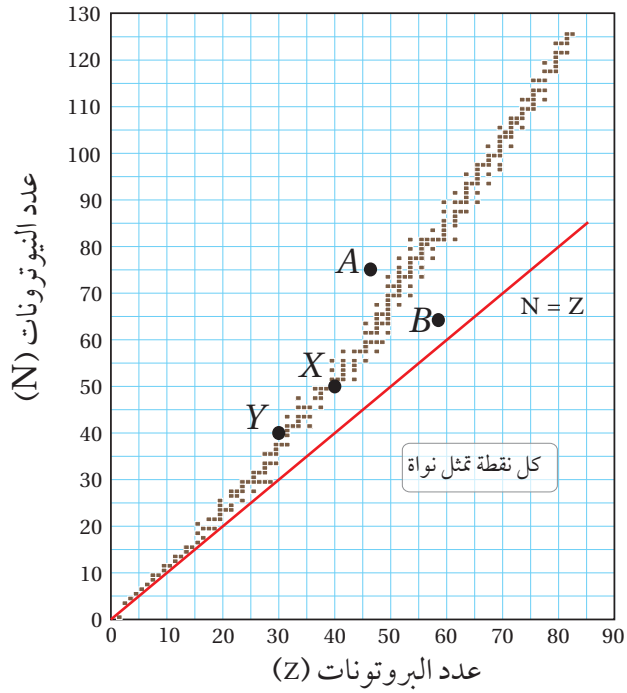
11. أستخدم المتغيّرات: إذا كانت طاقة الربط النوويّة لكل نيوكليون لنواة الفوسفور $^{30}_{15}P$ تساوي (8.35 MeV)، أجد ما يأتي:

أ . طاقة الربط النوويّة لنواة الفسفور $^{30}_{15}P$.

ب. كتلة نواة الفسفور $^{30}_{15}P$.

12. أستخدم المتغيّرات: إذا كان الفرق بين كتلة نواة ومجموع كتل مكوّناتها يساوي $(1.64 \times 10^{-28}\ kg)$، أجد طاقة الربط النوويّة للنواة بوحدة جول.

13. أحلّل: يمثّل الرسم البياني المبيَّن في الشكل منحنى الاستقرار النوويّ.



أ . أحسب نصف قطر النواة (X).

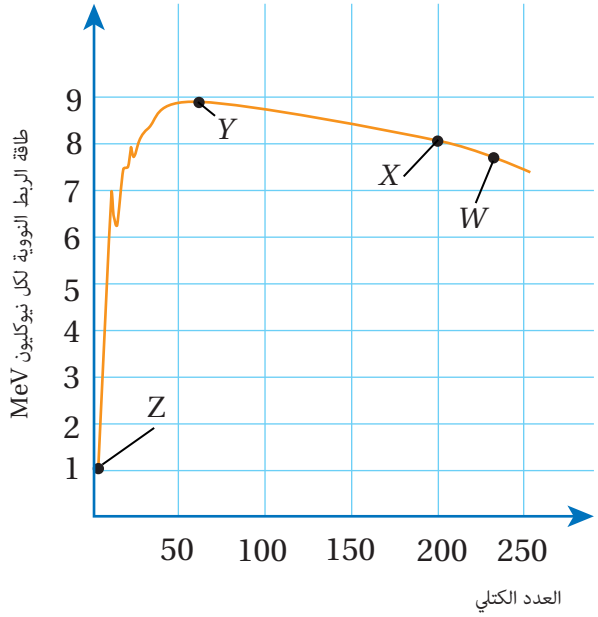
ب. أحسب طاقة الربط النووية للنواة (Y)، علما أن كتلتها تساوي $(70.0012\ amu)$.

جـ. أيُّهما يملك طاقة ربط نوويّة لكل نيوكليون أعلى (X) أم (Y)، ولماذا؟

د . كيف أفسّر أنّ عدد النيوترونات أكبر من عدد البروتونات للنواة (X).

هـ. أسمّي من الشكل نواتين مستقرتين ونواتين غير مستقرتين.

14. أحلّل: يمثّل المنحنى المجاور العلاقة بين طاقة الربط النوويّة لكل نيوكليون والعدد الكتلي لنوى العناصر (Z, Y, X, W). اعتمادًا على المنحنى، أُجيب عن الأسئلة الآتية:



أ . أيّ هذه العناصر أكثر استقرارًا ؟ ولماذا؟

ب. أيّ هذه العناصر أكثر قابليّة للانشطار، وأيّها أكثر قابليّة للاندماج عند إحداث تفاعل نووي؟

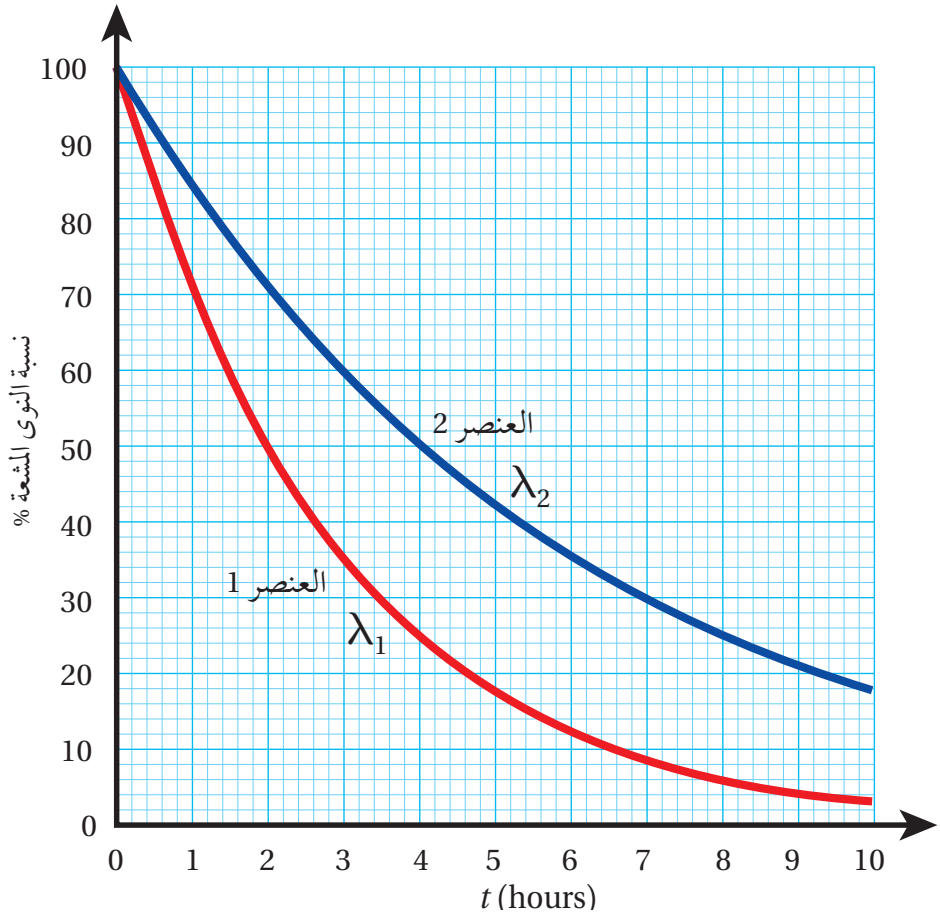
جـ. أحسب طاقة الربط النووية لنواة العنصر (X).

15. أحلّل رسمًا بيانيًّا: يمثّل الشكل رسمًا بيانيًّا يوضّح العلاقة بين النسبة $\frac{N}{N_0} \times 100\%$ مع الزمن لنظيري عنصرين مشعّين، ثابتُ الاضمحلال لكلٍّ منهما (λ_1, λ_2).

أ . ما عمر النصف لكلٍّ منهما؟

ب. ما نسبة عدد النوى المشعّة المتبقيّة بعد مرور 10 ساعات لكلٍّ من النظيرين؟

جـ. أيّهما أكبر (λ_1) أم (λ_2)؟



مسرد المصطلحات

- **الإشابة Doping:** زيادة الموصليّة الكهربائيّة لأشباه الموصلات، بإضافة بعض الموادّ إليها تُسمّى شوائب impurities.
- **اقتران الشغل للفلزّ Work Function:** أقلّ طاقة للأشعة الكهرمغناطيسية تكفي لتحرير إلكترونات من سطح الفلز دون إكسابها طاقة حركية.
- **الاضمحلال الاشعاعي Radioactive Decay:** التحول التلقائي لنوى غير مستقرة إلى نوى أكثر استقراراً عن طريق انبعاث جسيمات مثل جُسيم ألفا أو جسيم بيتا، وغالباً ما يصاحب ذلك انبعاث أشعة غاما.
- **إلكترونات التكافؤ Valance Electrons:** الإلكترونات الموجودة في آخر مستوى طاقة للذرّة، وهي المسؤولة عن تحديد كثيرٍ من خصائص المادّة مثل، التوصيل الكهربائي والتوصيل الحراري.
- **الإلكترونات الضوئية Photoelectrons:** الإلكترونات المنبعثة من سطح فلزّ عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردّد مناسب عليه.
- **الاندماج النووي Nuclear Fusion:** التفاعل الذي تندمج فيه نواتان خفيفتان لتكوين نواة كتلتها أقل من مجموع كتلتيهما.
- **الانشطار النووي Nuclear Fission:** التفاعل الذي تنقسم فيه نواة ثقيلة لنواتين أو أكثر، أصغر منها في الكتلة.
- **التَّخصيب Enrichment:** عمليّة رفع نسبة نظير اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) مقارنة مع نسب نظائر اليورانيوم الأخرى.
- **التدفّق المغناطيسي Magnetic Flux:** يُعبّر عنه رياضيًّا بأنّه ناتج الضرب القياسي لمتّجه المجال المغناطيسي (B) ومتّجه المساحة (A)، رمزه (Φ_B).
- **تردّد الرنين Resonance Frequency:** تردّد مصدر فرق الجهد في دارة (*RLC*)، الذي يحدث عنده الرنين، وتكون قيمة التيار الفعّال أكبر ما يمكن.
- **تردّد العتبة Threshold Frequency:** أقلّ تردّد للأشعة الساقطة يتطلّبه تحرير إلكترونات ضوئية من سطح فلزّ دون إكسابها طاقة حركية.

- **التفاعل المتسلسل Chain Reaction:** تنبعث نيوترونات نتيجة انشطار النواة في تفاعل الانشطار النووي، وهذه النيوترونات تمتصّها نوى أخرى التي بدورها تنشطر، وتُنتج نيوترونات جديدة تؤدي إلى انشطار مزيد من النوى ما يؤدي إلى استمرار التفاعل.

- **التفاعل النووي Nuclear Reaction:** اصطدام نواتي ذرتين، أو اصطدام جُسيم نووي مثل، البروتون أو النيوترون بنواة ذرة أخرى، وقد ينتج من ذلك نواة جديدة أو أكثر.

- **التيار المتردّد Alternating Current:** تيار يسري في دارة كهربائيّة مغلقة يتغيّر مقداره واتجاهه بالنسبة إلى الزمن وفقًا لعلاقة جيبيّة.

- **الجسم الأسود Black Body:** جسم مثالي يمتص الأطوال الموجيّة للأشعة الكهرمغناطيسية جميعها ويشعّها، ويعتمد انبعاث الأشعة منه على درجة حرارته فقط.

- **جهد الإيقاف Stopping Potential:** فرق الجهد الذي تكون عنده قراءة التيار الكهرضوئي صفرًا.

- **الحثّ الذاتيّ Self Induction:** يُعرَّف بأنّه تولّد قوّة دافعة كهربائيّة حثّية ذاتيّة في دارة مغلقة نتيجة تغيّر التدفّق المغناطيسي، بسبب تغيّر مقدار تيار الدارة نفسها.

- **سلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي Natural Radioactive Decay Series:** مجموعة الاضمحلالات التلقائية التي تبدأ بعنصر مشعّ ثقيل، وتنتهي بعنصر مستقرّ باضمحلال ألفا أو بيتا .

- **طاقة التأيُّن Ionization Energy:** أقلّ طاقة يتطلّبها تحرير إلكترون من الذرة دون إكسابه طاقة حركية.

- **طاقة الربط النووية Nuclear Binding Energy:** الطاقة التي يجب تزويدها للنواة لفصل مكوّناتها (النيوكليونات) بعضها عن بعض نهائيًّا.

- **طيف الامتصاص الخطّي Absorption Line Spectrum:** ظهور خطوط معتمة منفصلة على خلفية مضيئة بعد إمرار ضوء الشمس خلال غاز عنصر معيّن.

- **طيف الانبعاث الخطّي Emission Line Spectrum:** ظهور خطوط مضيئة على خلفية معتمة بعد تحليل الضوء المنبعث من ذرات العناصر المثارة.

- **الظاهرة الكهرضوئية Photoelectric Effect:** ظاهرة انبعاث إلكترونات من سطح فلز عند سقوط إشعاع كهرمغناطيسي بتردّد مناسب عليه.

- **العدد الذريّ Atomic Number:** عدد البروتونات في النواة ويساوي عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة.
- **العدد الكتلي Mass Number:** عدد البروتونات والنيوترونات في النواة.
- **عمر النصف Half-Life ($t_{1/2}$):** الزمن اللازم لاضمحلال نصف عدد النوى المشعة.
- **فرق الجهد المتردّد Alternating Potential Difference:** فرق جهد يتغيّر في المقدار والاتجاه بالنسبة إلى الزمن وفقًا لعلاقة جيبيّة.
- **قانون فارادي في الحثّ Faraday's Law of Induction:** ينصّ على أنّ: "مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّية المتولّدة في دارة كهربائيّة يتناسب طرديًّا مع المعدل الزمني لتغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يخترقها".
- **قانون لنز Lenz's Law:** ينصّ على أنّ: «يكون اتجاه التيار الحثي المتولد في دارة مغلقة بحيث يولد مجالاً مغناطيسيا يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له.
- **القوّة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة Induced Electromotive Force:** فرق الجهد الكهربائي المتولّد بين طرفي سلك يقطع خطوط مجال مغناطيسي أو في ملفّ عند تغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يخترقه.
- **القوة النوويّة القوية Strong Nuclear Force:** هي قوّة التجاذب بين النيوكليونات في النواة.
- **القيمة الفعّالة لفرق الجهد المتردّد Effective Potential Value:** ناتج قسمة القيمة العظمى لفرق الجهد على ($\sqrt{2}$).
- **القيمة الفعّالة للتيار المتردّد Effective Current Value:** ناتج قسمة القيمة العظمى للتيار المتردّد على ($\sqrt{2}$).
- **الكتلة الحرجة Critical Mass:** أقلّ كتلة من الوقود النووي تضمن استمرار حدوث التفاعل المتسلسل، وتضمن عدم تسرّب النيوترونات خارجه.
- **معامل الحثّ الذاتي Coefficient of Self Induction:** (محاثّة Inductane المحثّ): نسبة القوة الدافعة الكهربائيّة الحثّيّة الذاتيّة المتولّدة بين طرفي محثّ إلى المعدل الزمني للتغيّر في مقدار التيار الكهربائي المارّ فيه، وهو مقياس لممانعة المحثّ لتغيّر مقدار التيار الكهربائي المارّ فيه، ووحدة قياسه هي (V.s/A)، وتُسمّى هنري H بحسب النظام الدوليّ للوحدات.
- **المعاوقة المحثّيّة Inductive Reactance:** الممانعة التي يبديها المحث لمرور التيار المتردد في الدارة، وتساوي حاصل ضرب محاثّة المحثّ في التردّد الزاويّ لفرق الجهد.

- **المعاوقة المواسعيّة Capacitive Reactance:** الممانعة التي يبديها المواسع لمرور التيار المتردد في الدارة، وتساوي مقلوب حاصل ضرب المواسعة في التردّد الزاويّ لفرق الجهد.
- **الموادّ العازلة Insulators:** موادّ لا توصِل التيار الكهربائي، حيث ترتبط إلكترونات التكافؤ لها بالذرات بقوة كبيرة، لذلك لديها عدد قليل من الإلكترونات الحرّة؛ ما يجعلها مادّة عازلة للكهرباء.
- **الموادّ الموصِلة Conductors:** موادّ توصِل التيار الكهربائي، ولا ترتبط إلكترونات التكافؤ بذراتها بقوة كبيرة؛ وبذلك تحوي الموادّ الموصِلة كثيرًا من الإلكترونات الحرّة؛ ما يجعلها موصِلات جيدة للتيار الكهربائي.
- **الموادّ شبه الموصِلة Semiconductors:** موادّ تقع بين الموادّ الموصِلة للكهرباء والموادّ العازلة من حيثُ قدرتُها على توصيل الكهرباء.
- **النشاطية الاشعاعية Activity:** عدد الاضمحلالات في الثانية الواحدة لعينة مشعة.
- **نطاق الاستقرار Stability Valley:** النطاق الذي تقع ضمنه النوى المستقرة في منحنى (N-Z).
- **النظائر Isotpes:** نوى تتساوى في عددها الذري، وتختلف في عددها الكتلي بسبب اختلاف عدد النيوترونات، وهي ذرات للعنصر نفسه تختلف أنويتها في عددها الكتلي.
- **النواة المركّبة Compound Nucleus:** النواة التي تتشكل من امتصاص النواة الهدف للقذيفة في التفاعلات النووية، التي وما تلبث أن تضمحل لتعطي نواة أو أكثر.
- **نيوكليون Nucleon:** تسمية تُطلق على كلٍّ من البروتون أو النيوترون.
- **وحدة الكتلة الذرية Atomic Mass Unit:** تساوي $\frac{1}{12}$ من كتلة نظير الكربون - 12 ($^{12}_{6}C$).

قائمةُ المراجعِ (References)

1. Smyth, M., Pharaoh, L., Grimmer, R., Bishop, C., Davenport, C. (2020). **Cambridge International AS & A Level Physics**. London: Harper Collins Publishers Limited.
2. Lahiri A. (2018). **Basic Physics: Principles and Concepts**. Kolkata: Avijit Lahiri.
3. Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2018). **Fundamentals of Physics** (11th ed). New York: Jon Wiley & Sons.
4. Giancoli, D. (2014). **Physics: Principles with Applications** (7th ed). London: Person Education.
5. Chadha ,G. (2015). **A Level Physics a for OCR**, https://www.ocr.org.uk/Images/171726-specification-accredited-a-level-gce-physics-a-h556.pdf.
6. Young, H., Freedman, R. (2015). **University Physics with Modern Physics** (14th ed), London: Pearson Education.
7. Paul, A., Tipler P., Mosca G. (2007). **Physics for Scientists and Engineers** (6th ed). New York: Freeman, W. H. & Company.
8. Hewitt, P. (2015). **Conceptual Physics** (14th Ed). London: Pearson Education.
9. Raymond, A. Serway, John W. Jewett, Jr. (2013). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics** (9th Ed). Boston: Physical Sciences: Mary Finch.
10. Serway, R., Faughn, J. (2006). **Holt Physics**. USA. Holt, Rinehart and Winston.
11. Serway, R., Vuille, C. (2017). **College Physics** (11th ed). Boston: Cengage Learning.
12. Muncaster, R. (2014). **A Level Physics** (4th ed). New York: Oxford University Press.
13. Adams, S. (2013). **Advanced Physics** (2nd ed). New York: Oxford University Press, USA.
14. Duncan, T. (2000). **Advanced Physics** (5th ed). London: Hodder Education.
15. Andrews, T., Kent, M. (2018). **Cambridge International AS & A Level Mathematics, Mechanics**. London: Harper Collins Publishers Limited.
16. Wilbraham, A. (2006). **Prentice Hall Chemistry**. London: Pearson Education.
17. Serway, R., Moses, C., Moyer, C. (2005). **Modern Physics** (3rd ed). Toronto: Thomson Learning, Inc.

18. Beiser, A. (2003). **Concepts of Modern Physics** (6th ed). New York: McGraw-Hill.

19. Krane, K. (1998). **Introductory Nuclear Physics** (3rd ed). New York: Jon Wiley & Sons.

20. Floyd, F. (2012). **Electronic Devices (Conventional Current Version)** (9th ed). London: Pearson Education.

21. Boylestad, R., Nashelsky, L. (2013). **Electronic Devices and Circuit Theory** (11th ed). London: Pearson Education.

تمت بحمد الله تعالى