وزارة التربية

كويت جديدة
NEWKUWAIT

الفيزياء ١٢

الصف الثاني عشر

الجزء الثاني

كتاب الطالب

المرحلة الثانوية

الطبعة الثانية

وزارة التربية

الفيزياء

كتاب الطالب

الصفّ الثاني عشر ١٢

الجزء الثاني

المرحلة الثانويّة

اللجنة الإشرافية لدراسة ومواءمة سلسلة كتب العلوم

أ. ليلى علي حسين الوهيب (رئيسًا)

أ. مصطفى محمد مصطفى علي

أ. فتوح عبد الله طاهر الشمالي

أ. سعاد عبد العزيز الرشود

أ. تهاني ذعار المطيري

الطبعة الثانية

١٤٣٩ - ١٤٤٠ هـ

٢٠١٨ - ٢٠١٩ م

حقوق التأليف والطبع والنشر محفوظة لوزارة التربية ـ قطاع البحوث التربوية والمناهج

إدارة تطوير المناهج

الطبعة الأولى ٢٠١٤ - ٢٠١٥ م
الطبعة الثانية ٢٠١٦ - ٢٠١٧ م
٢٠١٨ - ٢٠١٩ م

فريق عمل دراسة ومواءمة كتب الفيزياء للصف الثاني عشر الثانوي

أ. هناء صابر إبراهيم خليفة

أ. كامل غنيم سعيد جمعة
أ. إيمان أكرم حمد حمد
أ. حمده فواز الصنيدح الظفيري
أ. أبرار ناصر عبدالله الصريعي

دار التَّربَويّون House of Education **ش . م . م . وبيرسون إديوكيشن** ٢٠١٤

الكتاب كاملًا

شاركنا بتقييم مناهجنا

صاحب السمو الشيخ صباح الأحمد الجابر الصباح

أمير دولة الكويت

سمو الشيخ نواف الأحمد الجابر الصباح

ولي عهد دولة الكويت

مقدمـــــة

الحمدلله رب العالمين، والصلاة والسلام على سيد المرسلين، محمد بن عبدالله وصحبه أجمعين.

عندما شرعت وزارة التربية في عملية تطوير المناهج، استندت في ذلك إلى جملة من الأسس والمرتكزات العلمية والفنية والمهنية، حيث راعت متطلبات الدولة وارتباط ذلك بسوق العمل، وحاجات المتعلمين والتطور المعرفي والعلمي، بالإضافة إلى جملة من التحديات التي تمثلت بالتحدي القيمي والاجتماعي والاقتصادي والتكنولوجي وغيرها، وإن كنا ندرك أن هذه الجوانب لها صلة وثيقة بالنظام التعليمي بشكل عام وليس المناهج بشكل خاص.

ومما يجب التأكيد عليه، أن المنهج عبارة عن كم الخبرات التربوية والتعليمية التي تُقدم للمتعلم، وهذا يرتبط أيضًا بعمليات التخطط والتنفيذ، والتي في محصلتها النهائية تأتي لتحقيق الأهداف التربوية، وعليه أصبحت عملية بناء المناهج الدراسية من أهم مكونات النظام التعليمي، لأنها تأتي في جانبين مهمين لقياس كفاءة النظام التعليمي، فهي من جهة تمثل أحد المدخلات الأساسية ومقياسًا أو معيارًا من معايير كفاءته من جهة أخرى، عدا أن المناهج تدخل في عملية إنماء شخصية المتعلم في جميع جوانبها الجسمية والعقلية والوجدانية والروحية والاجتماعية.

من جانب آخر، فنحن في قطاع البحوث التربوية والمناهج، عندما نبدأ في عملية تطوير المناهج الدراسية، ننطلق من كل الأسس والمرتكزات التي سبق ذكرها، بل إننا نراها محفزات واقعية تدفعنا لبذل قصارى جهدنا والمضي قدمًا في البحث في المستجدات التربوية سواء في شكل المناهج أم في مضامينها، وهذا ما قام به القطاع خلال السنوات الماضية، حيث البحث عن أفضل ما توصلت إليه عملية صناعة المناهج الدراسية، ومن ثم إعدادها وتأليفها وفق معايير عالمية استعدادًا لتطبيقها في البيئة التعليمية.

ولقد كانت مناهج العلوم والرياضيات من أول المناهج التي بدأنا بها عملية التطوير، إيمانًا بأهميتها وانطلاقًا من أنها ذات صفة عالمية، مع الأخذ بالحسبان خصوصية المجتمع الكويتي وبيئته المحلية. وعندما أدركنا أنها تتضمن جوانب عملية التعلم ونعني بذلك المعرفة والقيم والمهارات، قمنا بدراستها وجعلها تتوافق مع نظام التعليم في دولة الكويت، مركزين ليس فقط على الكتاب المقرر ولكن شمل ذلك طرائق وأساليب التدريس والبيئة التعليمية ودور المتعلم، مؤكدين على أهمية التكامل بين الجوانب العلمية والتطبيقية حتى تكون ذات طبيعة وظيفية مرتبطة بحياة المتعلم.

وفي ضوء ما سبق من معطيات وغيرها من الجوانب ذات الصفة التعليمية والتربوية تم اختيّار سلسلة مناهج العلوم والرياضيات التي أكملناها بشكل ووقت مناسبين، ولنحقق نقلة نوعية في مناهج تلك المواد، وهذا كله تزامن مع عملية التقويم والقياس للأثر الذي تركته تلك المناهج، ومن ثم عمليات التعديل التي طرأت أثناء وبعد تنفيذها، مع التأكيد على الاستمرار في القياس المستمر والمتابعة الدائمة حتى تكون مناهجنا أكثر تفاعلية.

د. سعود هلال الحربي

الوكيل المساعد لقطاع البحوث التربوية والمناهج

المحتويات

الجزء الأوّل

الوحدة الأولى: الحركة

الجزء الثاني

الوحدة الثانية: الكهرباء والمغناطيسية

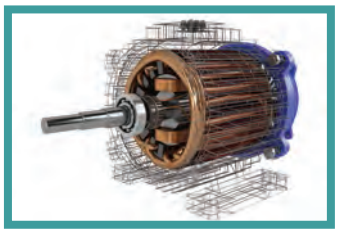
الوحدة الثالثة: الإلكترونيات

الوحدة الرابعة: الفيزياء الذرّية والفيزياء النووية

محتويات الجزء الثاني

الموضوع	رقم الصفحة
الوحدة الثانية: الكهرباء والمغناطيسية	**12**
الفصل الأوّل: الحثّ الكهرومغناطيسي	**13**
الدرس 1–1: الحثّ الكهرومغناطيسي	**14**
الدرس 1–2: المولّدات والمحرّكات الكهربائية	**24**
الدرس 1–3: المحوّلات الكهربائية	**33**
الفصل الثاني: التيّار المتردّد	**41**
الدرس 2–1: التيّار المتردّد	**42**
مراجعة الوحدة الثانية	**57**

الوحدة الثالثة: الإلكترونيات	**66**
الفصل الأوّل: الإلكترونيات	**67**
الدرس 1–1: الوصلة الثنائية	**68**
الدرس 1–2: الترانزستور	**79**
مراجعة الوحدة الثالثة	**86**
الوحدة الرابعة: الفيزياء الذرّية والفيزياء النووية	**91**
الفصل الأوّل: الذرّة والكمّ	**92**
الدرس 1–1: نماذج الذرّة ونظرية الكمّ	**93**
الدرس 1–2: الموجات والجسيمات	**104**
الفصل الثاني: نواة الذرّة والنشاط الإشعاعي	**112**
الدرس 2–1: نواة الذرّة	**113**
الدرس 2–2: الانحلال الإشعاعي	**121**
الدرس 2–3: الانشطار والاندماج النووي	**131**
مراجعة الوحدة الرابعة	**137**



أثار اكتشاف تولُّد المغناطيسية من التيّار الكهربائي عند الفيزيائيين التساؤل عن إمكانية توليد التيّار الكهربائي من المغناطيسية، ودفعهم إلى إجراء التجارب واكتشاف مبدأ الحثّ الكهرومغناطيسي واكتشاف مولّدات الطاقة الكهربائية واستخدامها كمصدر للكهرباء بدلًا من البطّاريات.

تتناول الوحدة الثانية في فصلها الأوّل الحثّ الكهرومغناطيسي وقوانينه التي تفسّر توليد التيّار الحثّي واتّجاهه، وعمل المولّدات الكهربائية ودورها في إنتاج التيّار الكهربائي المتردّد المستخدَم لتشغيل المصانع وإنارة المدن بعد نقله باستخدام المحوّلات الكهربائية عبر شبكات الطاقة.

أمّا الفصل الثاني، فسيتناول خواصّ التيّار المتردّد ويميّزها عن خواصّ التيّار المستمرّ، ويتناول أثره في دوائر كهربائية مكوّنة من عناصر مختلفة.

اكتشف بنفسك

المحوّلات

كان ابتكار توماس إديسون للمصباح الكهربائي عام 1879 وراء انتشار محطّات توليد التيّار المستمرّ للإضاءة الكهربائية. وإنّ انتشار استخدام الكهرباء في المنازل، وكثرة الطلب عليها، أظهر مشاكل التيّار المستمرّ من حيث صعوبة نقله لمسافات طويلة ووصوله إلى المستهلكين بسبب فقدان الطاقة الكهربائية الكبير. وفي عام 1881 استفاد العالمان نيكولا تيسلا Nikola Tesla وجورج ويستنغهاوس George Westinghouse من خواصّ التيّار المتردّد وقوانين الحثّ الكهرومغناطيسي فوجدا جهازًا جديدًا يتميّز بفعاليته وقدرته على نقل التيّار الكهربائي لمسافات طويلة جدًّا مقارنة بالتيّار المستمرّ. عُرِف هذا الجهاز بالمحوّل.

بالعودة إلى النص أعلاه، أجِب عن الاسئلة التالية:

1. ما هي أنواع التيّار الكهربائي؟
2. أيّ نوع من هذه الأنواع اعتُبر الأمثل لنقل الطاقة الكهربائية؟ ولماذا؟
3. ما هو الجهاز الذي يُستخدم في عملية نقل الكهرباء وكان الحلّ لفقدان الطاقة خلال عملية نقل الطاقة الكهربائية؟ وما هي القوانين التي تحدّد كيفية عمله؟

فصول الوحدة

الفصل الأوّل

- الحثّ الكهرومغناطيسي

الفصل الثاني

- التيّار المتردّد

أهداف الوحدة

- يذكر قانون فاراداي ويشرحه.
- يصف كيفية عمل المولّد الكهربائي.
- يقارن بين المولّدات والمحرّكات الكهربائية.
- يصف كيفية عمل المحوّلات الكهربائية.
- يشرح سبب استخدام المحوّلات عند نقل القدرة الكهربائية.
- يعرّف التيّار المتردّد واستخداماته.
- يطبّق قانون أوم على دوائر التيّار المتردّد المختلفة.

معالم الوحدة

- **اكتشف بنفسك:** المحوّلات
- **ارتباط الفيزياء بالتقنية:** كاشف المعادن
- **ارتباط الفيزياء بالتقنية:** توليد الصوت

الحثّ الكهرومغناطيسي
Electromagnetic Induction

لقد درسنا سابقًا أنّ التيّار الكهربائي يتولّد من التفاعلات الكيميائية في البطّارية وأنّ مرور التيّار الكهربائي في سلك مستقيم أو ملفّ يولّد مجالًا مغناطيسيًّا. ولكن هل يمكن توليد تيّار كهربائي من مجال مغناطيسي وبدون تفاعلات كيميائية؟

تمكن العالمان الإنكليزي مايكل فاراداي Michael Faraday والأميركي جوزيف هنري Joseph Henry، كلّ على حدة، أن يبرهن بالتجربة إمكانية توليد تيّار كهربائي من المجال المغناطيسي يُعرَف بالتيّار الحثّي. وترك هذا الاكتشاف أثرًا مهمًّا على تطوّر التكنولوجيا فهو المبدأ الأساسي في تحويل الطاقة الميكانيكية مباشرةً إلى طاقة كهربائية في مولّدات الطاقة الكهربائية. من التطبيقات العملية أيضًا لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية الميكروفون وجهاز تنظيم ضربات القلب والجيتار الكهربائي وغيرها من الأجهزة.

في هذا الفصل سنتعرّف على مبدأ الحثّ الكهرومغناطيسي والتجارب التي أوصلتنا إلى قوانين الكهرومغناطيسية، وسندرس تطبيقاته في توليد التيّار الكهربائي المتردّد وفي عمل المحوّلات الكهربائية ونقل الطاقة الكهربائية.

دروس الفصل

الدرس الأوّل
- الحثّ الكهرومغناطيسي

الدرس الثاني
- المولّدات والمحرّكات الكهربائية

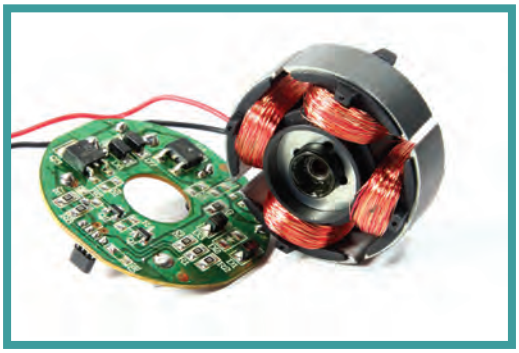
الدرس الثالث
- المحوّلات الكهربائية

الدرس 1-1

الحثّ الكهرومغناطيسي
Electromagnetic Induction

الأهداف العامة

- يعرّف التدفّق المغناطيسي.
- يعرّف شدّة المجال المغناطيسي.
- يصف كيفية تكوُّن قوّة دافعة كهربائية حثّية.
- يعرّف الحثّ الكهرومغناطيسي.
- يذكر قانون فاراداي ويشرحه.
- يذكر قانون لنز ويطبّقه.
- يحسب مقدار القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية.



(شكل 1)

من المهمّ أن نكتشف أنّ التيّار الكهربائي يولّد مجالًا مغناطيسيًّا عند مروره في سلك موصّل، ولكن ما هو أهمّ هو اكتشاف أنّ المجال المغناطيسي قادر على إنتاج مجال كهربائي يؤدّي إلى توليد تيّار كهربائي يعرف بالتيّار الحثّي. إنّ قانون فاراداي للحثّ الكهرومغناطيسي يربط بين المجال المغناطيسي والمجال الكهربائي الناتج عنه.

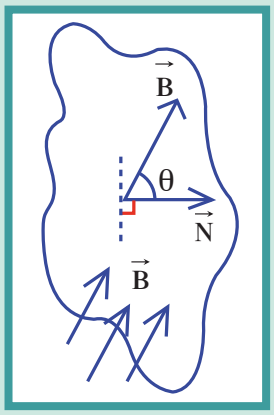
1. التدفّق المغناطيسي ϕ Magnetic Flux

إنّ قانون فاراداي لم يشرح سبب تولُّد كل من التيّار الكهربائي والقوّة الدافعة الكهربائية، إنّما قدّم تصوُّرًا لفهم مبدأ الحثّ الكهرومغناطيسي. ولجعل قانون فاراداي قابلًا للتطبيق لا بدّ من إيجاد طريقة ما تسمح بحساب مقدار التدفّق المغناطيسي المارّ في لفّة محدّدة. لذلك، **نعرّف التدفّق المغناطيسي ϕ والذي يمثّل عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق سطحًا ما مساحته A بشكل عمودي.**

ويمكن التعبير عن التدفّق المغناطيسي رياضيًّا بالمعادلة التالية:

$$\phi = B\,A\cos\theta$$

حيث إنّ B هي **شدّة المجال المغناطيسي وتمثّل عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق وحدة المساحات من السطح بشكل عمودي وتُقاس بوحدة التسلا T**، وθ زاوية سقوط المجال وهي الزاوية بين العمود المقام على السطح (متّجه مساحة السطح $\vec{N}$) واتّجاه خطّ المجال المغناطيسي $\vec{B}$ الذي يخترق السطح (شكل 2).



(شكل 2)

يُلاحَظ من معادلة التدفّق المغناطيسي، أنّ التدفّق المغناطيسي يتغيّر بتغيّر:

- شدّة المجال المغناطيسي الذي يخترق السطح (B).
- مساحة السطح التي تخترقها خطوط المجال (A).
- الزاوية بين متّجه مساحة السطح وخطوط المجال المغناطيسي (θ).

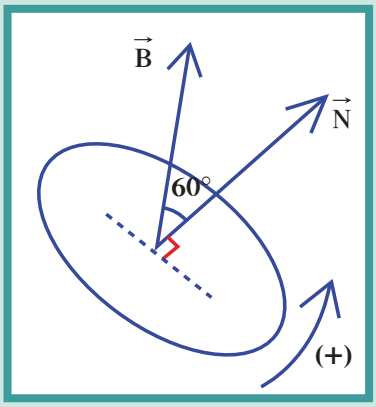
ويُقاس التدفّق المغناطيسي ϕ بحسب النظام الدولي للوَحدات بوَحدة تسلا متر مربّع ($T.m^2$) والتي تُسمّى ويبر (Wb).

أمّا في حال كان التدفّق المغناطيسي يخترق عدد N من اللفّات، كما هي الحال في الملفّ، فإنّ المعادلة تُكتَب على النحو التالي:

$$\phi = N\,B\,A\cos\theta$$

مثال (1)

لفّة دائرية الشكل نصف قطرها (10)cm موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم شدّته (0.4)T. أُحسب مقدار التدفّق المغناطيسي في حال متّجه مساحة السطح، وبحسب الاتّجاه الموجب الاختيّاري، يصنع زاوية (60°) مع خطّ المجال المخترق للسطح (شكل 3).



(شكل 3)

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلِّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: الاتّجاه الموجب الاختيّاري، والذي يحدّد مقدار $\theta = (60°)$

$B = (0.4)T$

$r = (10)cm$

غير المعلوم:

مقدار التدفّق المغناطيسي: $\phi = ?$

2. **أُحسب غير المعلوم.**

باستخدام معادلة التدفّق المغناطيسي وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$\phi = B\,A\cos\theta = 0.4 \times (\pi \times 0.1^2) \times \cos 60 = (6.28 \times 10^{-3})Wb$$

3. **قيِّم:** هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة.

2. الحثّ الكهرومغناطيسي

Electromagnetic Induction

اكتشف كلّ من فاراداي وهنري تجريبيًّا أنّ التيّار الكهربائي يمكن أن يتولّد في ملفّ من خلال حركة المغناطيس في ملفّ أو داخل سلك ملفوف لفّة واحدة.

فإنّ حركة مغناطيس في ملفّ متّصل بجلفانومتر، أو حركة الملفّ بالنسبة إلى المغناطيس الثابت، أو حركتهما بالنسبة إلى بعضهما البعض، أظهرت تولّد قوّة دافعة كهربائية ε تنتج تيّارًا كهربائيًّا في الدائرة المغلقة.

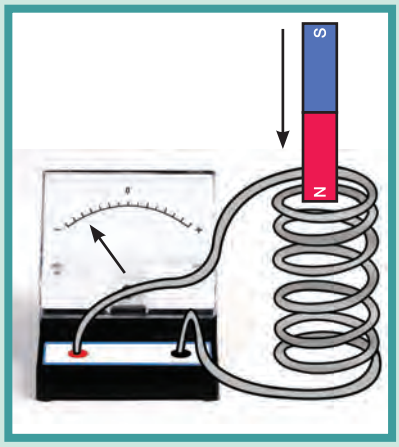
فالقوّة الدافعة الكهربائية تتولّد نتيجة الحركة النسبية للملف في المجال المغناطيسي، سواء تحرّك المغناطيس بالقرب من الملفّ الساكن أو تحرّك الملف خلال المغناطيس.

أي أنّ القوّة الدافعة الكهربائيّة المتولّدة في ملفّ تنشأ نتيجة حدوث تغيّر في التدفّق المغناطيسي الذي يجتاز الملفّ كما هو موضّح في الشكل (4).

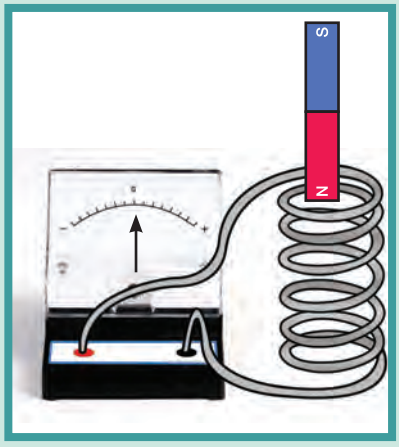
إنّ ظاهرة توليد القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية في موصّل نتيجة تغيُّر التدفّق المغناطيسي الذي يجتاز الموصّل تُسمّى الحثّ الكهرومغناطيسي.

إنّ مقدار القوّة الدافعة الكهربائية وشدّة التيّار الكهربائي في الدائرة الكهربائية المغلقة تكونان أكبر كلّما كانت الحركة النسبية بين المغناطيس والملفّ أسرع. هذا التيّار الكهربائي يتوقّف تمامًا لحظة توقّف الحركة كما هو موضّح في الشكل (5).

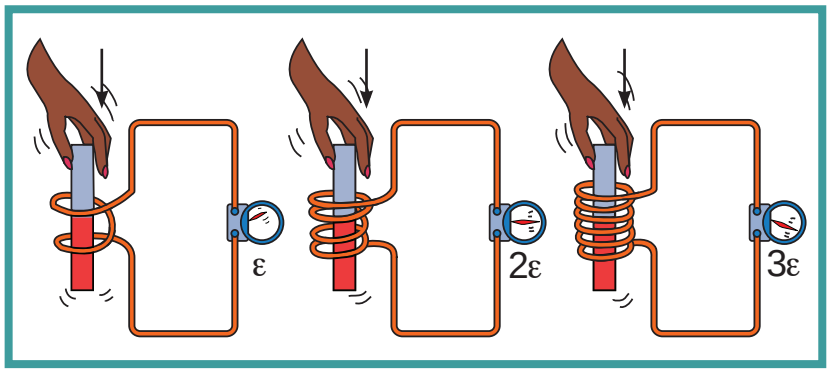
وكلّما ازداد عدد لفّات الملفّ ازداد مقدار القوّة الدافعة الكهربائية. فدفع المغناطيس، على سبيل المثال، في ملفّ عدد لفّاته ضعف ملفّ آخر، يولّد ضعف القوّة الدافعة الكهربائية، ودفع المغناطيس في ملفّ عدد لفّاته ثلاثة أضعاف تتولّد قوّة دافعة كهربائية ثلاثة أضعاف (شكل 6). كما أنّه أُثبِت تجريبيًّا أنّ تغيير اتّجاه قطب المغناطيس يؤدّي إلى تغيير اتّجاه التيّار في الملفّ، وهذا ما سنتناوله لاحقًا عندما نشرح قانون لنز Lens's Law.



(شكل 4)



(شكل 5)



(شكل 6)

عندما تضاعف عدد لفّات الملفّ، تضاعف أيضًا مقدار القوّة الدافعة الكهربائية

3. قانون فاراداي للحثّ

Faraday's Law of Induction

أدرك فاراداي أنّ القوّة الدافعة الكهربائية يمكن توليدها نتيجة تغيير في مقدار التدفّق المغناطيسي الذي يجتاز الملفّ، وأنّ مقدار التدفّق المغناطيسي يُقدَّر بعدد خطوط المجال المغناطيسي التي تمرّ في لفّة أو مساحة محدّدة.

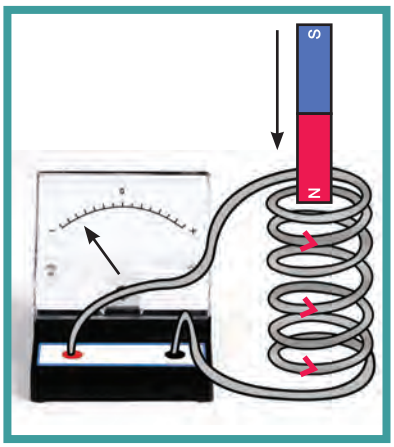
ونصّ قانون فاراداي للحثّ على أنّ: «**مقدار القوّة الدافعة الكهربائية التأثيرية المتولّدة في ملفّ تتناسب طرديًّا مع حاصل ضرب عدد اللفّات ومعدّل التغيُّر في التدفّق المغناطيسي الذي يجتاز هذه اللفّات**».

وبعد فترة وجيزة من قانون فاراداي، ونتيجة التجارب المتعدّدة، لاحظ الفيزيائي الألماني هينريش فريدريك لنز Heinrich Friedrich Lenz أنّ دفع القطب الشمالي (N) لمغناطيس إلى داخل الملفّ يولّد في الملفّ تيّارًا حثّيًّا له اتّجاه يولّد مجالًا مغناطيسيًّا معاكسًا لاتّجاه المجال المطبَّق، أي يتحوّل سطح الملفّ المقابل إلى قطب شمالي N ويسبّب تنافرًا مع المغناطيس المدفوع إلى الداخل (شكل 7).

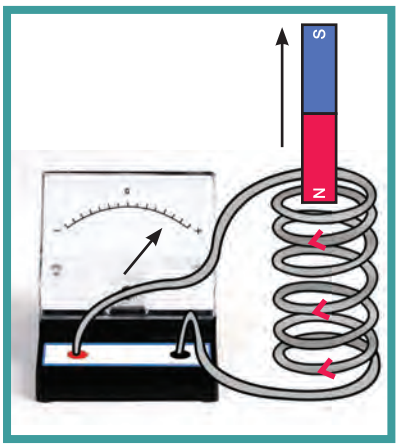
وكذلك جذب قطب المغناطيس N بعيدًا عن اللفّات يولّد تيّارًا حثّيًّا اتّجاهه في الملفّ يجعل سطح الملفّ قطبًا مغناطيسيًّا جنوبيًّا S يعمل على جذب المغناطيس المُبعَد إلى الداخل (شكل 8).

نتيجة لتلك التجارب وضع لنز قاعدة لتحديد اتّجاه التيّار المتولّد في اللفّة أو الدائرة الكهربائية من دون أن يقدّم معلومات عن مقدار التيّار الحثّي أو عن القوّة الدافعة الكهربائية. أصبحت هذه القاعدة تُعرَف اليوم بقانون لنز Lenz's Law.

ينصّ قانون لنز على أنّ: «**التيّار الكهربائي التأثيري المتولّد في ملّف يسري باتّجاه بحيث يولّد مجالًا مغناطيسيًّا يعاكس التغيّر في التدفّق المغناطيسي المولّد له**».



(شكل 7)



(شكل 8)

نستنتج إذًا أنّ القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية تنشأ بحيث تقاوم التغيّر في التدفّق المغناطيسي المسبِّب في توليدها.

إنّ استخدام مفهوم التدفّق المغناطيسي في عدد من اللفّات بالإضافة إلى قانون لنز يجعلنا نكتب نصّ قانون فاراداي بشكله الأكثر استخدامًا:

«**إنّ القوّة الدافعة الكهربائية التأثيرية المتولّدة في موصّل تساوي سالب معدّل التغيُّر في التدفّق المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن**». ويُكتَب قانون فاراداي على شكل المعادلة التالية:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

حيث $\phi = N\,B\,A\cos\theta$

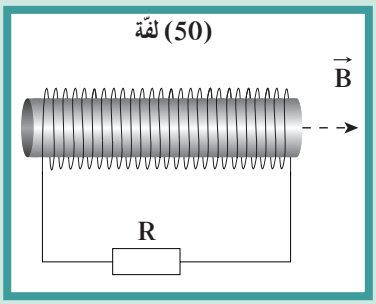
والإشارة السالبة تشير إلى أنّ القوّة الدافعة الكهربائية تعاكس السبب المولِّد لها بحسب قانون لنز.

مثال (2)

ملفّ مكوّن من (50) لفّة حول أسطوانة فارغة مساحة قاعدتها $(1.8)m^2$ ويؤثّر عليه مجال مغناطيسي منتظم اتّجاهه عمودي على مستوى قاعدة الأسطوانة (شكل 9). أُحسب:

(أ) مقدار القوّة الدافعة الحثّية في الملفّ إذا تغيّر مقدار شدّة المجال المغناطيسي بشكل منتظم من $(0)T$ إلى $(0.55)T$ خلال $(0.85)s$.

(ب) مقدار شدّة التيّار الحثّي في الملفّ إذا كانت المقاومة في الدائرة المغلقة المتصلة بالملف ثابتة وتساوي $R = (20)\Omega$.



(شكل 9)

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلِّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: عدد اللفات $N = (50)$

$\Delta t = (0.85)s$

$A = (1.8)m^2$

لنأخذ الاتّجاه الموجَب اختيّاري، الاتّجاه الذي يجعل متّجه مساحة السطح والمجال المغناطيسي لهما الاتّجاه نفسه.

$B_i = (0)T$ و $B_f = (0.55)T$

$R = (20)\Omega$

غير المعلوم: **(أ)** القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية: $\varepsilon = ?$

(ب) التيّار الكهربائي الحثّي $i = ?$

2. **أُحسب غير المعلوم.**

(أ) باستخدام معادلة قانون فاراداي:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

مثال (2) تابع

وباستخدام معادلة التدفّق المغناطيسي التي تخترق عدد من اللفّات $\phi = N\,B\,A\cos\theta$ وتعويضها في المعادلة السابقة، نجد:

$$\varepsilon = -\frac{d(N\,B\,A\cos\theta)}{dt}$$

وبترتيب المعادلة نجد: $\varepsilon = -N\,A\cos\theta\,\frac{dB}{dt}$

بالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$\varepsilon = -(50)(1.8)(\frac{0.55}{0.85})\cos 0 = (-58.24)V$$

(ب) أمّا التيّار الحثّي فيُحسب بتعويض ε بقانون أوم:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{58.22}{20} = (-2.91)A$$

الإشارة السالبة تؤكّد أنّ اتّجاه التيّار الحثّي معاكس للاتّجاه الموجَب الاختياري الذي حدّدناه.

1. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

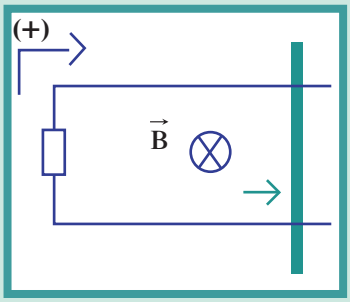
إنّ اتّجاه التيّار الحثّي في الملفّ يولّد مجالًا مغناطيسيًّا يعاكس التغيّر في التدفّق المغناطيسي المطبَّق على الملفّ. وهذا يتناسب مع قانون لنز ويؤكّد صحّة النتيجة.

4. القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية في مجال مغناطيسي منتظم

Electromotive Force in a Constant Magnetic Field

درسنا في المثال السابق توليد قوّة دافعة كهربائية وتيّار حثّي نتيجة تغيُّر المجال المغناطيسي مع الزمن. أمّا في هذا الجزء، فسنتناول تولُّد القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية نتيجة حركة الموصّل في مجال مغناطيسي منتظم.

لنأخذ سكّة موصّلة مقفلة من جهة واحدة وموضوعة في مجال مغناطيسي منتظم عمودي على مستوى السكّة للداخل ويمثّل بالعلامة (X) لأنّه يخترق الصفحة. تمّ وضع سلك معدني مستقيم على السكّة المغلقة من جهة واحدة ليتشكّل لدينا دائرة مغلقة مساحتها A (شكل 10). إنّ تحريك السلك المستقيم مبتعدًا عن الجهة المغلقة من السكّة يسبّب زيادة في المساحة المخترَقة من خطوط المجال المغناطيسي، وبالتالي تغيُّر في التدفّق المغناطيسي. وبحسب قانون فاراداي فإنّ قوّة دافعة كهربائية حثّية تتولّد في الدائرة المغلقة وكذلك يتولّد تيّار حثّي يولّد مجالًا مغناطيسيًّا اتّجاهه عمودي على مستوى السكّة للخارج ويمثَّل بالعلامة (.) معاكس لاتّجاه المجال المسبِّب له بحسب قانون لنز.



(شكل 10)

ويمكن التعبير عن القوّة الدافعة الكهربائية في هذه الحالة بالمعادلة الرياضية التالية:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

ويمكن حساب القوّة المحرّكة الكهربائية التأثيرية المتولّدة في سلك بترتيب المعادلة السابقة، فنجد أنّ: $\varepsilon = -B\frac{dA}{dt}$

وعندما تكون الحركة خطية منتظمة.

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{d(\ell.x)}{dt} = v.\ell$$

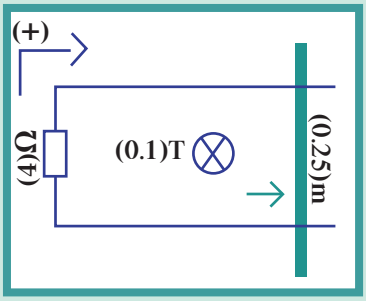
وبالتالي نكتب:

$$\varepsilon = B.\ell.v$$

مثال (3)

يبيّن الشكل (11) سلكًا موصّلًا طوله (0.25)m يتحرّك على سكّة مغلقة بمقاومة ثابتة $R = (4)\Omega$ من جهة واحدة موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم عمودي على مستوى السكّة شدّته (0.1)T. سُحِب السلك بعيدًا عن الجهة المغلقة بسرعة منتظمة تساوي (2)m/s.

أُحسب مقدار القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية والتيّار الكهربائي الحثّي مبيّنًا اتّجاهه.



(شكل 11)

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم:

طول السلك المتحرّك: $\ell = (0.25)m$

السرعة: $v = (2)m/s$

المجال المغناطيسي: $B = (0.1)T$

$R = (4)\Omega$

غير المعلوم:

(أ) القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية: $\varepsilon = ?$

(ب) التيّار الكهربائي الحثّي واتّجاهه: $i = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) لنأخذ الاتّجاه الموجَب اختيّاري، الاتّجاه الذي يجعل متّجه مساحة السطح والمجال المغناطيسي لهما الاتّجاه نفسه، أي $\cos\theta = 1$.

مثال (3) تابع

باستخدام معادلة قانون فاراداي:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

وباستخدام معادلة التدفّق المغناطيسي التي تخترق مساحة الدائرة $\phi = B\ A\ \cos\theta$ وتعويضها في المعادلة السابقة، نجد:

$$\varepsilon = B.\ell.v$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$\varepsilon = 0.1 \times 0.25 \times 2 = (0.05)V$$

(ب) أمّا التيّار الحثّي فيُحسَب بتعويض ε بقانون أوم:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{-0.05}{4} = (-0.0125)A$$

الإشارة السالبة تؤكّد على أن اتّجاه التيّار الحثّي معاكس للاتّجاه الموجَب الاختيّاري الذي حدّدناه.

3. **قيِّم:** هل النتيجة مقبولة؟

إنّ اتّجاه التيّار الحثّي في الملفّ يولّد مجالًا مغناطيسيًّا يعاكس التغيّر في المجال المغناطيسي المطبَّق على الملفّ، وهذا يتناسب مع قانون لنز ويؤكّد صحّة النتيجة.

مسائل مع إجابات

1. ملفّ عدد لفّاته (1000) لفّة مساحة مقطع كلّ منها $(15)cm^2$ موضوع في مجال مغناطيسي عمودي على مستوى اللفّات ومقدار شدّته $B = (0.4 \times 10^{-4})T$. أُحسب مقدار التدفّق المغناطيسي.

الإجابة: $(6 \times 10^{-5})Wb$

2. حلقة دائرية نصف قطرها (22) cm موضوعة عموديًّا في مجال مغناطيسي منتظم شدّته (1)T. سُحِبت اللفّة إلى خارج المجال المغناطيسي خلال (0.25)s. أُحسب القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية خلال تلك الفترة.

الإجابة: (0.6)V

3. يؤثّر مجال مغناطيسي منتظم مقداره $B = (0.1)T$ عموديًّا على مستوى لفّات ملفّ مؤلّف من (500) لفّة. أُحسب القوّة الدافعة الكهربائية علمًا أنّ مساحة اللفّة $(100)cm^2$ وأنّ المجال المغناطيسي يتناقص ليصبح صفرًا خلال (0.1)s.

الإجابة: (5)V

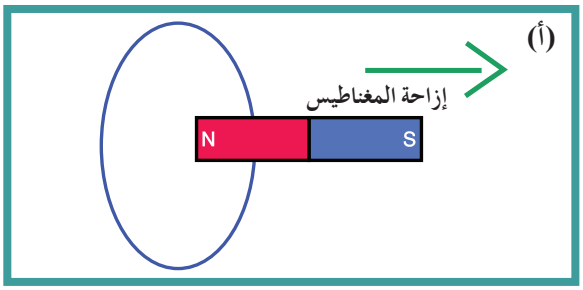
مراجعة الدرس 1-1

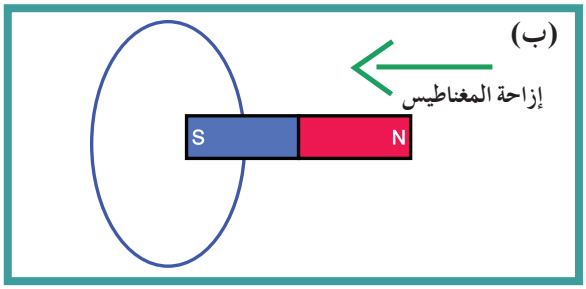
أوّلًا – ما هو الحثّ الكهرومغناطيسي؟

ثانيًا – كيف يمكن توليد قوّة دافعة كهربائية في ملّف باستخدام المغناطيس؟

ثالثًا – لماذا يصعب دفع مغناطيس في ملفّ طرفاه موصولين على مقاومة خارجية عندما تكون عدد لفّاته كبيرة؟

رابعًا – اِستخدم قانون لنز لتحدّد اتّجاه التيّار الحثّي في اللفّة في الحالات التالية:





خامسًا – حلقة دائرية الشكل نصف قطرها (20)cm موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (0.5)T واتّجاهه يشكل مع متجه السطح، بحسب الاتجاه الموجب الاختياري، زاوية (120°).
احسب مقدار التدفّق المغناطيسي المخترق للسطح.

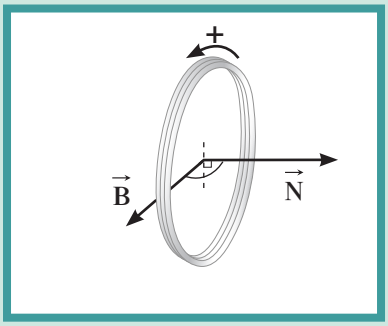
سادسًا – ملفّ مكّون من (100) لفّة حول أسطوانة فارغة مساحة قاعدتها $(0.5)m^2$ يؤثّر عليه مجال مغناطيسي عمودي على مستوى اللفّات يتغيّر بحسب الرسم البياني في الشكل (13). أُحسب:

(أ) مقدار القوّة الدافعة الحثّية في الملفّ خلال المرحلتين:

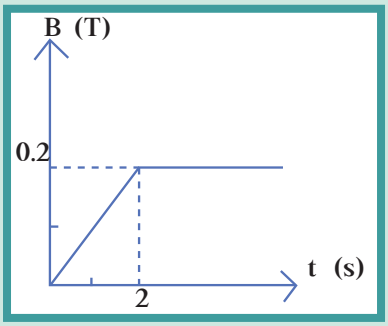
$t \in [0, 2]$

$t > (2)\ s$

(ب) مقدار شدّة التيّار الحثّي في الملفّ خلال المرحلتين إذا كانت المقاومة في الدائرة المغلقة ثابتة وتساوي $R = (10)\Omega$.



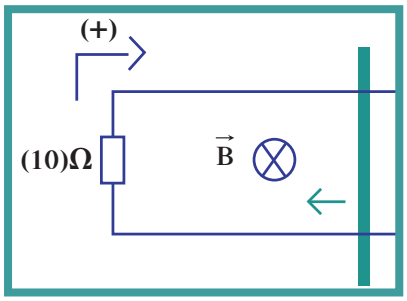
(شكل 12)



(شكل 13)

مراجعة الدرس 1-1 (تابع)

سابعًا – يبيّن الشكل (14) سلكًا موصّلاً طوله (0.8)m يتحرّك على دائرة (دارة) مغلقة بمقاومة ثابتة $R = (10)\Omega$ من جهة واحدة موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم عمودي على مستوى السكّة مقداره (0.4)T ويمثَّل اتّجاهه بالعلامة (X)، أي إلى داخل الصفحة. سُحِب السلك نحو الجهة المغلقة بسرعة منتظمة تساوي (2)m/s. إنّ الاتّجاه الموجَب الاختيّاري مبيَّن في الشكل.



(شكل 14)

(أ) أُحسب مقدار القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية.

(ب) أُحسب شدّة التيّار الكهربائي الحثّي.

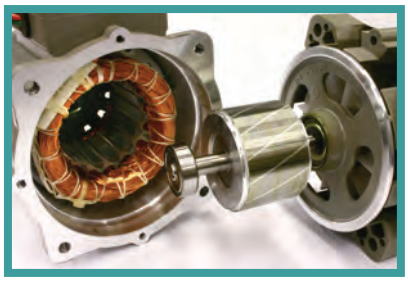
(جـ) اِستخدم قانون لنز لتبيّن اتّجاه التيّار.

(د) قارِن بين اتّجاه التيّار الذي توصّلت إليه من خلال قانون لنز وبيِّن اتّجاهه باستخدام قانون فاراداي.

المولّدات والمحرّكات الكهربائية
Generators and Motors

الأهداف العامة

- يعرّف المولّد الكهربائي.
- يصف كيفية عمل المولّد الكهربائي.
- يستنتج قانون لحساب القوّة الدافعة الكهربائية المتولّدة في مولّد التيّار المتردّد.
- يعرّف المحرّك الكهربائي.
- يصف كيفية عمل المحرّك الكهربائي.
- يقارن بين المولّدات والمحرّكات الكهربائية.



(شكل 15)
مولّد كهربائي

تناولنا في الدرس السابق تولُّد القوّة الدافعة الكهربائية الناتجة عن التغيُّر في معدّل التدفّق المغناطيسي. ودرسنا تفصيليًّا هذا التغيّر في التدفّق الناتج عن عاملين:

- تغيُّر مقدار شدّة المجال المغناطيسي المخترق للسطح الثابت.
- تغيُّر مساحة السطح الذي يخترقه المجال المغناطيسي المنتظم.

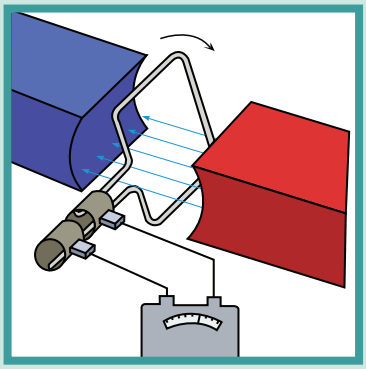
في هذا الدرس سنكتشف أهمّية التغيّر في التدفّق المغناطيسي الناتج عن التغيُّر في الزاوية θ بين متّجه مساحة السطح $\vec{N}$ (العمود المقام على السطح) واتّجاه خطّ المجال المغناطيسي $\vec{B}$ الذي يخترق السطح، والذي يُعتبَر أهمّ تطبيق عملي لقانوني فاراداي ولنز بحيث تقوم عليه فكرة عمل مولّدات الطاقة الكهربائية. وسنميّز بين مبدأ عمل المولّد الكهربائي والمحرّك الكهربائي واللذين يُعتبران أساس التقدّم التكنولوجي الذي وصلنا إليه.

1. المولّد الكهربائي Generator

إنّ عملية إدخال أحد طرفي المغناطيس في ملفّ وإخراجه بحركة اهتزازية مستمرّة يولّد قوّة دافعة كهربائية ε تتغيّر في الاتّجاه. فزيادة شدّة المجال المغناطيسي داخل الملفّ عند إدخال المغناطيس يولّد قوّة دافعة كهربائية في اتّجاه يحدّده قانون لنز، وإنقاص شدّة المجال المغناطيسي عند سحب المغناطيس يولّد قوّة دافعة حثّية في الاتّجاه المعاكس.

وتبيّن التجارب أنّ تردُّد القوّة الدافعة الكهربائية هو نفسه تردّد المجال المغناطيسي داخل اللفّات.

رغم أنّ الحركة بين المغناطيس والملفّ هي حركة نسبية لا يمكننا من خلالها التمييز أيّهما يتحرّك بالنسبة إلى الآخر، فإنّه وُجِد عمليًّا أنّه من الأفضل والأسهل تحريك الملفّ في المجال المغناطيسي الساكن بدلًا من تحريك المغناطيس في الملفّ. هذا هو أساس عمل المولّد الكهربائي الذي **يحوّل جزءًا من الطاقة الميكانيكية المبذولة لتحريك الملفّ في المجال المغناطيسي إلى طاقة كهربائية.**



(شكل 16)
عمل المولّد الكهربائي

2. مبدأ عمل المولّد الكهربائي
Principle of Operation of the Generator

يتكوّن المولّد الكهربائي من ملفّ يستطيع أن يدور باستخدام طاقة ميكانيكية خارجية حول محور ثابت بين قطبي مغناطيس له مجال مغناطيسي منتظم. ويتّصل طرفا الملفّ بحلقتين معزولتين مثبّتتين حول محور الدوران ويلامسان فرشتين تصلان الملفّ بدائرة كهربائية خارجية تُسمّى دائرة الحمل (شكل 16).

عندما يدور الملفّ المكوّن من عدد اللفّات N في المجال المغناطيسي فإنّ عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق الملفّ تتغيّر محدثة تغيّرًا في معدّل التدفّق المغناطيسي.

فعندما يكون مستوى لفّات الملفّ عمودي على المجال المغناطيسي والزاوية بين خطوط المجال ومتّجه مساحة السطح تساوي صفرًا ($\theta = (0°)$)، يكون التدفّق المغناطيسي في قيمته العظمى:

$\phi = N.B.A$ حيث $\cos 0 = 1$.

وعند بدء تدوير الملفّ في اتّجاه دوران عقارب الساعة، على سبيل المثال، تبدأ الزاوية θ بالتزايد و $\cos \theta$ بالتناقص ما يؤدّي إلى تناقص التدفّق المغناطيسي في لفّات الملفّ، وعندما يصبح مستوى الملفّ موازيًا لخطوط المجال، أي تتعامد خطوط المجال المغناطيسي مع متّجه مساحة السطح $\theta = \frac{\pi}{2}$، والتدفّق المغناطيسي في الملفّ يساوي صفرًا. وباستمرار الدوران يزداد عدد خطوط المجال المغناطيسي أكثر وأكثر لتصل إلى قيمة عظمى سالبة من جديد بعد نصف دورة، أي بعد أن تصبح الزاوية $\theta = \pi$ وبعد أن تصبح خطوط المجال المغناطيسي تخترق الملفّ من جهته الثانية.

إنّ استمرار عملية الدوران وتغيُّر الزاوية θ بشكل دوري وبتردّد f يؤدّي إلى تغيُّر معدّل التدفّق المغناطيسي في مستوى الملفّ، ممّا يؤدّي إلى تولّد قوّة دافعة كهربائية حثّية وتيّار كهربائي حثّي في دائرة الحمل المغلقة لهما التردّد نفسه، وتعتمد قيمتهما على معدّل التغيّر في التدفّق المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن، ويُسمّى التيّار الحثّي الناتج التيّار المتردّد.

ولمناقشة ذلك بشكل كمّي نعود إلى قانون فاراداي ونكتب:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(N.B.A.\cos\theta)}{dt}$$

وبما أنّ المجال المغناطيسي المؤثّر على الملفّ مجال منتظم ومساحة مستوى الملفّ وعدد اللفّات مقدار ثابت ، نكتب:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -N.B.A\frac{d(\cos\theta)}{dt}$$

وإذا افترضنا أنّ الملفّ يدور بحركة دورانية منتظمة داخل المجال المغناطيسي وبسرعة زاوية منتظمة ω نكتب:

$$\theta = \omega t + \theta_0$$

تكون θ الإزاحة الزاوية و θ_0 الإزاحة الزاوية الابتدائية والتي تساوي صفر في اللحظة $t = 0$ وبالتالي :

$$\theta = \omega t$$

حيث تمثّل ω السرعة الزاوية وتساوي:

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

حيث إنّ f عدد دورات الملفّ في الثانية وتُقاس بالهرتز (Hz) و T الزمن الدوري لدوران الملفّ دورة كاملة وتُقاس بالثانية (s).

وبالتعويض عن θ بمعادلة القوّة الدافعة الكهربائية ، نحصل على:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -N.B.A\frac{d(\cos\omega t)}{dt} = +N.B.A.\omega.\sin\omega t$$

هذه النتيجة تبيّن أنّ القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية تتغيّر جيبيًّا بالنسبة إلى الزمن (شكل 17) وأنّ القيمة العظمى للقوّة الدافعة الكهربائية تساوي:

$$\varepsilon_{max} = N.B.A.\omega$$

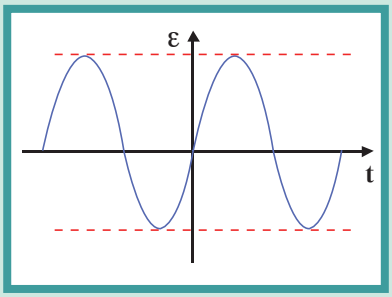
أمّا التيّار الحثّي الناتج فهو تيّار متردّد يتمثّل بالمعادلة التالية:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{N.B.A.\omega}{R}\sin\omega t$$

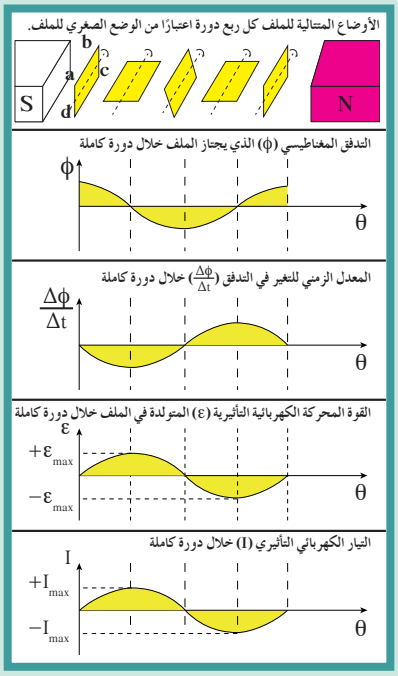
وتبيّن المعادلة أنّ دوران الملفّ دورة كاملة يؤدّي إلى تولّد تيّار حثّي متردّد يتغيّر مقداره جيبيًّا من صفر إلى قيمة عظمى ثمّ إلى صفر ثمّ قيمة عظمى في الاتّجاه السالب ثمّ صفر مرّة أخرى وتتكرّر مع كلّ دورة ملفّ (شكل 18).

مثال (1)

مولّد تيّار متردّد يتكوّن من ملفّ مصنوع من (20) لفّة مساحة كلّ لفّة $A = (0.01)m^2$ ومقاومته $(10)\Omega$ موضوع ليدور حول محور بحركة دائرية منتظمة وبتردّد $f = (60)Hz$ داخل مجال مغناطيسي منتظم شدّته $(10)T$ ، علمًا أنّ في لحظة صفر كانت خطوط المجال لها اتّجاه متّجه مساحة مستوى اللفّات.



(شكل 17)



(شكل 18)

فقرة إثرائية

ارتباط الفيزياء بالتقنية

كاشف المعادن

عندما تعبر البوّابة الأمنية الكاشفة للمعادن في المطار ، فأنت تعبر ملفًّا يحمل تيّارًا ضعيفًا. يوجد في فتحة الملفّ مجالًا مغناطيسيًّا لذلك أيّ تغيُّر في المجال يتحسّسه الملفّ. إذا كنت تحمل جسمًا مصنوعًا من الحديد فأنت تقوم بتغيير المجال المغناطيسي ، وهذا التغيير في المجال المغناطيسي يولّد تيّارًا كهربائيًّا يطلق صفّارة الإنذار.

مثال (1) (تابع)

(أ) إستخدم قانون فاراداي لاستنتاج مقدار متوسّط القوّة الدافعة الكهربائية في أيّ لحظة من دوران الملفّ.

(ب) أُكتب الصيغة الرياضية للتيّار الحثّي بدلالة الزمن.

(جـ) أُحسب القيمة العظمى للقوّة الدافعة الكهربائية المولَّدة في الملفّ.

(د) أُحسب القيمة العظمى لشدّة التيّار الحثّي المتولّد في الملفّ.

طريقة التفكير في الحلّ.

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: $f = (60)\text{Hz}$

$R = (10)\Omega$

$A = (0.01)\text{m}^2$

$N = (20)\text{turns}$

$B = (10)\text{T}$

في لحظة $t = (0)\text{s}$ الإزاحة الزاوية $\theta_0 = (0)\text{rad}$

غير المعلوم: (أ) معادلة القوّة الدافعة الكهربائية بدلالة الزمن.

(ب) معادلة التيّار الحثّي بدلالة الزمن: $i = f(t)$

(جـ) القيمة العظمى للقوّة الدافعة الكهربائية المولَّدة: ε_{max}

(د) القيمة العظمى للتيّار الحثّي: i_{max}

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام قانون فاراداي وبالتعويض عن التدفّق المغناطيسي، نكتب:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(N.B.A\cos\theta)}{dt}$$

وبما أنّ حركة الملفّ هي حركة دائرية منتظمة فإنّ الإزاحة الزاوية $\theta = \omega t + \theta_0$، وبتطبيق الشرط الابتدائي في لحظة $t = (0)\text{s}$ تساوي: $\theta_0 = (0)\text{rad}$

نجد أنّ:

$$\varepsilon = -N.B.A\frac{d(\cos\omega t)}{dt} = +N.B.A.\omega.\sin\omega t$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نحصل على:

$$\varepsilon = (20)(10)(0.01)(2\pi \times 60)\sin(120\pi t)$$

$$\varepsilon = 240\pi \times \sin(120\pi t)$$

(ب) $i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{240\pi \times \sin(120\pi t)}{10} = 24\pi \times \sin(120\pi t)$

(جـ) $\varepsilon_{max} = (240\pi)\text{V}$

(د) $i_{max} = \frac{\varepsilon_{max}}{R} = \frac{240\pi}{10} = (24\pi)\text{A}$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتؤكّد أنّ المولّد الكهربائي يعطي قوّة دافعة كهربائية حثّية تتغيّر جيبيًّا بالنسبة إلى الزمن.

مسألتان مع إجابات

1. ملفّ مكوّن من (10) لفّات مساحة اللفّة $(0.04)\text{m}^2$ موضوع في مجال مغناطيسي منتظم شدّته $(0.1)\text{T}$ تصنع خطوط مجاله زاوية $(60°)$ مع متّجه المساحة على مستوى اللفّات. أُحسب متوسّط القوّة الدافعة الكهربائية الناتجة عن تدوير الملفّ لتصبح الزاوية بين المتّجه العمودي للمستوى واتّجاه خطوط المجال $(90°)$ خلال $(0.2)\text{s}$.

الإجابة: $\varepsilon = (+0.1)\text{V}$

2. مولّد تيّار متردّد يتألّف من ملفّ مصنوع من (40) لفّة مساحة كلّ لفّة $A = (0.01)\text{m}^2$ ومقاومته $(20)\Omega$ موضوع ليدور حول محور بحركة دائرية منتظمة وبتردّد $f = (50)\text{Hz}$ داخل مجال مغناطيسي منتظم شدّته $(2)\text{T}$، علمًا أنّ في لحظة $t = (0)\text{s}$ كانت الإزاحة الزاوية تساوي $\theta_0 = (0)\text{rad}$ أي أنّ خطوط المجال لها اتّجاه متّجه المساحة لمستوى اللفّات.

(أ) أُكتب الصيغة الرياضية للقوّة الدافعة الكهربائية في أيّ لحظة.

(ب) أُكتب الصيغة الرياضية للتيّار الحثّي بدلالة الزمن.

الإجابة: (أ) $\varepsilon = 80\pi.\sin(100\pi t)$

(ب) $i = 4\pi\sin(100\pi t)$

3. القوّة المغناطيسية Magnetic Force

1.3 القوّة المغناطيسية المؤثّرة على شحنة متحرّكة
Magnetic Force Acting on a Moving Charge

أظهرت التجارب العملية أنّ المجال المغناطيسي يؤثّر بقوّة مغناطيسية على الشحنات الكهربائية المتحرّكة باتّجاه غير موازٍ لخطوط مجاله وتُعرَف على أنّها قوّة حارفة (لورنتز). وإنّ القوة المغناطيسية $\vec{F}$، التي يؤثّر بها المجال المغناطيسي $\vec{B}$ على شحنة q تتحرّك بسرعة $\vec{v}$، تُحسب بالعلاقة التالية:

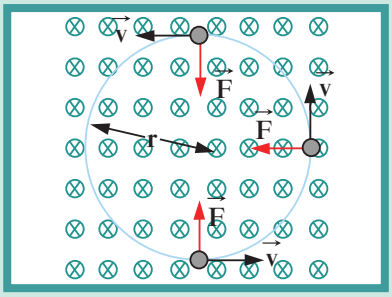
$$\vec{F} = q.\vec{v} \times \vec{B}_{\perp}$$

مقدار القوّة المغناطيسية يُحسَب بالعلاقة التالية:

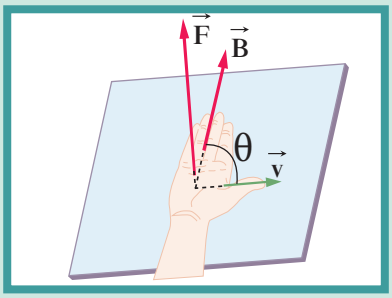
$$F = q.v.B.\sin\theta$$

حيث إنّ θ تساوي الزاوية بين اتّجاه السرعة واتّجاه المجال المغناطيسي.
يكون اتّجاه القوّة عموديًّا على المستوى الحامل لمتّجه السرعة ومتّجه المجال المغناطيسي، كما هو موضّح في الشكل (20)، ويحدَّد باستخدام قاعدة اليد اليمنى للمتّجهات، التي تنص على أن يجعل راحة اليد اليمنى مفرودة والإبهام باتّجاه حركة الشحنة اتّجاه سرعتها $\vec{v}$ وأصابع اليد باتّجاه المجال المغناطيسي ($\vec{B}$) ليكون اتّجاه القوّة $\vec{F}$ خارجًا عموديًّا من راحة اليد للشحنة الموجبة وداخلًا عموديًّا إلى راحة اليد للشحنة السالبة، كما هو موضّح في الشكل (21).
ومن التطبيقات على القوى المغناطيسية في المجالات المغناطيسية، توظيف خاصّية انحراف الجسيمات المشحونة في المجالات المغناطيسية لنشر الإلكترونات على السطح الداخلي لشاشة التلفاز لتكوين الصور.
كما أنّ المجال المغناطيسي للأرض يجعل الجسيمات المشحونة القادمة من الفضاء الخارجي تنحرف مبتعدة عنها، ما يخفّف شدّة الأشعّة الكونية التي تصل إلى سطح الأرض.

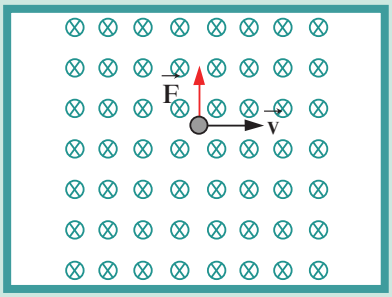
سؤال للمناقشة:
هل يؤثّر المجال المغناطيسي في الشحنة الساكنة كما هو الحال في المجال الكهربائي؟



(شكل 20)



(شكل 21)
قاعدة اليد اليمنى للمتجهات



(شكل 22)

مثال (2)

مجال مغناطيسي منتظم مقداره (0.2)T واتجاهه عمودي داخل الورقة. دخل هذا المجال المغناطيسي جسيم مشحون بشحنة q = (2)μc وبسرعة منتظمة v = 200m/s وباتجاه موازٍ لسطح الورقة باتجاه اليمين كما في الشكل (22).

(أ) أُحسب مقدار القوة المغناطيسية F المؤثرة في الشحنة.

(ب) حدد اتجاه القوة المغناطيسية.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: اذكر المعلوم وغير المعلوم:

المعلوم: مقدار المجال واتجاهه: B= (0.2)T عمودي داخل الورقة

مقدار السرعة V= (200)m/s باتجاه المحور الافقي x'x.

مقدار الشحنة. q= (2)μc

غير المعلوم: مقدار القوة المغناطيسية واتجاهها.

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام المعادلة التالية:

$$F = qvB \sin\theta$$

وحيث تمثل θ الزاوية بين اتجاه السرعة واتجاه المجال المغناطيسي.

وبالتعويض عن المقادير المعلومة نجد:

$$F = 2 \times 10^{-6} \times 200 \times 0.2 \sin 90 = (0.8 \times 10^{-4})\ N$$

(ب) إنّ اتجاه القوة يحدد باستخدام قاعدة اليد اليمنى حيث يكون اتجاه القوة باتجاه المحور الرأسي على سطح الورقة كما في الشكل (22).

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتائج تتلائم مع معطيات المسألة مما يشير الى صحتها.

2.3 القوى المغناطيسية المؤثرة على الأسلاك الحاملة للتيار
Magnetic Forces on Current Carrying Wires

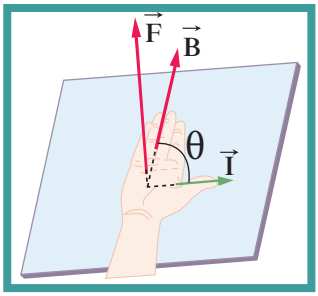
بما أن الجسم المشحون المتحرك في مجال مغناطيسي يتعرض لقوى حارفة – فإن التيار الكهربائي المكون من شحنات كهربائية متحركة في اتّجاه واحد في سلك طول جزئه الموضوع في مجال مغناطيسي B يساوي L، سيتعرّض لقوّة حارفة $\vec{F}$ تحرف بدورها السلك الحامل لها. تُسمّى هذه القوّة $\vec{F}$ القوّة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force وتُحسَب باستخدام العلاقة التالية:

$$\vec{F} = \vec{I}L \times \vec{B}$$

ومقدارها يُحسَب بالمعادلة التالية:

$$F = I.L.B.\sin\theta$$

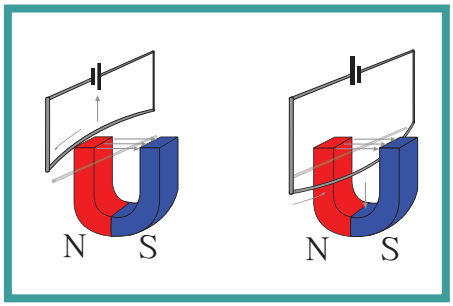
حيث إنّ θ هي الزاوية بين اتّجاه التيّار الكهربائي في السلك واتّجاه خطوط المجال المغناطيسي. أما اتّجاه القوّة الكهرومغناطيسية فيتحدّد بقاعدة اليد اليمنى وذلك بجعل راحة اليد اليمنى مفرودة والإبهام باتّجاه التيّار الكهربائي I وأصابع اليد باتّجاه المجال المغناطيسي ليكون اتّجاه القوّة خارجًا وعموديًّا من راحة اليد (شكل 23).



(شكل 23)

ويتبيّن من قاعدة اليد اليمنى أنّ عكس اتّجاه التيّار في السلك من دون تغيير اتّجاه المجال المغناطيسي يجعل القوّة الحارفة بالاتّجاه العكسي (شكل 24).

إنّ اكتشاف تأثير المجال المغناطيسي على السلك الحامل للتيّار الكهربائي بقوّة كهرومغناطيسية كان أساس اكتشاف المحرّكات الكهربائية.

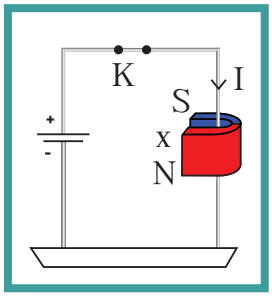


(شكل 24)

مثال (3)

سلك مستقيم طوله (20)cm موضوع في مجال مغناطيسي شدّته (0.2)T ويسري فيه تيّار كهربائي مقداره I = (0.5)A.

أُحسب مقدار القوّة الكهرومغناطيسية المؤثّرة في السلك علمًا أنّ اتّجاه المجال المغناطيسي عمودي على اتّجاه سريان التيّار في السلك (شكل 25). حدّد اتّجاه القوّة الكهرومغناطيسية المؤثّرة في السلك.



(شكل 25)

طريقة التفكير في الحلّ.

1. **حلِّل:** أذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: طول السلك الموضوع في المجال المغناطيسي: L = (20)cm

مقدار المجال المغناطيسي: B = (0.2)T

شدّة التيّار الكهربائي: I = (0.5)A

$\theta = \frac{\pi}{2}$ حيث إنّ $\vec{I}$ و $\vec{B}$ متعامدين.

غير المعلوم:

مقدار القوّة الكهرومغناطيسية $\vec{F}$ واتّجاهها؟

مسائل مع إجابات

1. سلك مستقيم طوله (1)m يسري فيه تيّار كهربائي مقداره (5)A وموضوع في مجال مغناطيسي خطوطه موازية لاتّجاه سريان التيّار. أُحسب مقدار القوّة الكهرومغناطيسية المؤثّرة في السلك.

الإجابة: F = (0)N

2. سلك مستقيم طوله (50)cm موضوع في مجال مغناطيسي شدّته (0.1)T ويسري فيه تيّار كهربائي مقداره I = (0.1)A. أُحسب مقدار القوّة الكهرومغناطيسية المؤثّرة على السلك علمًا أنّ اتّجاه المجال المغناطيسي عمودي على اتّجاه سريان التيّار في السلك.

الإجابة: (5×10^{-3})N

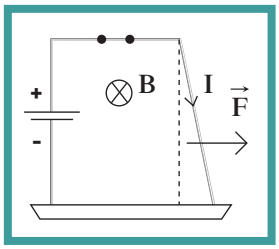
3. سلك مستقيم طوله (10)cm موضوع في مجال مغناطيسي شدّته (0.1)T عمودي على اتّجاه سريان التيّار في السلك. أُحسب مقدار شدّة التيّار الذي يسري في السلك إذا كانت القوّة الكهرومغناطيسية الناتجة عن مروره تساوي (0.004)N.

الإجابة:

(0.4)A

مثال (3) (تابع)

2. أحسب غير المعلوم.



(شكل 26)

باستخدام العلاقة: $F = I.B.L.\sin\theta$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$F = 0.5 \times 0.2 \times 0.2 \sin 90 = (0.02)N$

اتّجاه القوّة يُحدَّد باستخدام قاعدة اليد اليمنى كما هو موضّح في الشكل (26).

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة.

(شكل 19)

3.3 مبدأ عمل المحرّكات الكهربائية

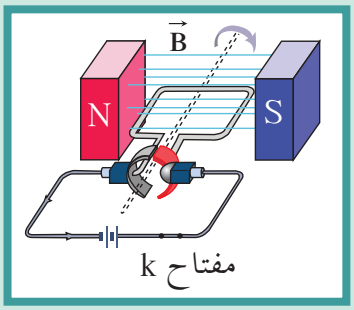
Principle of Operation of Motors

1.3.3 المحرّك الكهربائي The Motor

المحرّك الكهربائي Motor هو جهاز يحوّل جزءًا من الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية في وجود مجال مغناطيسي بعد تزويده بتيّار كهربائي مناسب (شكل 19).

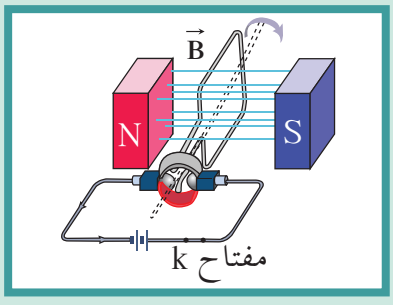
إنّ فهم عمل المحرّك الكهربائي يتطلّب مناقشة مفهوم القوى المغناطيسية Magnetic Forces المؤثّرة على شحنة متحرّكة في مجال مغناطيسي وعلى سلك يمرّ به تيّار كهربائي.

إنّ المحرّك الكهربائي يشبه في تركيبه المولّد الكهربائي فهو يتألّف من ملفّ مستطيل الشكل قابل للدوران حول محور في مجال مغناطيسي منتظم. يتّصل طرفا الملفّ إلى نصفي حلقة معزولتين عن بعضهما البعض ويدوران مع الملفّ ويلامسان فرشاتين من الكربون ثابتين يتّصلان بقطبي البطّارية.

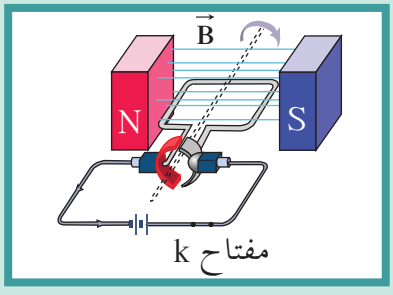


(شكل 27)

يستطيع المحرّك الكهربائي أن يقوم بعمل ميكانيكي في جهاز ما عندما يكون الذراع المتّصل بالملفّ القابل للدوران متّصلًا بالجهاز. إنّ فرق الجهد الموصول إلى الفرشاتين يزوّد الملفّ الموضوع بالمجال المغناطيسي المنتظم بالتيّار الكهربائي المناسب. لنفترض أنّ مستوى الملفّ موازٍ لخطوط المجال المغناطيسي في لحظة إغلاق المفتاح (k) وبدء مرور التيّار الكهربائي، وبحسب قاعدة اليد اليمنى نلاحظ أنّ القوّتين اللّتين تعملان على ضلعي الملفّ المتوازيان تشكّلان عزم ازدواج وتجعلان الملفّ يدور (شكل 27). ومع دوران الملفّ يقلّ العزم تدريجيًّا على الملفّ حتى ينعدم عندما يصبح مستوى الملفّ عموديًّا على خطوط المجال حيث ينعدم مرور التيّار الكهربائي لعدم اتّصال نصفي الحلقة بالفرشاتين (شكل 28). ولكن يستمرّ دوران الملفّ بسبب قصوره الذاتي ليتجاوز هذه الوضعية ويعود التلامس بين الفرشاتين ونصفي الحلقة اللتين تبادلتا المواقع فينعكس اتّجاه التيّار الكهربائي المارّ في الملفّ، ممّا يحافظ على الاتّجاه نفسه لعزم الازدواج واستمرار الدوران (شكل 29).



(شكل 28)



(شكل 29)

مراجعة الدرس 1-2

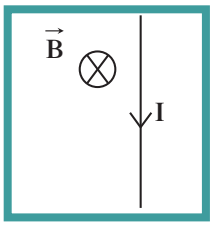
أوّلًا – عرِّف المولّد الكهربائي.

ثانيًا – ما الفرق بين المولّد الكهربائي والمحرّك الكهربائي من حيث عمل كلّ منهما؟

ثالثًا – ما الذي يجعل استمرار دوران ملفّ المحرّك الكهربائي على الرغم من انعدام مرور التيّار الكهربائي في الملفّ نتيجة عدم ملامسة نصفي الدائرة للفرشاتين الموصّلتين للتيّار الكهربائي؟

رابعًا – سلك مستقيم طوله (25)cm موضوع في مجال مغناطيسي مقداره (0.1)T ويسري فيه تيّار كهربائي مقداره $I = (0.2)A$.

(أ) أُحسب مقدار القوّة الكهرومغناطيسية المؤثّرة على السلك علمًا أنّ اتّجاه المجال المغناطيسي عمودي على اتّجاه سريان التيّار في السلك (شكل 30).



(شكل 30)

(ب) حدِّد اتّجاه القوّة الكهرومغناطيسية المؤثّرة على السلك.

خامسًا – (أ) أُحسب القوّة المغناطيسية التي يؤثّر فيها مجال مغناطيسي شدّته (1)T عمودي على الورقة إلى الخارج على بروتون شحنته $q = (1.6 \times 10^{-19})C$ يتحرّك بسرعة أفقية متعامدة مع اتّجاه المجال المغناطيسي ومقدارها $(3 \times 10^{7})m/s$.

(ب) اِستنتج شكل مسار البروتون في المجال المغناطيسي بإهمال وزن البروتون.

سادسًا – مولّد تيّار متردّد يتألّف من ملفّ مصنوع من (200) لفّة تساوي مساحة كلّ لفّة $A = (0.001)m^2$ ومقاومته $(10)\Omega$ موضوع ليدور حول محور بحركة دائرية منتظمة وبتردّد $f = (60)Hz$ داخل مجال مغناطيسي منتظم شدّته (5)T، علمًا أنّ في لحظة صفر كانت الإزاحة الزاوية $\theta_0 = (0)rad$، أي أنّ خطوط المجال لها اتّجاه متّجه مساحة مستوى اللفّات.

(أ) اِستخدم قانون فاراداي لتجد القوّة الدافعة الكهربائية في أيّ لحظة من دوران الملفّ.

(ب) أُكتب الصيغة الرياضية للتيّار الحثّي بدلالة الزمن.

(جـ) أُحسب مقدار القيمة العظمى للقوّة الدافعة الكهربائية المتولّدة.

(د) أُحسب مقدار القيمة العظمى للتيّار الحثّي المتولّد.

سابعًا – ملفّ محرّك كهربائي مستطيل الشكل مكوَّن من (200) لفّة مساحة كلّ لفّة $(4)cm^2$ موضوع في مجال مغناطيسي منتظم شدّته (0.1)T. أُحسب مقدار عزم الازدواج على الملفّ إذا مرّ فيه تيّار شدّته (2)mA، علمًا أنّ اتّجاه المجال يصنع زاوية تساوي $90°$ مع العمود المقام على مستوى الملفّ.

فقرة إثرائية

ارتباط الفيزياء بالتقنية

توليد الصوت

تقوم مكبّرات الصوت في أجهزة الراديو والتلفاز وغيرها من أجهزة الصوت بتحويل الإشارة الكهربائية إلى موجة صوتية. تمرّ الإشارة الكهربائية في ملفّ موضوع داخل مغناطيس أسطواني الشكل ومثبَّت بعنق مخروط ورقي. عند مرور التيّار الكهربائي في الملفّ تدفع القوّة الكهرومغناطيسية الملفّ فيسحب المخروط إلى الداخل، وعند انعكاس اتّجاه التيّار في الملفّ يندفع المخروط إلى الخارج. إنّ اهتزاز المخروط إلى الداخل والخارج يؤدّي إلى تكون الموجات الصوتية التي نسمعها.

الدرس 1-3

المحوّلات الكهربائية
Transformers

الأهداف العامة

- يعرّف الحث الذاتي.
- يعرّف الحثّ المتبادل.
- يصف كيفية عمل المحوّلات الكهربائية.
- يشرح السبب في استخدام المحوّلات عند نقل القدرة الكهربائية.

ناقشنا في الدرس السابق أحد تطبيقات مبدأ الحثّ الكهرومغناطيسي والمتمثّل في توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الميكانيكية من خلال مبدأ عمل المولّد الكهربائي، وناقشنا أيضًا مبدأ عمل المحرّكات الكهربائية التي تحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية. ولاحظنا أيضًا العلاقة بين التيّار الكهربائي والقوّة المغناطيسية والمجال المغناطيسي وتفاعلها في ما بينها في عمل كلّ من المحرّك والمولّد الكهربائي.

أمّا في هذا الدرس، فسنتعرّف الحث الذاتي والحثّ المتبادل وسنكتشف تطبيقًا آخر لمبدأ الحثّ الكهرومغناطيسي والمتمثّل بمبدأ عمل المحوّلات الكهربائية. وسنبيّن دور المحوّلات الكهربائية في نقل الطاقة الكهربائية المولَّدة بشكل فعّال وبدون خسارة كبيرة في أسلاك نقل التيّار الكهربائي. فخسارة التيّار الكهربائي في أسلاك النقل كانت من أكبر المشاكل التي عانتها محطّات توليد الطاقة قبل اكتشاف المحوّلات.

1. الحثّ الذاتي Self Induction

قد نلاحظ تأخير تشغيل بعض الأجهزة الإلكترونية عند إغلاق المفتاح على وضع التشغيل. ونلاحظ عمليًّا أنّه عند فتح مفتاح دائرة كهربائية تحتوي على ملفّ كبير لمغناطيس كهربائي متّصل بمصدر تيّار مستمّر، حدوث شرارة كهربائية بين طرفي التماس للمفتاح. إنّ تفسير مثل هذه الظواهر هو هدف هذا الجزء من الدرس.

إنّ مرور تيّار كهربائي في ملفّ يولّد مجالًا مغناطيسيًّا، حيث تمرّ خطوط المجال خلال الملفّ نفسه، وبذلك ينشأ تدفّق مغناطيسي في الملفّ نفسه.

إنّ تغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يجتاز الملفّ زيادة أو نقصانًا نتيجة تغيّر التيّار المارّ فيه يؤدّي إلى تولّد قوّة محرّكة تأثيرية في الملفّ نفسه، وتُسمّى هذه الظاهرة ظاهرة الحثّ الذاتي.

بتطبيق قانون لنز، نجد أنّ زيادة شدّة التيّار المارّ في دائرة الملفّ تولّد قوّة محرّكة تأثيرية ذاتية تفرض تيّارًا حثّيًّا يقاوم نموّ التيّار المستمرّ ويبطئ مروره في الدائرة. ويحدث العكس عند تقليل شدّة التيّار المارّ في الدائرة، فتولّد قوّة محرّكة تأثيرية ذاتية تفرض تيّارًا حثّيًّا في اتّجاه تيّار الدائرة المستمرّ، الأمر الذي يجعل شدّة التيّار تنخفض ببطء، وهذا ما يفسّر حدوث شرارة بين طرفي التماس للمفتاح.

حساب القوّة المحرّكة الكهربائية التأثيرية الذاتية

طبقًا لقانون فاراداي، إنّ القوّة المحرّكة التأثيرية تتناسب مع معدّل التغيّر في التدفّق المغناطيسي، أي أنّ:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

وانطلاقًا من التناسب بين التدفّق المغناطيسي Φ وشدّة المجال المغناطيسي B من جهة، والتناسب بين شدّة المجال المغناطيسي B وشدّة التيّار I من جهة ثانية، نستنتج أنّ القوّة المحرّكة التأثيرية المتوّلدة في ملفّ نتيجة تغيير التيّار المارّ فيه تتناسب مع معدّل تغيّر مقدار شدّة التيّار، وعليه نكتب:

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

بحيث تمثّل $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ المعدّل الزمني لتغيّر شدّة التيّار.

كما أنّ المقدار الثابت L يُسمّى معامل الحثّ الذاتي للملفّ، ويمثّل ثابت التناسب بين القوّة المحرّكة التأثيرية وتغيير مقدار شدّة التيّار. يُقاس معامل الحثّ الذاتي للملفّ بحسب النظام الدولي للوَحدات بوَحدة الهنري H.

ويعتمد معامل الحثّ الذاتي على خصائص الملفّ من طول الملفّ، وعدد اللفّات، ومساحة مقطع الملفّ ومادّة الوسط داخل الملفّ.

ونلاحظ من المعادلة السابقة أنّ **معامل الحثّ الذاتي للملفّ L هو مقدار القوّة المحرّكة الكهربائية التأثيرية الذاتية المتولّدة في الملفّ بسبب تغيير شدّة التيّار بمعدّل 1A في كلّ ثانية.**

$$L = - \frac{\varepsilon}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} \qquad (V.s/A = H)$$

وبما أنّ القوّة المحرّكة التأثيرية الذاتية عكسية تقاوم التغيير في شدّة التيّار فإنّ الإشارة السالبة في المعادلة تجعل من L قيمة عددية موجَبة. ونعرّف وحدة الهنري الذاتّي بأنّها **معامل الحثّ الذاتي لملفّ تتولّد فيه قوّة محرّكة تأثيرية ومقدارها V (1) عند تغيّر شدّة التيّار المارّ في الملفّ بمعدّل A (1) لكلّ ثانية.**

وتجدر الإشارة إلى أنّ وضع قلب حديدي في الملفّ يزيد معامل الحثّ الذاتي L بشكل كبير جدًّا يصل إلى مئات المرّات.

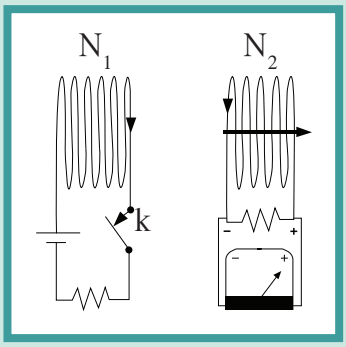
2. الحثّ المتبادَل Mutual Induction

ضَع زوجًا من الملفّات جنبًا إلى جنب أحدها متّصل بجلفانومتر والآخر بالبطارية كما في الشكل (31).

يُعرَف الملفّ المتّصل بالبطارية بالملفّ الابتدائي ويُعرَف الآخر بالملفّ الثانوي.

إنّ إغلاق المفتاح (k) في دائرة الملفّ الابتدائي يجعل مؤشّر الجلفانومتر يشير إلى اتّجاه محدَّد ويعود إلى الصفر. ويؤدّي مرور التيّار الكهربائي في الملفّ الابتدائي إلى تدفّق مغناطيسي معدّل تغيُّره يتناسب مع معدّل التغيّر في شدّة التيّار.

يؤثّر هذا التدفّق في الملفّ الثانوي ويؤدّي إلى تولُّد قوّة دافعة كهربائية وفقًا لقانون فاراداي وإلى تيّار حثّي آني (لحظي) في الملفّ الثانوي يظهر بحركة مؤشّر الجلفانومتر ويحدَّد اتّجاه التيّار بحسب قانون لنز. وكذلك عند فتح المفتاح ينحرف مؤشّر الجلفانومتر بالاتّجاه المعاكس ويعود إلى الصفر. فتوقَّف مرور التيّار الكهربائي في دائرة الملفّ الابتدائي يؤدّي إلى تولّد تيّار كهربائي حثّي آخر في الملفّ الثانوي ولكن في الاتّجاه المضادّ. تُسمّى هذه الظاهرة ظاهرة الحثّ المتبادَل.



(شكل 31)
ملفّ ابتدائي عدد لفّاته N_1
وملفّ ثانوي عدد لفّاته N_2

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}$$

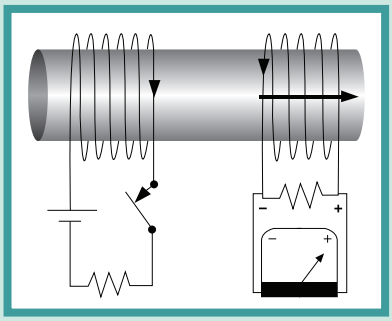
حيث إنّ ε_2 هي القوّة الدافعة الكهربائية المتولّدة في الملفّ الثانوي (N_2 عدد لفّاته)، وM هو ثابت يُسمّى معامل الحثّ المتبادَل، وهو مقدار القوّة المحرّكة الكهربائية التأثيرية المتولّدة في ملفّ بسبب تغيّر شدّة التيّار في الملفّ المجاور بمعدّل (1A) في كلّ ثانية، ويُقاس معامل الحثّ المتبادَل بحسب النظام الدولي للوَحدات بوَحدة هنري (H).

الحثّ المتبادَل Mutual Induction هو التأثير الكهرومغناطيسي الذي يحدث بين ملفّين متجاورين أو متداخلين بحيث يؤدّي التغيُّر في شدّة التيّار المارّ في الملفّ الابتدائي إلى تولُّد قوّة دافعة كهربائية في دائرة الملفّ الثانوي الذي يعمل على مقاومة هذا التغيُّر.

تظهر التجارب أنّ وضع نواة من الحديد داخل الملفّين الابتدائي والثانوي كما في الشكل (32) يجعل شدّة المجال المغناطيسي داخل الملفّ الابتدائي أكبر نتيجة المجالات المغناطيسية في الحديد، ويؤدّي أيضًا إلى زيادة في خطوط المجال المغناطيسي المتولّدة في الملفّ الثانوي، بحيث يظهر الجلفانومتر تغيُّرًا أكبر في شدّة التيّار عند فتح مفتاح دائرة الملفّ الابتدائي وإغلاقه.

إنّ إحداث تغيُّر في شدّة المجال المغناطيسي بشكل عملي يتطلّب استخدام مصدر جهد يزوّد دائرة الملفّ الابتدائي بتيّار متردّد بدلًا من فتح مفتاح دائرة الملفّ الابتدائية وإغلاقه بحيث يكون معدّل تغيُّر شدّة المجال المغناطيسي في الملفّ الابتدائي مساويًا لتردّد التيّار المتردّد.

إنّ استخدام ظاهرة الحثّ المتبادل بين ملفّين داخلهما قلب حديدي يكوّن مسارًا مغلقًا ويوجّه خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن تيّار متردّد إلى داخل الملفّ الثانوي هو مبدأ أساسي في عمل المحوّلات الكهربائية التي سنتناولها في القسم التالي.



(شكل 32)

مثال (1)

أُحسب القوّة الدافعة الكهربائية الناتجة عن الحثّ المتبادَل بين ملفّين إذا تغيّر التيّار الكهربائي في الملفّ الابتدائي من (20)A إلى صفر خلال (0.04)s، علمًا أنّ معامل الحثّ المتبادَل يساوي (2)H.

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلِّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: $M = (2)H$

$$\Delta i = 0 - 20 = (-20)A$$

$$\Delta t = (0.04)s$$

غير المعلوم:

$$\varepsilon = ?$$

2. **أُحسب غير المعلوم.**

باستخدام العلاقة الرياضية التالية:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{M \times \Delta i}{\Delta t}$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$\varepsilon_2 = -\frac{2 \times (-20)}{0.04} = (+1000)V$$

3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتبيّن أنّ انخفاض التيّار الكهربائي في الملفّ الابتدائي بمعدّل كبير يؤدّي إلى توليد قوّة دافعة كهربائية كبيرة في الملفّ الثانوي تقاوم التغيُّر الحاصل في الملفّ الابتدائي وهذا يتناسب مع قانون لنز.

3. المحوّل الكهربائي Transformer

1.3 تعريف المحوّل الكهربائي

Definition of the Transformer

المحوّل الكهربائي Transformer هو جهاز يعمل على رفع أو خفض القوّة الدافعة الكهربائية المتردّدة الناتجة عن مصدر جهد كهربائي متردّد من دون أن يُحدث أي تعديل على مقدار التردّد.

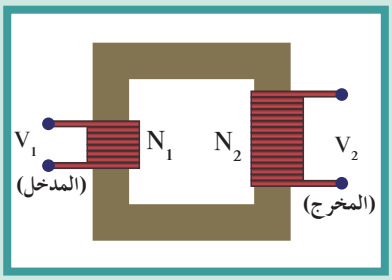
كما أنّه يُستخدَم في نقل الطاقة الكهربائية من محطّات التوليد إلى أماكن الاستهلاك بدون خسارة تُذكَر.

2.3 تركيب المحوّل الكهربائي

Structure of the Transformer

يتكوّن المحوّل الكهربائي من ملفّين ملفوفين حول قلب من الحديد، وهما:

- الملفّ الابتدائي وعدد لفّاته N_1 ويتّصل بدائرة التيّار المتردّد. الملفّ الثانوي وعدد لفّاته N_2 ويتّصل بدائرة الحمل (شكل 33).



(شكل 33)
يتألّف المحوّل الكهربائي من ملفّ ابتدائي وملفّ ثانوي.

مسألتان مع إجابات

1. إنّ تغيّر شدّة التيّار في الملف الابتدائي من (10)A إلى الصفر خلال فترة زمنية Δt أدى إلى نشوء قوة دافعة كهربائية في دائرة الملف الثانوي ناتجة عن الحث المتبادل بين الملفين مقدارها (10)KV
احسب مقدار الفترة الزمنية Δt التي ادى تغير شدة التيّار خلالها إلى نشوء تلك القوة الدافعة الكهربائية علماً أن معامل الحث المتبادل بين الملفين يساوي (4)H.
الإجابة: (4)ms

2. أُحسب معامل الحثّ المتبادَل بين الملفّين إذا علمت أنّ مقدار القوّة الدافعة الكهربائية الناتجة عن الملفّ الثانوي تساوي (−500)V نتيجة تغيُّر التيّار الكهربائي في الملفّ الابتدائي من (10)A إلى (20)A خلال (0.025)s.
الإجابة: (1.25)H

3.3 طريقة عمل المحوّل الكهربائي

How the Transformer Works

إنّ التيّار الكهربائي المتردّد في الملفّ الابتدائي يؤدّي إلى تدفّق مغناطيسي متغيّر تنتج عنه قوّة دافعة كهربائية عند طرفيه، وتُحسب بحسب قانون فاراداي باستخدام المعادلة التالية:

$$\varepsilon_1 = - N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

تنتشر خطوط المجال المغناطيسي عبر القلب الحديدي، ويحدث تغيُّر في التدفّق المغناطيسي في الملفّ الثانوي حيث تتولّد قوّة دافعة كهربائية متردّدة عند طرفيه تُحسب بحسب قانون فاراداي باستخدام المعادلة التالية:

$$\varepsilon_2 = - N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

ويمرّ في دائرة الملفّ الثانوي المغلقة تيّار حثّيّ متردّد له تردّد المصدر نفسه. ولإيجاد علاقة بين القوّتين الدافعتين الكهربائيتين على ملفّي المحوّل، وانطلاقًا من أنّ معدّل تغيُّر التدفّق $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ هو نفسه في الملفّين، نستنتج من المعادلتين السابقتين العلاقة الرياضية التالية:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

وبإهمال مقاومة الملفّين فإنّ القوّة الدافعة الكهربائية المتولّدة بين طرفي كلّ ملفّ تساوي فرق الجهد الحثّي المتولّد بين طرفي كلّ منهما وبالتالي نستنتج أنّ:

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

ومن خلال هذه المعادلة، يمكن أن نحدّد نوعين من المحوّلات:

- في حال $N_1 < N_2$ تكون $V_1 < V_2$ ويُسمّى المحوّل «محوّلًا رافعًا للجهد».
- في حال $N_1 > N_2$ تكون $V_1 > V_2$ ويُسمّى المحوّل «محوّلًا خافضًا للجهد».

ولإيجاد علاقة بين التيّارين الكهربائيين في ملفّي المحوّل، ننطلق من مبدأ حفظ الطاقة الذي يتحكّم دائمًا بما يحدث. فالمحوّل ينقل الطاقة من ملفّ إلى آخر، ومعدّل نقل الطاقة هو القدرة، والقدرة المستخدَمة في الملفّ الثانوي مستمَدّة من القدرة الموجودة في الملفّ الابتدائي. وبإهمال القدرة الضئيلة التي تُفقَد، فإنّ القدرة الداخلة إلى المحوّل عبر الملفّ الابتدائي (P_1) تساوي القدرة الناتجة عبر الملفّ الثانوي (القدرة P_2)، وهي تُعتبَر حالة مثالية بحيث يُسمّى المحوّل، الذي لا يسبّب أي خسارة في القدرة بين الملفّين، المحوّل المثالي.

وحيث إنّ القدرة الكهربائية تساوي حاصل ضرب القوّة الدافعة الكهربائية والتيّار الكهربائي، نكتب:

$$P_1 = P_2$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

وبالتالي نستنتج أنّ:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

وتبيّن هذه المعادلة التناسب العكسي بين شدّة التيّار في الملفّ وفرق الجهد بين طرفيه، فعند رفع الجهد تنخفض شدّة التيّار.

ولكن تظهر التجارب العملية عدم وجود محوّل مثالي، فالقدرة الداخلة على الملفّ الابتدائي لا تساوي القدرة الناتجة عن الملفّ الثانوي بسبب فقدان جزء من التدفّق المغناطيسي في الهواء وجزء من الطاقة على شكل طاقة حرارية في أسلاك الملفّين وفي القلب الحديدي. لذا **نعرّف كفاءة المحوّل Transformer Efficiency على أنّها النسبة بين القدرة الكهربائية في الملفّ الثانوي إلى القدرة الكهربائية في الملفّ الابتدائي** ويُعبَّر عنها رياضيًّا بالمعادلة التالية:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

علمًا أنّ كفاءة المحوّلات الكهربائية المتوفّرة في الأسواق تتراوح بين 92% و98% وهي جيّدة جدًّا إذا ما قارنّاها مع كفاءة أجهزة كهربائية أخرى.

مثال (2)

محوّل مثالي يتألّف ملفّه الابتدائي من (50) لفّة وملفّه الثانوي من (500) لفّة، وفرق الجهد على ملفّه الابتدائي يساوي (10)V.

(أ) حدِّد نوع المحوّل الكهربائي المستخدَم.

(ب) أُحسب فرق الجهد على طرفي ملفّه الثانوي.

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلِّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: $V_1 = (10)V$

$N_1 = (50)turns$

$N_2 = (500)turns$

غير المعلوم: (أ) نوع المحوّل الكهربائي

(ب) $V_2 = ?$

2. **أُحسب غير المعلوم.**

(أ) بما أنّ $N_2 > N_1$، نستنتج أنّ المحوّل هو محوّل رافع للجهد.

مسألتان مع إجابات

1. محوّل مثالي يتألّف ملفّه الابتدائي من (100) لفّة وملفّه الثانوي من (2000) لفّة. فرق الجهد على ملفّه الابتدائي يساوي (100)V.

(أ) حدِّد نوع المحوّل الكهربائي المستخدَم.

(ب) أُحسب فرق الجهد على طرفي ملفّه الثانوي.

الإجابات: (أ) محوّل رافع الجهد **(ب)** (2000)V

2. محوّل مثالي يتألّف ملفّه الابتدائي من (100) لفّة وملفّه الثانوي من (2000) لفّة. تمّ وصل ملفّه الثانوي إلى مقاومة $R = (50)\Omega$. أُحسب:

(أ) مقدار التيّار الكهربائي في ملفّه الثانوي علمًا أنّ مقدار الجهد على ملفّه الثانوي يساوي (200)V.

(ب) القدرة الكهربائية على الملفّ الثانوي.

(جـ) مقدار التيّار الكهربائي في ملفّه الابتدائي.

الإجابات: (أ) $I_2 = (4)A$

(ب) $P_2 = (800)W$

(جـ) $I_1 = (80)A$

مثال (2) (تابع)

(ب) باستخدام المعادلة التالية:

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

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نستنتج أنّ:

$$\frac{V_2}{10} = \frac{500}{50}$$

$$V_2 = (100)V$$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة حيث إنّ فرق الجهد على الملفّ الثانوي أكبر من فرق الجهد على الملفّ الابتدائي وهذا متوقَّع لأنّ المحوّل المستخدَم في هذا المثال هو محوّل رافع للجهد.

4. نقل القدرة الكهربائية

Transportation of Electrical Power

تُنقَل القدرة الكهربائية المتولّدة في محطّات إنتاج الطاقة والمستخدَمة في إنارة المدن وتشغيل المصانع اليوم على شكل تيّار متردّد وذلك لسهولة رفع القوّة الدافعة الكهربائية أو خفضها باستخدام المحوّلات التي لا تعمل إلّا على مصدر جهد متردّد. عند نقل قدرة كهربائية مقدارها P_1 من محطّة إنتاج الطاقة بفرق جهد V_1 وبأسلاك مقاومتها R وتيّار شدّته I فإنّه يحدث فقدان لجزء من القدرة مقداره P' على شكل حرارة في أسلاك النقل، يُعطى من العلاقة التالية:

$$P' = I^2 R \qquad (1)$$

$$P_1 = IV_1$$

$$I = \frac{P_1}{V_1}$$

وبالتعويض عن قيمة I في العلاقة (1)، نجد أنّ:

$$P' = \left(\frac{P_1}{V_1}\right)^2 \times R$$

$$P' = \frac{P_1^{\,2}}{V_1^{\,2}} \times R$$

لذا تُنقَل القدرة من محطّات التوليد عبر مسافات كبيرة إلى المستهلكين تحت فرق جهد عالٍ ومصحوب بتيّار منخفض. وهذا يقلّل من فقدان الطاقة في الأسلاك الناقلة. فالمحوّلات الرافعة للجهد في محطّات التوليد ترفع الجهد المولّد إلى (120000)V أو أكثر لتنتقل القدرة الكهربائية عبر

الأسلاك وتصل إلى محطّات فرعية حيث يوجد محوّلات خافضة للجهد، فينخفض الجهد إلى (2200)V في المدينة ومن ثمّ ينخفض إلى (220)V باستخدام محوّلات خافضة أخرى ليُستعمَل في المنازل (شكل 34).

(120 000)V

(2 200)V

(220)V

(شكل 34)
مراحل نقل الكهرباء من محطّة التوليد إلى أماكن الاستهلاك

مراجعة الدرس 1-3

أوّلًا – كيف تنتقل القوّة الدافعة الكهربائية من الملفّ الابتدائي إلى الملفّ الثانوي من دون أيّ تلامس بينهما؟

ثانيًا – عرِّف الحثّ المتبادَل بين ملفّين.

ثالثًا – عرِّف المحوّل الكهربائي المثالي.

رابعًا – لماذا تقوم النواة الحديدية الملفوف حولها الملفّان الابتدائي والثانوي، والتي تربط بينهما في المحوّل الكهربائي، بزيادة الحثّ الكهرومغناطيسي؟

خامسًا – اِشرح كيف تؤثّر نسبة عدد اللفّات بين الملفّ الابتدائي والملفّ الثانوي في نوع المحوّل الكهربائي.

سادسًا – يتطلّب نقل القدرة مسافات طويلة رفع الجهد إلى مقدار عالٍ جدًّا. اِشرح السبب في ذلك.

سابعًا – محوّل كهربائي عدد لفّات ملفّه الثانوي عشرة أضعاف عدد لفّات ملفّه الابتدائي. أُحسب القوّة الدافعة الكهربائية المستحثّة في الملفّ الثانوي إذا كانت القوّة الدافعة الكهربائية في ملفّه الابتدائي تساوي (6)V.

ثامنًا – أُحسب القوّة الدافعة الكهربائية الناتجة عن الحثّ المتبادَل بين ملفّين إذا تغيَّر التيّار الكهربائي في الملفّ الابتدائي من (5)A إلى (15)A خلال (0.05)s، علمًا أنّ معامل الحثّ المتبادَل يساوي (1.4)H.

تاسعًا – محوّل يتألّف ملفّه الابتدائي من (800) لفّة وملفّه الثانوي من (2400) لفّة. تمّ وصل ملفّه الثانوي إلى مقاومة $R = (10)\Omega$. أُحسب:

(أ) مقدار التيّار الكهربائي في ملفّه الثانوي، علمًا أنّ مقدار الجهد على ملفّه الثانوي يساوي (2200)V.

(ب) القدرة الكهربائية على الملفّ الثانوي.

(جـ) القدرة الكهربائية على ملفّه الابتدائي، علمًا أنّ كفاءة المحوّل تساوي 95%.

(د) مقدار التيّار الكهربائي في ملفّه الابتدائي.

دروس الفصل

الدرس الأوّل
التيّار المتردّد

بعد أن درسنا في السنوات السابقة التيّار المستمرّ وقوانين الجهد وشدّة التيّار وأنواع التوصيلات من توالي وتوازي ومركّبة في الدوائر الكهربائية، سنتناول في هذا الفصل دراسة التيّار المتردّد كنوع آخر يختلف في خصائصه عن التيّار المستمرّ.

سنبدأ بتعرُّف مبادئ التيّار المتردّد الأساسية لأنّ فهمها مهمّ جدًّا، فهي تشكّل جزءًا من حياتنا اليومية. فتشغيل التلفاز أو الراديو أو أيّ آلة كهربائية هو استخدام للتيّار المتردّد. ثمّ سنتابع بدراسة خواصّ الدوائر الكهربائية التي تحتوي على مصدر متردّد وعنصر آخر: مقاومة أوميّة أو مكثّف أو ملفّ. وبعدها سنختبر ماذا يحدث عند استخدام تلك العناصر الثلاثة في دائرة واحدة على التوالي على مصدر جهد متردّد. وتجدر الإشارة إلى أنّ دراستنا للدوائر الكهربائية في هذا الفصل ستقتصر على دوائر التوالي البسيطة فحسب.

التيّار المتردّد
Alternating Current

الأهداف العامة

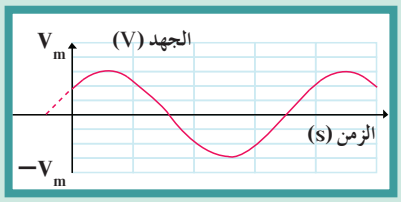
- يعرّف التيّار المتردّد واستخداماته.
- يطبّق قانون أوم على دوائر التيّار المتردّد التي تحتوي على مقاومتين أوميتين.
- يطبّق قانون أوم على دوائر التيّار المتردّد التي تحتوي على مقاومة وملفّ.
- يطبّق قانون أوم على دوائر التيّار المتردّد التي تحتوي على مقاومة ومكثّف.
- يطبّق قانون أوم على دوائر التيّار المتردّد التي تحتوي على مقاومة وملفّ ومكثّف.

اكتشفنا في الدروس السابقة أحد أهمّ التطبيقات العملية لقانون فاراداي، وهو توليد القوّة الدافعة الكهربائية المتردّدة في مولّدات الطاقة الكهربائية. في هذا الدرس سنهتمّ بدراسة التيّار المتردّد وخواصّه، وسنكتشف تطبيقاته في الدوائر الكهربائية المختلفة لنبيّن الفرق بينها وبين دوائر التيّار المستمرّ الذي درسناه في السنوات السابقة.

1. الجهد المتردّد والتيّار المتردّد
Alternating Voltage and Alternating Current

لقد تعلّمنا سابقًا أنّ دوران الملفّ في المجال المغناطيسي المنتظِم يؤدّي إلى تغيُّر معدّل التدفّق المغناطيسي في مستوى الملفّ، ما يؤدّي بدوره إلى تولّد قوّة دافعة كهربائية حثّية تتغيّر جيبيًّا بالنسبة إلى الزمن كما في الشكل (35) وبحسب المعادلة التالية:

$$V = + N.B.A.\omega.\sin(\omega t + \phi)$$



(شكل 35)
تمثيل بياني للجهد المتردّد

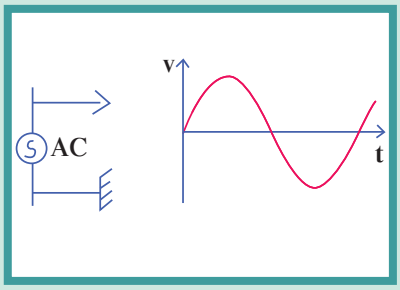
يُسمّى الجهد المتردّد في أيّ لحظة الجهد اللحظي، ويُرمَز له بـ v(t)، بينما يُرمَز لقيمة الجهد العظمى بـ $V_m = N.B.A.\omega$. وعليه، فإنّ الجهد الجيبي اللحظي أو الجهد المتردّد يُمثَّل بالعلاقة التالية:

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \phi)$$

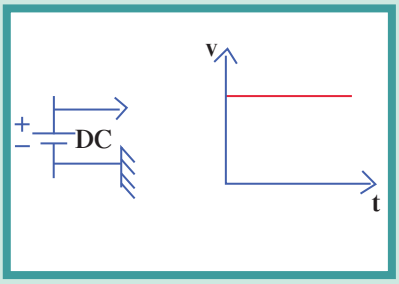
بحيث تمثِّل $(\omega t + \phi)$ الإزاحة الزاوية في أيّ لحظة وتُقاس بحسب النظام الدولي للوَحدات بوَحدة الراديان (rad). وتُسمّى أيضًا فرق الطور Phase Difference في أيّ لحظة، بينما تُسمّى ϕ زاوية فرق الطور في بداية التوقيت $(t = 0)$ وتُقاس أيضًا بوَحدة الراديان. ω هو التردّد الزاوي للمصدر ووَحدته rad/s.

ونعرّف التيّار الآني (اللحظي) المتردّد i(t) على أنّه التيّار الذي يسري في المقاومة R، والذي يتغيّر أيضًا جيبيًّا بالنسبة إلى الزمن ويُحسَب بالمعادلة التالية:

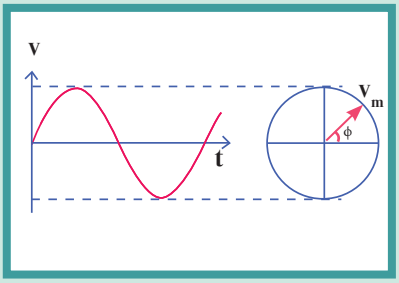
$$i(t) = i_m \sin(\omega t + \phi)$$



(شكل 36)



(شكل 37)



(شكل 38)

حيث إنّ i_m هي قيمة التيّار العظمى، وتُقاس بحسب النظام الدولي للوَحدات بوَحدة (A). ويمكن المقارنة بين التيّار المستمرّ والتيّار المتردّد بشكل عملي باستخدام راسم الإشارة. فإنّ وصل مصدر جهد متردّد AC براسم الإشارة يظهره متغيّرًا مقدارًا واتّجاهًا (شكل 36)، ومختلفًا عن مصدر الجهد المستمرّ DC الذي يظهر على شكل خطّ مستقيم على شاشة راسم الإشارة عند وصله عليه، ما يدلّ على ثبات مقداره وعدم تغيّره (شكل 37). من خلال المعادلات والرسم البياني للتيّار المتردّد، نعرّف «**التيّار المتردّد Alternating Current على أنّه تيّار يتغيّر اتّجاهه كلّ نصف دورة وأنّ معدّل مقدار شدّته يساوي صفرًا» في الدورة الواحدة.**

1.1 التمثيل المتّجه للجهد المتردّد

Vector Representation of Alternating Voltage

يمكن تمثيل الجهد المتردّد بمتّجه طور، بحيث يساوي طوله القيمة العظمى V_m، ويدور بسرعة زاوية ω، ويصنع مع المحور الأفقي زاوية $(\omega t + \phi)$ تمثّل الإزاحة الزاوية في أيّ لحظة (طور التيّار)، بينما تمثّل الإسقاطات على المحور الرأسي مقدار الجهد الجيبي اللحظي (شكل 38). بالاعتماد على الطريقة نفسها، يمكن تمثيل التيّار المتردّد بمتّجه طور له طول يساوي القيمة العظمى ويدور بسرعة زاوية ويصنع مع المحور الأفقي زاوية طور.

2.1 المقدار الفعّال للتيّار المتردّد

Effective Value of Alternating Current

نعرّف المقاومة الأومية أو المقاومة الصرفة على أنّها المقاومة التي تحوّل الطاقة الكهربائية بأكملها إلى طاقة حرارية فحسب وليس لديها أيّ تأثير حثّي ذاتي $L = (0)H$. وهي في معظم الأحيان على شكل ملفّ ملفوف لفًّا مزدوجًا لإلغاء الحثّ الذاتي الناتج عنه أو على شكل سلك مستقيم.

لدى مرور تيّار متردّد في مقاومة صرفة R لفترة زمنية t تتحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية. وحيث إنّ شدّة التيّار المتردّد تتغيّر لحظيًّا مع الزمن، كان لا بدّ من تعريف قيمة التيّار المتردّد، والتي تعتمد على تأثيره الحراري في المقاومة الصرفة، بالمقارنة مع تيّار مستمرّ. فإذا مرّ تيّار مستمّر ثابت الشدّة وآخر متردّد، كلّ على حدة في مقاومة أومية لها القيمة نفسها وخلال الفترة الزمنية نفسها وأعطى كلّ منهما كمّية الحرارة نفسها، فإنّ شدّة التيّار المستمرّ تُسمّى الشدّة الفعّالة للتيّار المتردّد، وعليه **نعرّف الشدّة الفعّالة للتيّار المتردّد على أنّها شدّة التيّار المستمرّ (ثابت الشدّة) الذي يولّد كمّية الحرارة نفسها الذي ينتجها التيّار المتردّد في مقاومة أومية لها نفس القيمة خلال الفترة الزمنية نفسها.** يُرمز إلى الشدّة الفعّالة للتيّار المتردّد بالرمز i_{rms}، وتُقاس بوَحدة الأمبير (A). وبالاعتماد على التعريف، يمكن إثبات أنّ الشدّة الفعّالة للتيّار المتردّد تساوي:

$$i_{rms} = \frac{i_m}{\sqrt{2}}$$

وبالمماثلة، نكتب الجهد الفعّال للجهد المتردّد: $V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$ ونستنتج ممّا سبق التالي:

إن الشدّة الفعّالة للتيّار المتردّد الجيبي تتناسب طرديًّا مع شدّته العظمى.

- إنّ مرور تيّار متردّد شدّته العظمى i_m في المقاومة R لفترة زمنية t يولّد كمّية الحرارة نفسها التي يولّدها مرور تيّار مستمّر شدّته $\frac{i_m}{\sqrt{2}}$ في المقاومة نفسها وخلال الفترة الزمنية نفسها.
- تُحسَب الطاقة الحرارية E في المقاومة R متّصلة بمصدر تيّار متردّد، وكذلك القدرة الحرارية P بالاعتماد على الشدّة الفعّالة حيث إنّ:

$$E = i^2_{rms}\ R\ t$$
$$P = i^2_{rms}\ R$$

ولا بدّ من الإشارة إلى أنّ الأجهزة الكهربائية التي تعمل على التيّار المتردّد تُسجَّل عليها القيم الفعّالة من شدّة التيّار أو مقدار الجهد، كما أنّ الأجهزة المستخدَمة لقياس شدّة التيّار المتردّد ومقدار الجهد المتردّد من أميتر وفولتاميتر تقيس القيم الفعّالة فحسب.

مثال (1)

مكواة ملابس تعمل على مصدر جهد متردّد حيث إنّ شدّة التيّار العظمى $(5\sqrt{2})A$. أُحسب الطاقة الحرارية الناتجة عن عمل المكواة لمدّة ساعة، علمًا أنّ مقاومة المكواة الأومية تساوي $(1000)\Omega$.

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلِّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: القيمة العظمى لشدّة التيّار: $i_m = (5\sqrt{2})A$

الزمن $t = (1)h = (3600)s$

المقاومة $R = (1000)\Omega$

غير المعلوم: الطاقة الحرارية E الناتجة؟

2. **أُحسب غير المعلوم.**

باستخدام معادلة جول لحساب التأثير الحراري:

$$E = i^2_{rms}\ Rt$$

وبحساب شدّة التيّار الفعّال:

$$i_{rms} = \frac{i_m}{\sqrt{2}} = (5)A$$

وبالتعويض عن القيم المعلومة، نجد أنّ:

$$E = 25 \times 1000 \times 3600 = (90 \times 10^6)\ J$$

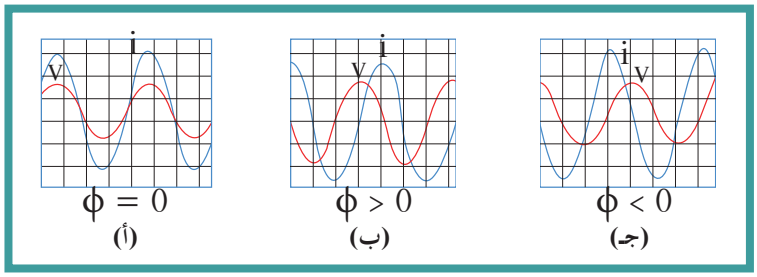
3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة.

3.1 فرق الطور Phase Difference

عند تطبيق جهد متردّد $v_t = V_m \sin(\omega t + \phi)$ على دائرة كهربائية، يسري في الدائرة تيّار كهربائي متردّد $i = i_m \sin(\omega t)$. حيث إنّ ϕ هو فرق الطور بين الجهد المتردّد v والتيّار الكهربائي i .

يُمثَّل فرق الطور بيانيًّا بأقرب مسافة أفقية بين قمّتين متتاليتين لمنحنى كلّ من فرق الجهد وشدّة التيّار الكهربائي اللذين يظهران على شاشة راسم الإشارة (شكل 39):

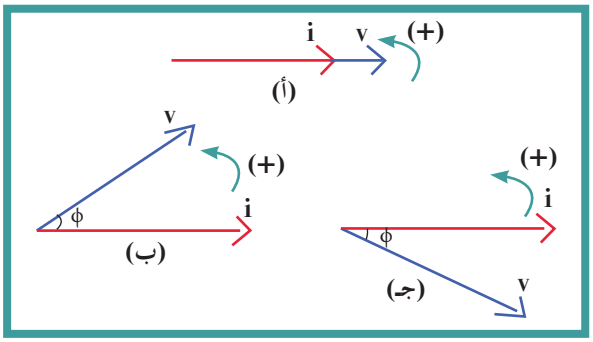


(شكل 39)

(أ) إذا كان $\phi = 0$ ، تكون شدّة التيّار الكهربائي وفرق الجهد متّفقي الطور .

(ب) إذا كان $\phi > 0$ ، فرق الجهد يسبق شدّة التيّار الكهربائي .

(جـ) إذا كان $\phi < 0$ ، تسبق شدّة التيّار الكهربائي فرق الجهد . (شكل 40)



(شكل 40)
(أ) التيار والجهد في طور واحد
(ب) الجهد يسبق التيار
(جـ) التيار يسبق الجهد

2. تطبيق قانون أوم على دوائر التيّار المتردّد

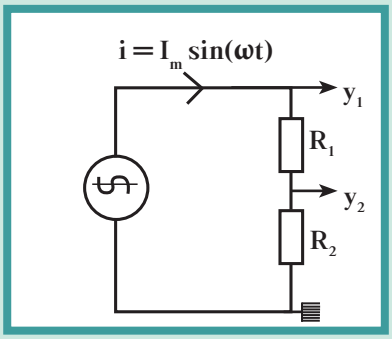
Application of Ohm's Law in AC Circuits

1.2 تطبيق قانون أوم على دائرة تيّار متردّد تحوي مقاومتين أوميتين فحسب:

Application of Ohm's Law in an AC Circuit with a Two Resistances

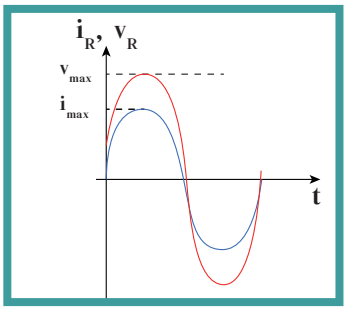
في دائرة التيّار المتردّد التي تحتوي على مقاومة صرفة فحسب، نهدف إلى إيجاد قيمة الجهد العظمى للمصدر V_m بالنسبة إلى القيمة العظمى للتيّار، وإيجاد فرق الطور بين جهد المصدر والتيّار الكهربائي المتردّد في الدائرة الكهربائية .

نقوم بتوصيل راسم الإشارة ذي المدخلين ليقيس الجهد في الوقت نفسه على كلّ من المصدر والمقاومة الأومية R في دائرة تيّار متردّد منخفض التردّد (شكل 41)، علمًا أنّ الرسم البياني الذي يمثّل الجهد على المقاومة الأومية له الشكل نفسه للتيّار الكهربائي في الدائرة، وذلك لأنّ $i(t) = v(t)/R$، حيث إنّ R تساوي قيمة ثابتة.



(شكل 41)

ولدى ملاحظة الرسم البياني الذي يظهر على شاشة راسم الإشارة (شكل 42)، يمكننا أن نلاحظ أنّ التيّار الكهربائي وجهد المصدر يتغيّران بكيفية واحدة، أي أنّهما متّفقان في الطور، فيزدادان معًا ويتناقصان معًا أي أنّ $\Phi = (0)\text{rad}$.

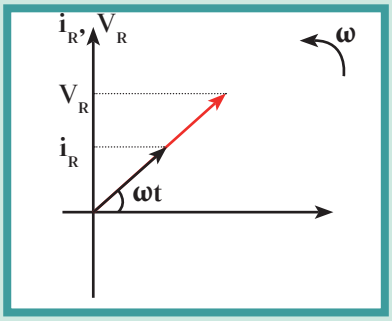


(شكل 42)

ويمكن تمثيل ذلك اتّجاهيًّا كما في الشكل (43).

إنّ مقدار المقاومة الأومية يمكن إيجاده في أيّ لحظة من أيّ من العلاقات التالية:

$$R = \frac{V_{max}}{i_{max}} = \frac{V_{rms}}{i_{rms}}$$



(شكل 43)

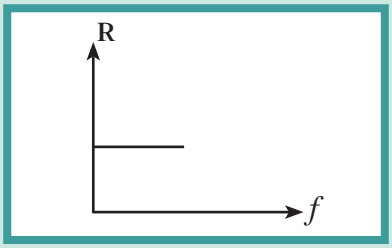
كما أنّ مقدار المقاومة الأومية يمكن إيجاده بالاعتماد على خصائص الموصل التي صُنعَت منه المقاومة الأومية من طول السلك L والمقاومة النوعية لمادّة السلك ρ، ومساحة مقطعه A بحسب العلاقة: $R = \frac{\rho L}{A}$

ومن العلاقات السابقة، نستنتج أنّ قيمة المقاومة R لا تتغيّر بتغيّر نوع التيّار المارّ سواء أكان متردّدًا أم كان مستمرًّا، ولا تتغيّر بتغيّر التردّد كما هو موضّح في الشكل (44).

ويمكن أيضًا التعبير عن فرق الجهد وشدّة التيّار في المقاومة بالمعادلتين التاليتين على التوالي:

$$v(t)_R = V_{m\,R} \sin \omega t$$

$$i(t)_R = i_{m\,R} \sin \omega t$$



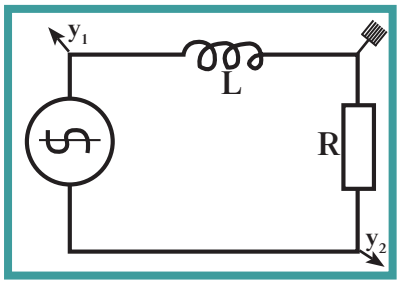
(شكل 44)

2.2 تطبيق قانون أوم على دائرة تيّار متردّد تحوي ملفًّا حثّيًّا (تأثيريًّا) نقي ومقاومة أومية

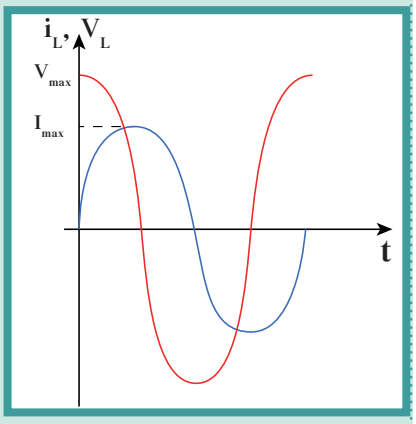
Application of Ohm's Law in a RL Circuit with a Resistance

نعرّف الملفّ الحثّي النقي Pure Inductive Coil على أنّه الملفّ الذي له تأثير حثّي ، حيث إنّ معامل حثّه الذاتي L كبير ومقاومته الأومية r معدومة .

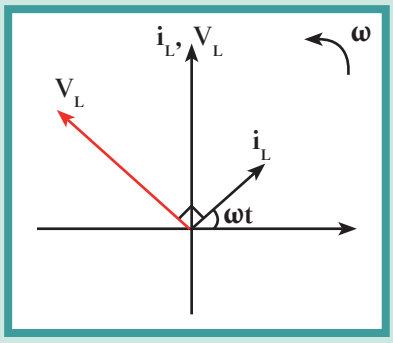
في الدائرة المؤلّفة من مقاومة أومية R وملفّ مهمل المقاومة الأومية ، نقوم بتوصيل راسم الإشارة ذي المدخلين ليقيس فرق الجهد على الملفّ وفرق الجهد على المقاومة التي تمثّل التيّار الكهربائي في الدائرة شكل (45) .



(شكل 45)



(شكل 46)



(شكل 47)

نلاحظ على شاشة جهاز راسم الإشارة أنّ جهد الملفّ يتقدّم على التيّار الكهربائي المارّ فيه وبحساب فرق الطور بينهما ، نجد أنّ الجهد الكهربائي يتقدّم على التيّار الكهربائي في الملفّ (بربع دورة) بزاوية طور $\Phi=\pi/2$ rad . ويمثّل ذلك بيانيًّا في الشكل (46) واتجاهيًّا في الشكل (47) . كما ويمكن التعبير عن مقدار فرق الجهد اللحظي بين طرفي الملفّ الحثّي النقي عند مرور تيّار لحظي بالمعادلة التالية:

$$v_L = V_{max} \sin(\omega t + \pi/2)$$
$$i_L = i_{max} \sin\omega t$$

ممانعة الملفّ للتيّار المتردّد

التيّار المتردّد الذي في دائرة الملفّ والمقاومة متغيّر الشدّة لحظيًّا ومتغيّر الاتّجاه كلّ نصف دورة ، وبالتالي يولّد في الملفّ قوّة محرّكة كهربائية تأثيرية تعاكس مسبّبها دائمًا ، فتعيق مرور التيّار في الملفّ ، وهذه المقاومة

تُسمّى الممانعة الحثّية للملفّ Inductive Reactance ويُرمَز لها بالرمز X_L . وتُقاس الممانعة بحسب النظام الدولي للوَحدات بوَحدة الأوم Ω.
وعليه، **نعرّف الممانعة الحثّية للملفّ على أنّها الممانعة التي يبديها الملفّ لمرور التيّار المتردّد خلاله.**

إنّ الممانعة الحثّية للملفّ ليست مقاومة أومية، أي أنّها لا تحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية. وتثبت التجارب أنّ قيمة الممانعة تتوقّف على ما يلي:

- تردّد التيّار f: بحيث تتناسب الممانعة الحثّية للملفّ X_L طرديًّا مع تردّد التيّار عند ثبات معامل الحثّ الذاتي L.
- معامل الحثّ الذاتي L للملفّ: بحيث تتناسب الممانعة الحثّية للملفّ مع معامل الحثّ الذاتي للملفّ عند ثبات التردّد f.

وعليه، نستنتج أنّ الممانعة الحثّية تتناسب طرديًّا مع الحثّ الذاتي والتردّد ونكتب:

$$X_L \alpha L f$$

أي أنّ

$$X_L = K f L$$

ووُجد عمليًّا أنّ المقدار الثابت $K = 2\pi$، أيّ أنّ $X_L = 2\pi f L$

وبما أنّ $\omega = 2\pi f$، فإنّ ممانعة الملفّ تساوي:

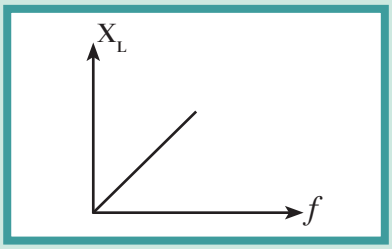
$$X_L = L\,\omega$$

ومن العلاقة بين ممانعة الملفّ ومعامل الحثّ الذاتي والسرعة الزاوية نلاحظ:

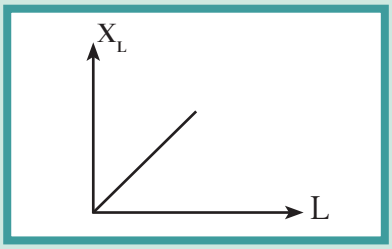
- في حالة التيّار المستمّر فإنّ التردّد يساوي صفرًا، وعليه تصبح ممانعة الملفّ مساوية لصفر. لذلك لا تظهر أيّ ممانعة حثّية في دوائر التيّار المستمرّ.
- تُستخدَم الملفّات الحثّية في فصل التيّارات منخفضة التردّد عن تلك المرتفعة التردّد والمستخدَمة في الأجهزة اللاسلكية بحيث تسمح بمرور التيّارات المنخفضة وتمنع التيّارات عالية التردّد.

ويمكن بتطبيق قانون أوم إيجاد مقدار الممانعة الحثية للملف بحيث تأخذ لكل من الجهد والتيار في أي لحظة من العلاقات التالية:

$$X_L = \frac{V_{rms\,L}}{i_{rms\,L}} = \frac{V_{max\,L}}{i_{max\,L}}$$



(شكل 48–أ)



(شكل 48–ب)

ومن خصائص الملفّ الحثّي النقي أنّه لا يحوّل أيّ جزء من الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية بل إلى طاقة مغناطيسية U_B تُختزَن في المجال المغناطيسي للملفّ وتساوي: $U_B = \frac{1}{2} Li^2_{rms}$

مثال (2)

دائرة تيّار متردّد تحتوي على ملفّ نقي، معامل حثّه الذاتي يساوي $L = 0.01H$، يمرّ فيه تيّار لحظي يتمثّل بالعلاقة التالية:
$i_{(t)} = 2 \sin 100\pi t$. أُحسب:

(أ) ممانعة الملفّ الحثّية.

(ب) فرق الجهد الفعّال على طرفي الملفّ.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: معامل الحثّ الذاتي للملفّ: $L = 0.01H$

مقدار شدّة التيّار اللحظي: $i_{(t)} = 2 \sin 100\pi t$

غير المعلوم: **(أ)** الممانعة الحثّية للملفّ

(ب) الجهد الفعّال على الملفّ

2. أُحسب غير المعلوم.

باستخدام المعادلة التالية:

$$X_L = L\omega = 0.01 \times 100\pi = 3.14\Omega$$

وبحساب شدّة التيّار الفعّال:

$$i_{rms} = \frac{i_m}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}} = 1.41 \text{ A}$$

وبالتعويض عن القيم المعلومة، نجد أنّ:

$$V_{rms} = i_{rms} X_L = 1.41 \times 3.14 = 4.4V$$

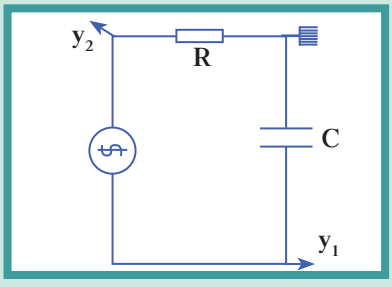
3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة.

3.2 تطبيق قانون أوم على دائرة تيّار متردّد تحوي مكّثف ومقاومة

Application of Ohm's Law in an AC Circuit with a Capacitor and a Resistance

في الدائرة المؤلّفة من مقاومة أومية R ومكثّف، نقوم بتوصيل راسم الإشارة ذي المدخلين ليقيس فرق الجهد على المكثّف وفرق الجهد على المقاومة التي تمثّل التيّار الكهربائي في الدائرة (شكل 49).

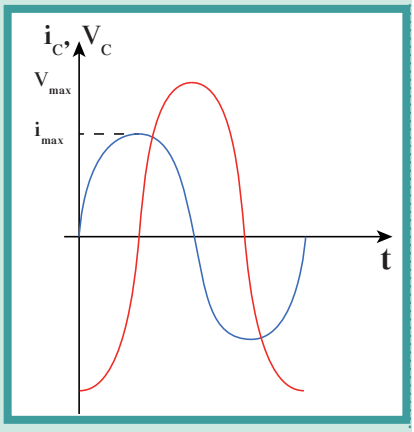


(شكل 49)

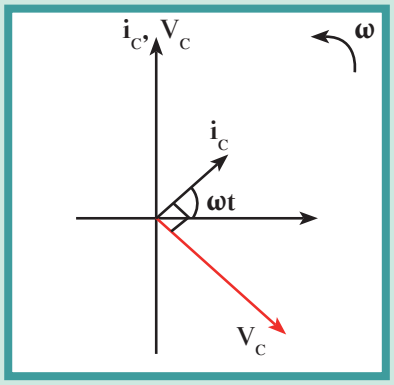
نلاحظ على شاشة جهاز راسم الإشارة أنّ جهد المكثّف يتأخّر على التيّار الكهربائي المارّ بالدائرة وبحساب فرق الطور بينهما نجد أنّ الجهد الكهربائي يتأخّر على التيّار الكهربائي في المكثف بربع دورة بزاوية طور تساوي $\Phi=\pi/2$ rad . ويمثّل ذلك بيانيًّا في الشكل (50) واتّجاهيًّا في الشكل (51).

كما يمكن التعبير عن مقدار فرق الجهد اللحظي بين طرفي المكثّف عند مرور تيّار لحظي بالمعادلة التالية:

$$v(t) = V_{max} \sin(\omega t - \pi/2)$$
$$i_C = i_{max} \sin\omega t$$



(شكل 50)



(شكل 51)

ممانعة المكثّف لمرور التيّار

يمانع المكثّف مرور التيّار المتردّد في دائرته، وتُسمّى هذه الممانعة بالممانعة السعوية للمكثّف Capacitance Reactance ويُرمز لها بالرمز X_C. تنشأ ممانعة المكثّف من تراكم الشحنات على سطحي المكثّف وحدوث فرق جهد عكسي يقاوم مرور تيّار الشحن الكهربائي. وتُقاس الممانعة بحسب النظام الدولي للوَحدات بوَحدة الأوم. وعليه، **نعرّف الممانعة السعوية على أنّها الممانعة التي يبديها المكثّف لمرور التيّار المتردّد خلاله.**

وتثبت التجارب أنّ قيمة الممانعة السعوية تتوقّف على:

- تردّد التيّار f: بحيث تتناسب الممانعة السعوية X_C عكسيًّا مع تردّد التيّار عند ثبات مقدار السعة C.
- سعة المكثّف الكهربائية C: بحيث تتناسب الممانعة السعوية عكسيًّا مع السعة الكهربائية للمكثّف عند ثبات التردّد f.

وعليه، نستنتج أنّ الممانعة السعوية تتناسب عكسيًّا مع السعة والتردّد ونكتب:

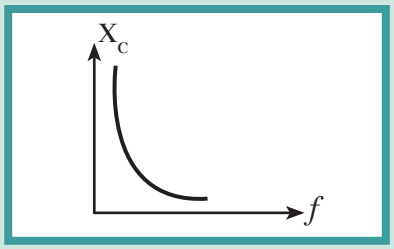
$$X_C \alpha \frac{1}{f C}$$

أي أنّ $X_C = \frac{K}{f C}$

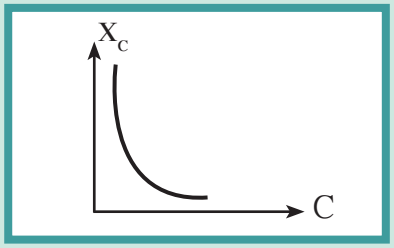
ووُجد عمليًّا أنّ المقدار الثابت $K = \frac{1}{2\pi}$، أي أنّ $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$

وبما أنّ $\omega = 2\pi f$ فإنّ ممانعة المكثّف السعوية تساوي:

$$X_C = \frac{1}{C\,\omega}$$



(شكل 52–أ)



(شكل 52–ب)

ومن العلاقة بين ممانعة الممانعة السعوية وسعة المكثّف والسرعة الزاوية نلاحظ: في حالة التيّار المستمّر فإنّ التردّد يساوي صفرًا، وعليه تصبح ممانعة المكثّف لانهائية القيمة، أي أنّ دائرة التيّار المستمرّ مفتوحة.

- يسمح المكثّف بمرور التيّار المتردّد خلال الدائرة الكهربائية لأنّ التيّار المتردّد في خلال زمن دوري واحد يُحدث عمليتي شحن وتفريغ.
وبسبب تعاقب عمليتي الشحن والتفريغ فإنّ التيّار يمرّ بالدائرة على الرغم من وجود المادّة العازلة بين اللوحين.
- تُستخدَم المكثّفات في فصل التيّارات منخفضة التردّد عن تلك مرتفعة التردّد والمستخدمة في الأجهزة اللاسلكية، فهي تسمح بمرور التيّارات عالية التردّد وتقاوم مرور التيّارات المنخفضة التردّد.
- ويمكن بتطبيق قانوم أوم ايجاد مقدار الممانعة السعوية للمكثف بحيث تأخذ لكل من الجهد والتيار في أي لحظة من العلاقات التالية:

$$X_C = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{V_{rms\ C}}{i_{rms\ C}} = \frac{V_{max\ C}}{i_{max\ C}}$$

ومن خصائص المكثّف أنّه لا يحوّل أيّ جزء من الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية بل إلى طاقة كهربائية تختزن في المجال الكهربائي للمكثّف وتساوي: $U_E = \frac{1}{2} CV^2_{rms}$

مثال (3)

دائرة تيّار متردّد تحتوي على مكثّف $C = 400\mu F$ يمرّ فيها تيّار لحظي يتمثّل بالعلاقة التالية:
$i = 4 \sin 100\pi t$. حيث i(A) و t(S) أُحسب:
(أ) الممانعة السعوية للمكثّف.
(ب) فرق الجهد الفعّال على طرفي المكثّف.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.
المعلوم: السعة: $C = 400\mu F$
مقدار شدّة التيّار اللحظي: $i = 4 \sin 100\pi t$
غير المعلوم: الممانعة السعوية: X_C
فرق الجهد الفعّال على طرفي المكثّف

مثال (3) (تابع)

2. أُحسب غير المعلوم.

باستخدام المعادلة التالية:

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{400x\ 10^{-6}\ x\ 100\pi} = (7.96)\ \Omega$$

وبحساب شدّة التيّار الفعّال:

$$i_{rms} = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{4}{\sqrt{2}} = (2.82)\ A$$

وبالتعويض عن القيم المعلومة نجد أنّ:

$$V_{rms} = i_{rms}\ X_C = 2.82\ x7.96 = (22.5)\ V$$

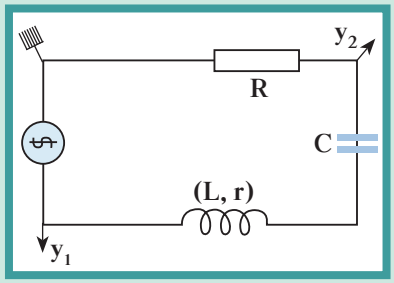
3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة.

4.2 تطبيق قانون أوم على دائرة تيّار متردّد تحتوي على مقاومة أومية، وملفّ حثّي نقي، ومكثّف متّصلة معًا على التوالي

Application of Ohm's Law in an RLC Circuit

دائرة التوالي المبيّنة في الشكل (53) تحتوي على مقاومة أومية R، وملفّ حثّي نقي معامل حثّه الذاتي L، ومكثّف سعته الكهربائية C متّصلة معًا على التوالي، ومصدر جهد تيّار متردّد ترددّه f.

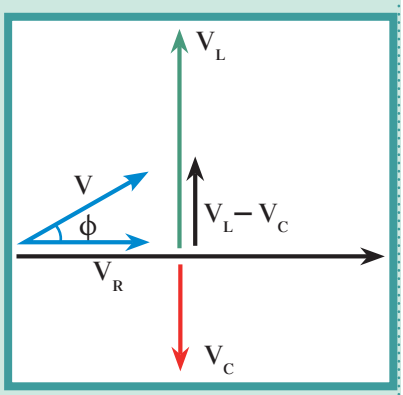


(شكل 53)

إنّ السؤال المطروح في هذه الحالة: هل الجهد الكلّي يساوي المجموع العددي لجهود العناصر الثلاثة؟ وهل المقاومة الكلّية Z لدائرة التوالي المؤلّفة من تلك العناصر الثلاثة يساوي المجموع العددي لمقاومة كلّ منها؟

في ما سبق، مثّلنا اتّجاهيًّا زاوية الطور، وفرق الجهد، والتيّار لكلّ من المقاومة والملفّ والمكثّف كما يلي:

- فرق الجهد والتيّار متّفقا الطور في المقاومة الأومية.
- فرق الجهد يسبق التيّار بزاوية طور $\frac{\pi}{2}$ في الملفّ الحثّي النقي.
- فرق الجهد يتأخّر عن التيّار بزاوية طور $\frac{\pi}{2}$ في المكثّف.



(شكل 54)

يبيّن الشكل (54) أنّ جمع الجهود الكلّي للعناصر الثلاثة هو جمع اتّجاهي وليس جمعًا عدديًّا لانّها مختلفة في زوايا الطور. وعليه نستنتج أنّ:

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$$

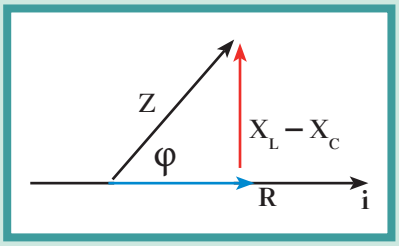
وبما أنّ التيّار هو نفسه في دائرة التوالي، وبالتعويض عن قانون أوم في كلّ من المقاومة الأومية والملفّ الحثّي النقي والمكثّف، نحصل على:

$$iZ = \sqrt{i^2R^2 + (iX_L - iX_C)^2}$$

بحيث تمثّل Z المقاومة المكافئة للمقاومة الصرفة والممانعة الحثّية للملفّ والممانعة السعوية للمكثّف.

وباختزال شدّة التيّار من المعادلة نحصل على المقاومة الكلية Z على الشكل التالي:

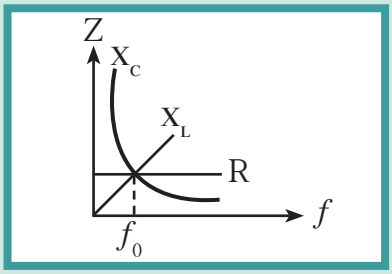
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$



(شكل 55)

وبالاعتماد على الشكل (55)، إنّ فرق الطور φ بين الجهد الكلّي وشدّة التيّار يُحسَب من المعادلة التالية :

$$\frac{v_L - v_C}{v_R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \tan\varphi$$



(شكل 56)

ويمكن بتطبيق قانون أوم إيجاد الممانعة الكلّية للدائرة بحيث تأخذ لكلّ من الجهد والتيّار القيم المتزامنة في أيّ لحظة من العلاقات التالية:

$$Z = \frac{v(t)_T}{i(t)_T} = \frac{V_{rms\ T}}{i_{rms\ T}} = \frac{V_{max\ T}}{i_{max\ T}}$$

مثال (4)

في دائرة توالٍ تحتوي على ملفّ نقي ممانعته الحثّية $X_L = (16)\Omega$، ومكثّف ممانعته السعوية $X_C = (6)\Omega$ ، ومقاومة أومية $R = (10)\Omega$ ومتّصلة على مصدر تيّار متردّد تردّده $f = (60)\text{Hz}$. أُحسب:

(أ) المقاومة الكليّة في الدائرة.

(ب) شدّة التيّار العظمى علمًا أنّ قيمة $V_{max} = (10)\text{V}$.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: الممانعة السعوية للمكثّف: $X_C = (16)\Omega$

الممانعة الحثّية للملفّ النقي: $X_L = (6)\Omega$

المقاومة الأومية: $R = (10)\Omega$

التردّد: $f = (60)\text{Hz}$

غير المعلوم: **(أ)** المقاومة الكلّية للدائرة: Z؟

(ب) شدّة التيّار العظمى: $i_{max} = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام المعادلة التالية: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

وبالتعويض عن القيم المعلومة، نجد أن:

$$Z = \sqrt{100 + (16-6)^2} = \sqrt{(200)} = (14.14)\Omega$$

مثال (4) (تابع)

(ب) $i_{max} = \frac{V_{max}}{Z} = \frac{10}{14.14} = (0.7)A$

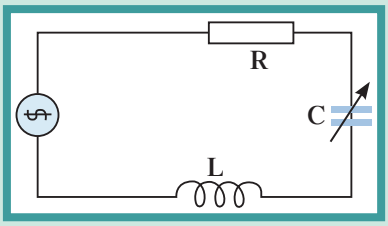
3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة.

3. دائرة الرنين الكهربائي

Resonance Circuit

لنأخذ الدائرة المؤلّفة من مقاومة أومية (R)، وملفّ حثّي نقي معامل حثّه الذاتي (L) ومكثّف متغيّر السعة (C) متّصلة على التوالي بمصدر تيّار متردّد يمكن التحكّم بتردّده f (شكل 57).

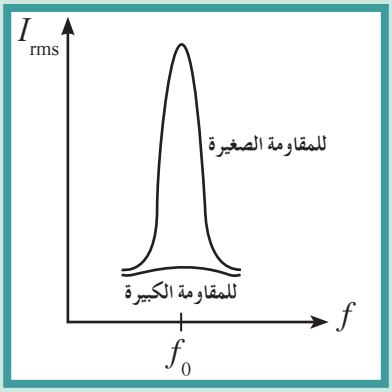


(شكل 57)

وبما أنّ ممانعة المكثّف تتناسب عكسيًّا مع تردّد التيّار وممانعة الملفّ تتناسب طرديًّا مع تردّد التيّار، فإنّ تغيّر تردّد المصدر إلى مقدار يُعرَف بتردّد الرنين يجعل كلّ من الممانعة الحثّية X_L مساوية للممانعة السعوية X_C، وبالتالي تصبح المقاومة الكليّة Z مساوية للمقاومة الأومية:

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

وبهذا تكون مقاومة الدائرة أقلّ ما يمكن وبالتالي يمرّ فيها أكبر شدّة تيّار كهربائي. وتُسمّى هذه الحالة بحالة الرنين الكهربائي.



(شكل 58)

الرنين الكهربائي هو حالة خاصّة لدائرة توالٍ تحتوي على ملفّ حثّي ومكثّفة ومقاومة أومية ومن خواصّه نذكر:

- الممانعة الحثّية X_L مساوية في المقدار للممانعة السعوية X_C ويلغي كلّ منهما الآخر.
- مقاومة الدائرة الكلّية Z تساوي مقدار المقاومة الأومية في الدائرة R وهي أقلّ مقاومة ممكنة، وحيث يمرّ بها أكبر شدّة تيّار.
- شدّة تيّار الرنين هي أكبر شدّة تيّار وتُحسب وفق المعادلة التالية: $I = \frac{V}{R}$ للقيم المختلفة للتيّار والجهد (شكل 58).
- الجهد الكلّي في الدائرة يساوي الجهد على المقاومة الأومية فحسب، والجهد والتيّار في الدائرة متّفقا الطور.
- يمكن استنتاج قيمة تردّد الرنين في حالة الرنين من التساوي بين الممانعة الحثّية والسعوية كما يلي:

$$X_L = X_C$$

$$\frac{1}{2\pi f C} = 2\pi f L$$

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0$$

مثال (5)

دائرة توالٍ مؤلّفة من مكثّف $C = (1)\mu F$، وملفّ تأثيري نقي له معامل حثّ ذاتي $L = (70)mH$، ومقاومة $R = (60)\Omega$ متّصلة بمصدر جهد متردد جهده الفعال $220V$.

(أ) أُحسب مقدار تردد الرنين للحصول على رنين كهربائي.

(ب) أُحسب الشدة الفعّالة للتيّار في حالة الرنين.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: $C = (1)\mu F$

$L = (70)mH$

$R = (60)\Omega$

$V = 220V$

غير المعلوم: تردّد الرنين ؟ $= f_0$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) باستخدام المعادلة التالية وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

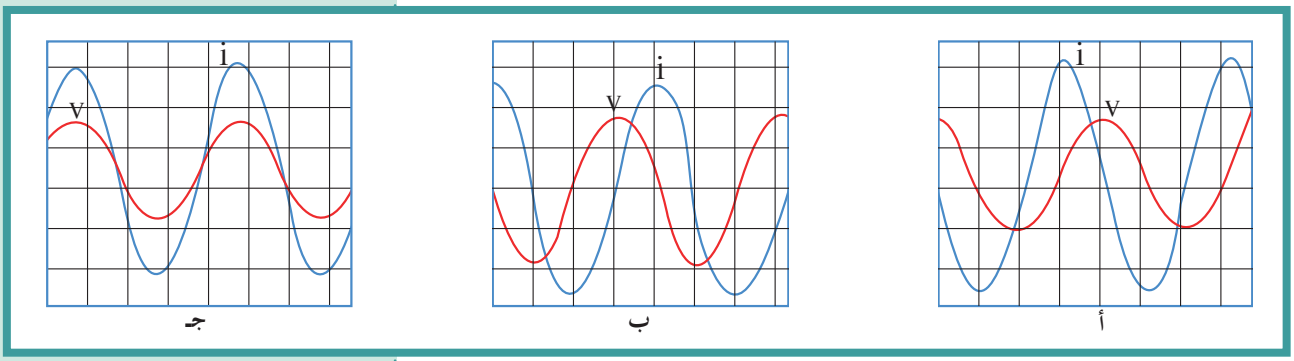
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{70 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-6}}} = (601.55)Hz.$$

(ب) $$I = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{220}{60} = 3.66A$$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطايات المسألة.

- عند تردّد أقلّ من تردّد الرنين يتأخر الجهد عن التيار في الدائرة (شكل 59 – أ).
- عند تردّد أكبر من تردّد الرنين يسبق الجهد التيار في الدائرة (شكل 59 – ب).
- عند تردّد الرنين الجهد والتيار متفقين في الطور (شكل 59 – جـ)



شكل 59

مراجعة الدرس 2-1

أوّلًا – أُكتب معادلة التيّار الكهربائي بدلالة الزمن.

ثانيًا – عرِّف الشدّة الفعّالة للتيّار المتردّد.

ثالثًا – ماذا يمثّل تردّد الرنين في دائرة توالي مؤلّفة من مقاومة أوميّة ومكثّف وملفّ؟ أُكتب العلاقة الرياضية التي تمثّلها.

رابعًا – إنّ القيمة العظمة لفرق الجهد المتردّد المطبَّق على مقاومة أومية صرفة $R = (10)\Omega$ هو $V_m = (8)V$

(أ) أُحسب مقدار فرق الجهد الفعّال للجهد المتردّد.

(ب) استنتج مقدار القيمة العظمى لشدّة التيّار المارّ في المقاومة.

خامسًا – دائرة توالٍ مؤلّفة من مكثّف C وملفّ تأثيري نقي له معامل حثّ ذاتي $L = (20)mH$ ومقاومة $R = (150)\Omega$ موصولة على مصدر جهد متردّد مقدار جهده الفعّال يساوي $(20)V$ وتردّده يساوي تردّد الرنين $f_0 = (796)Hz$. أُحسب:

(أ) مقدار سعة المكثّف في حالة الرنين الكهربائي.

(ب) المقدار الفعّال للتيّار الكهربائي في حالة الرنين الكهربائي.

مراجعة الوحدة الثانية

المفاهيم

التدفّق المغناطيسي	Magnetic Flux	تيّار متردّد	Alternating Current
حثّ ذاتي	Self–Induction	الجهد المتردّد	Alternating Voltage
الحثّ المتبادَل	Mutual Inductance	الحثّ الكهرومغناطيسي	Electromagnetic Induction
الرنين الكهربائي	Electric Resonance	راسم الإشارة	Oscilloscope
فرق الطور	Phase Difference	الشدّة الفعّالة للتيّار المتردّد	Effective Current
قوّة دافعة كهربائية	Electromotive Force	قلب حديدي	Iron Core
محرّكات	Motors	قوّة مغناطيسية	Magnetic Force
ملفّ	Coil	المحوّلات الكهربائية	Transformers
ملفّ ثانوي	Secondary Coil	ملفّ ابتدائي	Primary Coil
مولّدات كهربائية	Electric Generators		

الأفكار الرئيسة في الوحدة

- الحثّ الكهرومغناطيسي هو ظاهرة توليد القوّة الدافعة الكهربائية بالتأثير نتيجة تغيُّر المجال المغناطيسي.
- إنّ القوّة الدافعة الكهربائية المتولّدة في ملفّ تنشأ نتيجة حدوث تغير في التدفق المغناطيسي الذي يجتاز الملف.
- التدفّق المغناطيسي φ يمثّل عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق سطحًا ما في لفّة مساحتها A بشكل عمودي.
- شدّة المجال المغناطيسي B تمثّل عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق وحدة المساحات من السطح بشكل عمودي.
- يُقاس التدفّق المغناطيسي φ بحسب النظام الدولي للوَحدات بوَحدة تسلا متر مربّع والتي تُسمّى ويبر (Wb).
- ينصّ قانون لنز على أنّ «التيّار الكهربائي التأثيري المتولّد في ملف يسري باتجاه بحيث يولد مجالًا مغناطيسيًا يعاكس التغير في التدفق المغناطيسي المولد له.
- ينصّ قانون فاراداي على أنّ «القوّة الدافعة الكهربائية المولّدة في موصّل تساوي سالب معدّل تغيُّر التدفّق المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن».
- المولّد الكهربائي هو جهاز يحوّل جزءًا من الطاقة الميكانيكية المبذولة لتحريك الملف في المجال المغناطيسي إلى طاقة كهربائية.
- إنّ دوران ملفّ المولّد الكهربائي داخل المجال المغناطيسي المنتظم بسرعة دورانية منتظمة يولّد قوّة دافعة كهربائية حثّية تتغيّر جيبيًّا بالنسبة إلى الزمن.
- المحرّك الكهربائي جهاز يحوّل جزءًا من الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية في وجود مجال مغناطيسي بعد تزويده بتيّار كهربائي مناسب.

- يؤثّر المجال المغناطيسي في الشحنات الكهربائية المتحرّكة باتّجاه غير موازٍ لخطوط مجاله وبقوّة مغناطيسية تُسمّى «قوّة حارفة».
- إنّ تغيّر التدفّق المغناطيسي الذي يجتاز الملفّ زيادة أو نقصانًا نتيجة تغيّر التيار المار فيه يؤدي إلى توليد قوة محركة تأثيرية في الملف وهذا ما ندعوه بالحث الذاتي.
- الحثّ المتبادَل هو التأثير الكهرومغناطيسي الذي يحدث بين ملفّين متجاورين أو متداخلين بحيث التغيير في شدّة التيّار المارّ في الملفّ الابتدائي يؤدّي إلى تولُّد قوّة دافعة كهربائية في دائرة الملفّ الثانوي الذي يعمل على مقاومة هذا التغيير.
- المحوّل الكهربائي هو جهاز يعمل على رفع أو خفض القوّة الدافعة الكهربائية المتردّدة الناشئة عن مصدر جهد كهربائي متردّد من دون أن يُحدِث أيّ تعديل على مقدار التردّد.
- التيّار المتردّد هو تيّار يتغيّر اتّجاهه كلّ نصف دورة وإنّ معدّل مقدار شدّته يساوي صفرًا في الدورة الواحدة.
- إنّ الشدّة الفعّالة للتيّار المتردّد i هي مقدار التيّار المستمرّ الذي لو مرّ في مقاومة محدَّدة لأنتج تأثيرًا حراريًّا مساويًا للتأثير الحراري الذي ينتجه التيّار المتردّد في المقاومة نفسها وفي خلال الفترة الزمنية نفسها.
- في حالة الرنين الكهربائي يكون فرق الطور بين التيّار الكهربائي والجهد الكهربائي المتردّد المطبَّق على دائرة توالي مؤلّفة من ملفّ ومقاومة أومّية ومكثّف مساويًا لصفر، وتكون شدّة التيّار الكهربائي i في الدائرة الكهربائية لها أكبر قيمة.
- إنّ فرق الجهد المتردّد بين طرفي المقاومة الصرفة متّفق في الطور مع شدّة التيّار الكهربائي.
- إنّ فرق الجهد المتردد بين طرفي الملف النقي يتقدم على شدة التيار الكهربائي بزاوية فرق طور تساوي (90°).
- إنّ شدة التيار المتردد بين طرفي المكثف يتقدم على فرق الجهد بزاوية فرق طور تساوي (90°).

خريطة مفاهيم الوحدة

إستخدم المصطلحات الموضَّحة في الشكل التالي لرسم خريطة مفاهيم تنظِّم الأفكار التي احتوتها الوحدة.

تحقق من فهمك

ضع علامة (✓) في المربّع الواقع أمام الإجابة الأنسب في كلّ ممّا يلي:

1. تتولّد القوّة الدافعة الكهربائية بالتأثير في ملفّ نتيجة:
   - ☐ تدفّق مغناطيسي منتظم في اللفّات.
   - ☐ تغيُّر في المجال المغناطيسي المؤثّر على الملفّ.
   - ☐ اختراق خطوط مجال مغناطيسي منتظم لفّات الملفّ.
   - ☐ مرور خطوط مجال مغناطيسي منتظم موازية لمحور الملفّ.
2. إنّ التدفّق المغناطيسي في ملفّ:
   - ☐ يتناسب طرديًّا مع المجال الكهربائي.
   - ☐ يتناسب طرديًّا مع مساحة لفّات الملفّ.
   - ☐ يتناسب عكسيًّا مع مساحة لفّات الملفّ.
   - ☐ يتناسب عكسيًّا مع المجال الكهربائي.
3. إنّ التدفّق المغناطيسي في ملفّ مؤلّف من (100) لفّة مساحة كلّ منها $(0.01)m^2$ موضوعة في مجال مغناطيسي (0.1)T خطوطه موازية لمستوى اللفّات يساوي:
   - ☐ (0.1)Wb
   - ☐ (0)Wb
   - ☐ (1)Wb
   - ☐ (3.14)Wb
4. إنّ القوّة المغناطيسية المؤثّرة على شحنة مقدارها (2)C تتحرّك بسرعة منتظمة (2)m/s باتّجاه يوازي خطوط المجال المغناطيسي شدّته (0.2)T تساوي:
   - ☐ (0)N
   - ☐ (0.4)N
   - ☐ (0.8)N
   - ☐ (4)N
5. إنّ القوّة المغناطيسية المؤثّرة على شحنة مقدارها (2)C تتحرّك بسرعة منتظمة (2)m/s باتجّاه عمودي على خطوط مجال مغناطيسي شدّته (0.2)T تساوي:
   - ☐ (0)N
   - ☐ (0.4)N
   - ☐ (0.8)N
   - ☐ (4)N
6. إنّ القوّة الكهرومغناطيسية المؤثّرة في سلك مستقيم طوله (0.5)m، يسري فيه تيّار مستمرّ (1)A وموضوع في مجال مغناطيسي يصنع زاوية (90°) مع السلك ومقداره (0.1)T تساوي:
   - ☐ (0.05)N
   - ☐ (0)N
   - ☐ (5)N
   - ☐ (0.5)N

7. محوّل كهربائي مثالي يزوّد جهازًا بجهد مقداره 50)V(، ملفّه الابتدائي مؤلّف من (100) لفّة وملفّه الثانوي من (500) لفّة. إنّ جهد المدخل على المحوّل يساوي:
   - ☐ (10)V
   - ☐ (250)V
   - ☐ (0.1)V
   - ☐ (25)V
8. إنّ فرق الطور بين شدّة التيّار المتردّد وفرق الجهد للمصدر في دائرة مكوّنة من مقاومتين أوميّتين على التوالي:
   - ☐ يساوي صفرًا.
   - ☐ فرق الجهد للمصدر يسبق التيّار بزاوية (°90).
   - ☐ التيّار يسبق الجهد بزاوية (°90).
   - ☐ التيّار يسبق الجهد بزاوية أصغر من (°90).
9. دائرة تيّار متردّد مؤلّفة من مقاومة أوميّة وملفّ ومكثّف، متّصلة معًا على التوالي. إذا كان التيّار يتقدّم على الجهد فإنّ لهذه الدائرة:
   - ☐ خواصّ دائرة الملفّ.
   - ☐ خواصّ دائرة مكثّف.
   - ☐ خواصّ دائرة مقاومة.
   - ☐ خواصّ متغيّرة تحدَّد تجريبيًّا.
10. دائرة تيّار متردّد مؤلّفة من مقاومة أوميّة وملفّ ومكثّف، متّصلة معًا على التوالي. إذا كان الجهد يتقدّم على التيّار الكهربائي في الدائرة فإنّ لهذه الدائرة:
    - ☐ خواصّ دائرة ملفّ.
    - ☐ خواصّ دائرة مكثّف.
    - ☐ خواصّ دائرة مقاومة.
    - ☐ خواصّ متغيّرة تحدَّد تجريبيًّا.

تحقق من معلوماتك

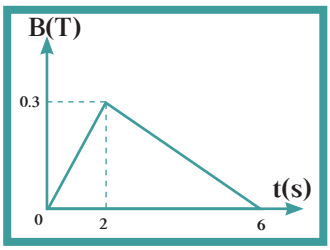
1. أُذكر نصّ قانون لنز حول اتّجاه التيّار الحثّي في لفّة مغلقة.
2. ما أهمّية أن يتمّ لفّ الملفّ الابتدائي والثانوي للمحوّل الكهربائي على قطعة الحديد نفسها؟
3. ما العلاقة بين القوّة الدافعة الكهربائية المولّدة في ملفّ بالتأثير وعدد لفّات الملفّ؟
4. اِشرح باختصار طريقة عمل المحوّل الكهربائي.
5. عند توقيف محرّك جهاز عن الدوران بطريقة قسرية نلاحظ ارتفاع درجة حرارته نتيجة ارتفاع شدّة التيّار في ملفّه. فسِّر سبب زيادة شدّة التيّار في ملفّه.
6. اِشرح سبب عدم إمكانية استخدام المحوّلات لرفع الجهد للتيّار المستمرّ أو خفضه.
7. اِشرح كيف تساهم المحوّلات الكهربائية بخفض الخسارة في الطاقة الكهربائية أثناء نقلها من معامل التوليد إلى المستهلكين.

تحقق من مهاراتك

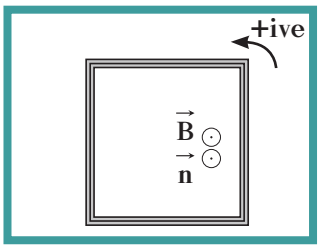
1. حلقة دائرية الشكل نصف قطرها (10)cm موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (0.2) T عمودي على مستواها.
(أ) أُحسب التغيّر في مقدار التدفّق المغناطيسي في حال دوران مستوى اللفّة بزاوية (90°) مع خطوط المجال المخترق للسطح.
(ب) إنّ دوران مستوى اللفّة احتاج إلى (0.1)s. أُحسب القوّة الدافعة الكهربائية الناتجة عن دوران مستوى اللفّة.

2. إنّ جهاز تشغيل الأقراص المدمَجة يحتاج إلى (22)V ليعمل. ولتشغيل الجهاز على مصدر جهد المنزل والذي يساوي (220)V، يُستخدَم محوّل كهربائي مثالي عدد لفّات ملفّه الابتدائي (500) لفّة وعدد لفّات ملفّه الثانوي N. أُحسب:
(أ) عدد لفّات الملفّ الثانوي N.
(ب) شدّة التيّار في مقاومة أوميّة $R = (2200)\Omega$ في الملفّ الثانوي.
(جـ) القدرة الكهربائية التي يستهلكها جهاز تشغيل الأقراص المدمَجة.

3. ملفّ مستطيل الشكل مؤلّف من (100) لفّة مساحة كلّ لفّة $(200)cm^2$ موضوع في مجال مغناطيسي عمودي على مستوى اللفّات يتغيّر بحسب الرسم البياني في الشكل (60 – أ).
اِستخدم الاتّجاه الموجَب بعكس عقارب الساعة في الشكل (60 – ب).



(شكل 60– أ)

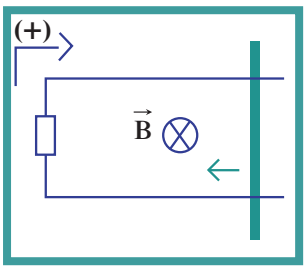


(شكل 60– ب)

أُحسب:
(أ) مقدار القوّة الدافعة الحثّية في الملفّ في كلّ مرحلة.
(ب) مقدار شدّة التيّار الحثّي في الملفّ في كلّ مرحلة إذا كانت المقاومة في الدائرة المغلقة ثابتة وتساوي
$R = (10)\Omega$.

4. ملفّ محرّك كهربائي مربّع الشكل طول ضلعه (25)cm ومؤلّف من (200) لفّة موضوع في مجال مغناطيسي منتظم شدّته (0.1)T. أُحسب مقدار عزم الازدواج على الملفّ إذا مرّ فيه تيّار شدّته (4)mA علمًا أنّ اتّجاه المجال يصنع زاوية تساوي (90°) مع العمود المقام على مستوى الملفّ.

5. يبيّن الشكل (61) سلكًا موصّلًا طوله (1)m يتحرّك على دائرة مغلقة بمقاومة ثابتة $R = (5)\Omega$ من جهة واحدة، تتعرّض لمجال مغناطيسي منتظم عمودي على مستوى السكّة مقداره (0.6)T، ويمثَّل اتّجاهه بالعلامة (X) أي إلى داخل الصفحة. سُحب السلك نحو الجهة المغلقة بسرعة منتظمة تساوي (4)m/s. إنّ الاتّجاه الموجَب الاختيّاري مبيّن في الشكل.



(شكل 61)

(أ) أُحسب مقدار القوّة الدافعة الكهربائية الحثّية.
(ب) أُحسب شدّة التيّار الكهربائي الحثّي.
(جـ) اِستخدم قانون لنز لتبيّن اتّجاه التيّار.
(د) قارِن اتّجاه التيّار بما توصّلت إليه باستخدام قانون فاراداي.
(هـ) أُحسب القوّة الكهرومغناطيسية المولّدة في السلك نتيجة مرور التيّار الحثّي.
(و) اِستنتج القدرة الميكانيكية للقوّة الكهرومغناطيسية.
(ز) قارِن مقدار القدرة الميكانيكية للقوّة الكهرومغناطيسية والقدرة الكهربائية المولّدة من حركة السلك.

6. سلك مستقيم طوله (80)cm موضوع في مجال مغناطيسي مقداره (0.6)T ويسري فيه تيّار كهربائي مقداره $i = (1)A$.
أُحسب مقدار القوّة الكهرومغناطيسية المؤثّرة في السلك علمًا أنّ اتّجاه خطوط المجال المغناطيسي تصنع زاوية (60°) على اتّجاه سريان التيّار في السلك.

7. **(أ)** أُحسب القوّة المغناطيسية التي يؤثّر فيها مجال مغناطيسي شدّته (0.2)T، عمودي على الورقة إلى الخارج، على بروتون شحنته $q = (1.6 \times 10^{-19})C$ يتحرّك بسرعة أفقية متعامدة مع اتّجاه المجال المغناطيسي ومقدارها $(2 \times 10^{7})m/s$.
(ب) صِف شكل مسار البروتون في المجال المغناطيسي بإهمال وزن البروتون.

8. يتغيّر التيّار الكهربائي في الملفّ الابتدائي لمحوّل كهربائي من (10)A إلى (20)A خلال (0.02)s.
أُحسب القوّة الدافعة الكهربائية الناتجة عن الحثّ المتبادَل بين ملفّي المحوّل علمًا أنّ معامل الحثّ المتبادَل يساوي (0.5)H.

9. دائرة توالي مؤلّفة من مكثّف $C = (2)\mu F$ وملفّ تأثيري نقي له معامل حثّ ذاتي $L = (120)mH$ ومقاومة $R = (50)\Omega$ متّصلة بمصدر جهد متردّد يمكن تعديل تردّده والقيمة العظمى للجهد (311)V. أُحسب:
(أ) مقدار تردّد الرنين التي إذا ما استُعمِلت لمصدر الجهد نحصل على حالة رنين كهربائي في الدائرة.
(ب) القيمة العظمى لشدة التيار.

10. تيّار متردّد يتمثّل بمعادلة الشدّة اللحظية للتيار التالية: $i(t) = 2\sqrt{2}\sin(120\pi t)$. أُحسب:
(أ) مقدار الشدّة الفعّالة للتيّار.
(ب) الزمن الدوري للتيّار المتردّد.
(جـ) تردّد التيّار.

11. دائرة تيّار متردّد تتكوّن من مصدر تيّار متردّد جهده الفعّال (220)V وتردّده $(200/\pi)$ Hz يتّصل على التوالي بمكثّف سعته (50)μF وملفّ حثّي نقي معامل تأثيره الذاتي (100)mH، أُحسب:
(أ) المقاومة الكلّية للدائرة.
(ب) شدّة التيّار الفعالة المارّة بالدائرة.
(جـ) فرق الجهد الفعّال بين لوحي المكثّف.
(د) كم تساوي سعة المكثّف الذي يوضع بدلًا من المكثف الأول والذي يجعل الدائرة في حالة رنين مع التيّار المتردّد المغذّي لها.

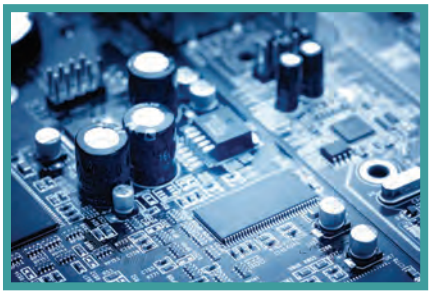
12. دائرة تيّار متردّد تتكوّن من مقاومة صرفة مقدارها (100)Ω وملفّ حثّي نقي معامل تأثيره الذاتي (0.5)H ومكثّف سعته (14)μF ومصدر تيّار متردّد جهده الفعّال ثابت ويساوي (100)V ويمكن التحكّم في (تغيير) تردّده، أُحسب:
(أ) تردّد التيّار لكي تصبح ممانعة المكثّف مساوية لممانعة الملفّ الحثّي.
(ب) شدّة التيّار الفعالة في الدائرة وفرق الجهد الفعال بين كلّ عنصر من عناصرها الثلاث في حالة الرنين.

التواصل

أُكتب مقالًا لا يزيد عن عشرة أسطر تبيّن فيه دور الملف الحثّي في الأجهزة الإلكترونية.
حدِّد في مقالك بعض التطبيقات الحديثة للملف الحثّي.

نشاط بحثي

أجرِ بحثًا تبيّن فيه كيفية عمل الجيتار الكهربائي. أشر في بحثك إلى وحدة الصوت المؤلّفة من ملفّ حول مغناطيس دائم، وإلى دور اهتزار الأوتار في الحثّ الكهرومغناطيسي.
ضمِّن بحثك بعض الشروط الواجب توفّرها في أسلاك الجيتار الكهربائي وسبب اختلافها عن الجيتار الكلاسيكي.



درسنا سابقًا أنّ الموصّلات لها مقاومة كهربائية صغيرة، وتُستخدَم لتوصيل التيّار في الدوائر الكهربائية، بالاعتماد على الإلكترونات الحرّة. ودرسنا أيضًا أنّ بعض الموادّ الأخرى عازلة لا تصلح لتوصيل التيّار الكهربائي.
في هذه الوحدة، سنتعرّف أشباه الموصّلات التي تُعتبَر المكوّن الأساسي للإلكترونيات التي أصبحت اليوم قاعدة التكنولوجيا. فالأجزاء الإلكترونية تدخل تقريبًا في تركيب المنتجات التكنولوجية كلّها كالآلات الحاسبة، والهواتف، والآلات الطابعة، والأدوات الطبّية، والسيارات، والألعاب، وأجهزة التحكّم والقياس والأقمار الاصطناعية... وكلّ ذلك بفضل دراسة الإنسان خواصّ الشحنات الكهربائية السالبة المسمّاة الإلكترونات.

فصول الوحدة

الفصل الأوّل

أهداف الوحدة

- **معالم الوحدة**

اكتشف بنفسك: وظائف بعض الأجزاء الإلكترونية

اكتشف بنفسك

وظائف بعض الأجزاء الإلكترونية

الآلة الحاسبة على أنواعها شائعة جدًّا. تتألّف الآلة الحاسبة من لوحة إدخال الأرقام ولوحة العرض، التي تختلف تقنيتها من نوع إلى آخر، فمنها ما يعتمد على تحويل قطبية الضوء ومنها ما يعتمد على وصلات ثنائية باعثة للضوء LED. أمّا لوحة العرض القديمة فكانت تعتمد على مصابيح نيون صغيرة. وداخل الآلة الحاسبة معالج المعلومات الذي يتحكّم بالعمليات الحسابية، وعدد من الوصلات الثنائية والترانزستورات التي تنقل المعلومات من لوحة الإدخال إلى المعالج ثمّ إلى لوحة العرض. ولبعض الآلات الحاسبة خلايا ضوئية Photocells تحوّل الضوء إلى طاقة كهربائية فتغذيها بالكهرباء في حالة فرغت البطاريّة. وتُصنَع الوصلات الثنائية والترانزستورات في الآلات الحاسبة الحديثة بشكل أساسيّ من مادّتيّ السيليكون والجرمانيوم اللّتين هما من أشباه الموصّلات. ومع أنّ مادّة السيليكون هي الأكثر استخدامًا نظرًا إلى ثمنها الزهيد وخصائصها، إلّا أنّ الجرمانيوم لا يمكن الاستغناء عنه في الوصلات الثنائية وبعض أنواع الترانزستورات.

أجب عن الأسئلة التالية بالعودة إلى النصّ أعلاه:

1. اذكر بعض أسماء القطع الإلكترونية المكوِّنة للآلة الحاسبة.
2. كيف تدخل أشباه الموصّلات في تكوين الآلة الحاسبة الحديثة؟
3. ما هي الموادّ التي تُعتبَر أشباه موصّلات؟ وما هي أكثرها استخدامًا؟
4. هل يمكن استخدام الموادّ شبه الموصّلة في صناعة أجزاء إلكترونية باعثة للضوء؟ وأجزاء مولّدة للكهرباء؟ وأجزاء متحكّمة بالمعلومات؟ أعطِ أمثلة من النصّ.

دروس الفصل
الدرس الأوّل
الوصلة الثنائية
الدرس الثاني
الترانزستور

(شكل 62)

كيف يمكن أن نحوّل التيّار الكهربائي المتردّد إلى تيّار ذي اتّجاه واحد؟ كيف يضخّم مكبّر الصوت الإشارة الكهربائية الحاملة لذبذبات الصوت؟ لا يمكن أن يحصل ذلك لولا الأجزاء الإلكترونية التي تتحكّم باتّجاه التيّار الكهربائي، وبشدّته، وجهد الإشارة الكهربائية. سنتعرّف، في سياق هذا الفصل، المكوّنات الإلكترونية التي تقوم بذلك، وسنتعلّم بنيتها الداخلية وتركيبها الذرّي والكيميائي. ولا نستطيع أن نغفل أنّ الوصلة الثنائية والترانزستور، اللذين سندرسهما في الدرسين القادمين، لا يشكّلان، على الرغم من أهمّيتهما، سوى جزء بسيط من الوحدات الإلكترونية العديدة كالليزر الصلب Solid Laser والوصلات الثنائية المصدّرة للضوء LED والبوّابة الإلكترونية والدوائر المجمّعة Integrated Circuits (IC) الصغيرة الحجم، التي قد تحتوي على مئات الوحدات الإلكترونية، بالإضافة إلى المكثّفات والمقاومات Resistors ووحدات الذاكرة الرقمية وغيرها (الشكل 62).

الدرس 1-1

الوصلة الثنائية
Diode

الأهداف العامة

- يقارن بين الموصلات والعوازل وأشباه الموصلات.
- يصف المادة الشبه موصلة.
- يبيّن أهمية المواد شبه الموصلة في التوصيل.
- يقارن بين شبه الموصل من النوع السالب N وشبه الموصل من النوع الموجب P.
- يصف تركيب الوصلة الثنائية.
- يصف طرق توصيل الوصلة الثنائية.
- يجري تجربة تقويم التيار باستخدام وصلة ثنائية.
- يذكر بعض استخدامات الوصلة الثنائية.

(شكل 63)
صمّام ثنائي باعث للضوء

درسنا سابقًا أنّ بعض الموادّ تكون موصّلات جيّدة للتيّار الكهربائي، أي أنّ لها مقاومة صغيرة كالنحاس والألمنيوم والفضّة والحديد فيما تكون موادّ أخرى عازلة، أي أنّها تملك مقاومة كبيرة كالبلاستيك والسيراميك والخشب. أمّا في هذا الدرس فسنتعرّف أشباه الموصّلات وهي موادّ موصّلة للكهرباء، ذات مقاومة معتدلة، أي قادرة على توصيل الكهرباء، ولكن بدرجة أقلّ من الموصّلات العادية.

1. التوصيل وأشباه الموصّلات
Conduction and Semi-conductors

لكي نفهم كيفية توصيل الموادّ الصلبة للكهرباء، علينا أوّلًا أن نلقي نظرة على توزّع الإلكترونات داخل الذرّات. لنأخذ مثلًا ذرّة الكالسيوم Ca_{20} التي تحتوي على عشرين بروتونًا موجَب الشحنة داخل النواة، ويحيط بها عشرون إلكترونًا موزّعًا على مستويات من الطاقة (أغلفة الإلكترونات) كما يلي:

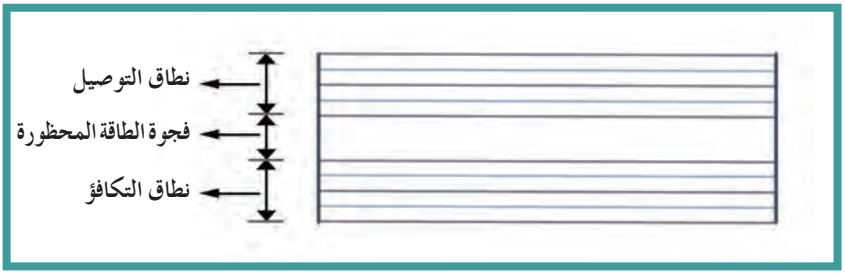
نجد في مستوى الطاقة الأوّل إلكترونين $1s^2$ ، وفي مستوى الطاقة الثاني (8) إلكترونات $2s^2 2p^6$ ، وفي مستوى الطاقة الثالث (8) إلكترونات $3s^2 3p^6$ ، وفي مستوى الطاقة الخارجي إلكترونين $4s^2$ (شكل 64).

تكون إلكترونات مستويات الطاقة الداخلية للذرّة مرتبطة بالنواة، أمّا إلكترونات المستوى الأخير فتكون أقلّ ارتباطًا بالنواة.

إنّ تماسك الذرّات لتشكيل بلّورات Crystals هو نتيجة للروابط الكيميائية بين تلك الذرّات، لأنّ إلكترونات المستوى الخارجي لذرّة ما تقوم بتشكيل مدارات جزيئية بالتشارك مع إلكترونات الذرّات المجاورة. ترتبط إذًا الذرّات نتيجة التفاعل الكهربائي بين الإلكترونات المشتركة والنواة. ويؤدّي تواجد إلكترونات المستوى الخارجي في مدارات جزيئية مشتركة إلى تكوّن نطاق تجمع مستويات متقاربة من الطاقة تُسمّى نطاق التكافؤ Valence Band.

قد تكتسب بعض الإلكترونات طاقة إضافية من مصادر حرارية أو إشعاعية فتقفز إلى مستويات طاقة أعلى. وتتداخل تلك المستويات لتشكّل نطاق التوصيل Conduction Band.

ولكي يقفز الإلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، يجب أن يكتسب طاقة تساوي الفرق بين طاقة نطاق التوصيل وطاقة نطاق التكافؤ، وهي ما يُعرَف بطاقة الفجوة المحظورة Forbidden Energy Gap (شكل 65).



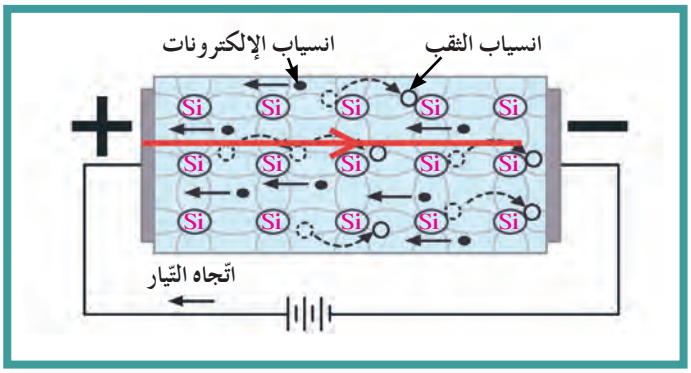
(شكل 65)

تتحرّك الإلكترونات التي تقفز من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل بحرّية داخل المادّة الصلبة وتكون مسؤولة عن توصيل الكهرباء، كما أنّ كلّ إلكترون يقفز من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل يترك مكانه فراغًا يُسمّى ثقبًا. ويؤدّي الثقب في نطاق التكافؤ دور شحنة كهربائية موجَبة (معاكسة لشحنة الإلكترون).

بالتالي، يمرّ التيّار الكهربائي عند تسليط جهد كهربائي على طرفي الموصّل، مُنتجًا مجالًا كهربائيًّا. عندها تنساب الإلكترونات الحرّة في اتّجاه معاكس للمجال الكهربائي، ويسير الثقب في اتّجاه المجال الكهربائي، الأمر الذي يولّد تيّارًا كهربائيًّا (اصطلاحي) في الاتّجاه المعاكس لانسياب الإلكترونات (شكل 66).

(شكل 64)

$_{20}Ca: 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$



(شكل 66)

في الموادّ الموصّلة للكهرباء يكون نطاق التوصيل متّصلًا بنطاق التكافؤ أي أن فجوة الطاقة المحظورة تنعدم .

لذلك، فإنّ ارتفاع درجة حرارة الموصّل فوق الصفر المطلَق بقليل (صفر درجة على مقياس كالفن) يؤدّي إلى اكتساب الكثير من الإلكترونات طاقة كافية لتنتقل من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل.

وفي الموادّ العازلة، يتراوح اتّساع نطاق الطاقة المحظورة بين 4eV) و12eV)، وهي طاقة عالية جدًّا بالنسبة إلى الإلكترون لكي يقفز من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل عند درجة الحرارة العادية.

أمّا في أشباه الموصّلات، فإنّ اتّساع فجوة الطاقة المحظورة أكبر من صفر وأقل من 4eV)، وهي طاقة معتدلة بحيث يتمكّن عدد قليل من الإلكترونات من اكتساب طاقة للقفز من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل عند درجة حرارة الغرفة.

(شكل 67)

عندما تنتقل إلكترونات المادّة نفسها إلى نطاق التوصيل، يُسمّى شبه الموصّل شبه الموصّل النقي Intrinsic.

اتساع فجوة الطاقة المحظورة في		
المواد الموصلة	المواد شبه الموصلة	المواد العازلة
منعدم (صفر) تقريبًا	أكبر من صفر وأقل من 4 eV	يتراوح بين 4 eV و 12 eV

جدول (1)

يساهم كلّ من الإلكترون والثقب في مرور التيّار الكهربائي في المادّة شبه الموصّلة، فالثقب يتحرّك مع المجال الكهربائي الناتج عن تسليط جهد على شبه الموصّل، بينما يتحرّك الإلكترون عكسه. ومع ارتفاع درجة حرارة شبه الموصّل، يكتسب المزيد من الإلكترونات طاقة كافية للقفز إلى نطاق التوصيل، تاركةً مكانها مزيدًا من الثقوب، فتزداد درجة توصيل المادّة وتقلّ مقاومتها.

يساوي عدد حاملات الشحنة في شبه الموصّل النقي $n_i + p_i$ العدد الكلي لحاملات الشحنة، حيث إنّ n_i هو عدد إلكترونات شبه الموصّل التي تقفز من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل وp_i هو عدد الثقوب الناتجة عن قفز الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل.

مثال (1)

يبلغ عدد الثقوب في قطعة من السيليكون $(1.2 \times 10^{10})/cm^3$ ثقبًا عند درجة الحرارة العادية (300)K واتّساع فجوة الطاقة المحظورة (1.1)eV.

(أ) ما هو العدد الكلّي لحاملات الشحنة الكهربائية في cm^3 التي تساهم في تكوين التيّار الكهربائي؟

(ب) كيف تُصنَّف هذه المادّة من ناحية التوصيل الكهربائي؟

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلِّل:** أذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: عدد الثقوب: $(1.2 \times 10^{10})/cm^3$

اتّساع فجوة الطاقة: (1.1)eV

غير المعلوم: **(أ)** عدد حاملات الشحنة

(ب) تصنيف مادّة السيليكون

2. **أُحسب غير المعلوم.**

(أ) عدد حاملات الشحنة:

$$n_i + p_i = 1.2 \times 10^{10} + 1.2 \times 10^{10} = (2.4 \times 10^{10})/cm^3$$

(ب) نوع المادّة شبه موصّل لأنّ فجوة الطاقة بحدود (1)eV.

3. **قيِّم:** هل النتيجة مقبولة؟

النتيجة مقبولة لأنّ فجوة الطاقة المحظورة 1.1 eV وهذا يقع ضمن حدود المواد شبه الموصلة التي تتراوح بين أكبر من صفر وأقل من 4 eV.

(شكل 68)

فقرة إثرائية

مقارنة حاملات الشحنة في الموصّلات وأشباه الموصّلات

إنّ عدد إلكترونات التوصيل n وعدد ثقوب التوصيل p في المتر المكعّب تعتمد أساسًا على درجة الحرارة المحيطة ونوع المادّة وطاقة تأيّنها، فعدد الإلكترونات الحرّة لكلّ متر مكعّب للسيليكون، والذي يساوي عدد الثقوب، يساوي حوالى 1.5×10^{16}.

أمّا بالنسبة للجرمانيوم، فإنّ عدد الإلكترونات الحرّة والمساوية لعدد الثقوب يساوي 1.3×10^{19}، بينما عدد الإلكترونات الحرّة في المادّة الموصّلة، مثل النحاس، فيساوي 7.8×10^{28}.

وعليه، يمكن أن نستنتج أنّ عدد حاملات الشحنة في الموصّلات أكبر بمليارات المرّات عمّا هو عليه في أشباه الموصّلات.

2. أشباه الموصّلات المطعّمة
Gating Semi–conductors

إنّ أشباه الموصّلات كالسيليكون Si والجرمانيوم Ge هي عناصر رباعية التكافؤ، أي أنّ مستوى طاقتها الخارجي يحتوي على أربعة إلكترونات. لذلك، تنشئ روابط تساهمية مع الذرّات المجاورة في البلّورة كما في الشكل (69). إنّ تطعيم البلّورة بعناصر أخرى لها عدد مختلف من الإلكترونات في غلافها الخارجي يساهم في زيادة مقدرة المادّة شبه الموصّلة على التوصيل الكهربائي. وينتج عن التطعيم نوعان من أشباه الموصّلات:

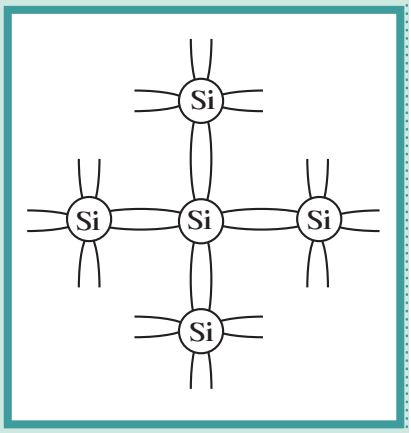
1.2 شبه الموصّل من النوع السالب N–type

إنّ تطعيم المادّة شبه الموصّلة كالسيليكون عن طريق إضافة ذرّات من عناصر المجموعة الخامسة من الجدول الدوري إلى البلّورة، كذرّات الزرنيخ As مثلًا، التي تملك خمسة إلكترونات تكافئية في غلافها الخارجي، يجعل أربعة إلكترونات منها تنشئ روابط تساهمية مع ذرّات السيليكون المحيطة، بينما يبقى الإلكترون الخامس حرًّا ويتمكّن بسهولة من القفز إلى نطاق التوصيل. تُسمّى مادّة الزرنيخ مادّة مانحة Donor. وتمنح كل ذرّة زرنيخ البلّورة إلكترونًا حرًّا، لذلك يساوي عدد حاملات الشحنة في شبه الموصّل من النوع السالب $N_d + n_i + p_i$، حيث إنّ N_d هو عدد الإلكترونات الحرة ويساوي عدد ذرّات المانح الذي هو الزرنيخ في هذه الحالة. وتكون الإلكترونات في شبه الموصّل حاملات الشحنة الأكثرية Majority Carriers، وتكون الثقوب حاملات الشحنة الأقلية Minority Carriers.

يُسمّى شبه الموصّل الذي نحصل عليه في هذه الحالة شبه الموصّل من النوع السالب.

2.2 شبه الموصّل من النوع الموجَب P–type

إنّ تطعيم بلّورة السيليكون بذرّات من المجموعة الثالثة من الجدول الدوري كذرّات البورون B مثلًا، التي تملك ثلاثة إلكترونات في مستوى طاقتها الخارجي، يؤدّي إلى نشوء روابط تساهمية بين تلك الإلكترونات وإلكترونات السيليكون المحيطة، ويبقى إلكترون واحد في إحدى ذرّات السيليكون المحيطة لينشئ مع ذرّة البورون رابطة تساهمية ناقصة (لأنّ الرابطة التساهمية تحتاج إلى إلكترونين). يُسمّى هذا الإلكترون الناقص ثقبًا Hole، وتُسمّى ذرة البورون ذرة متقبلة Accepter. وتُحدث كلّ ذرّة بورون في بلّورة شبه الموصّل ثقبًا واحدًا. لذلك، يساوي عدد حاملات الشحنة في شبه الموصّل من النوع الموجَب $N_a + n_i + p_i$، حيث إنّ N_a هو عدد الثقوب ويساوي عدد ذرّات القابل الذي هو البورون في هذه الحالة. وتكون الإلكترونات في نطاق التوصيل حاملات الشحنة الأقلية، وتكون الثقوب حاملات الشحنة الأكثرية.



(شكل 69)

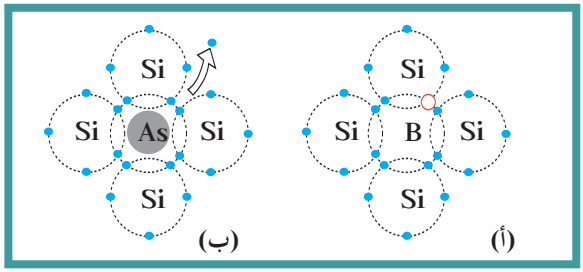
مسائل مع إجابات

1. تحتوي بلّورة من السيليكون النقي على (700000) إلكترون حرّ.
(أ) ما هو عدد الثقوب فيها؟
(ب) ماذا يحدث لعدد الثقوب والإلكترونات إذا رُفعت درجة حرارة البلّورة؟
الإجابات: (أ) (7×10^5) ثقب
(ب) ازدياد أعداد الثقوب والإلكترونات

2. يبلغ عدد الثقوب في قطعة من السيليكون $(10^{10})/cm^3$ ثقبًا عند درجة حرارة (350)K. ما هو العدد الكلّي لحاملات الشحنة الكهربائية في cm^3 التي تساهم في تكوين التيّار الكهربائي؟
الإجابة: $(2 \times 10^{10})/cm^3$

3. يحتوي شبه موصّل نقي على $(6.4 \times 10^{11})/cm^3$ من حاملات الشحنات. أُحسب عدد الثقوب فيه.
الإجابة: $(3.2 \times 10^{11})/cm^3$

يُسمّى شبه الموصّل الذي نحصل عليه في هذه الحالة شبه الموصّل من النوع الموجَب.



(شكل 70)
(أ) تُحدث ذرّة البورون ثقبًا في شبه الموصّل.
(ب) المادّة المانحة تساهم بإلكترونات حرّة.

مثال (2)

تُعَدّ مادّة الجرمانيوم Ge النقية من أشباه الموصّلات التي تحتوي كلّ ذرّة منها على أربعة إلكترونات في غلافها الخارجي.
(أ) علامَ نحصل لو طعّمنا الجرمانيوم النقي بـ $(7.2 \times 10^{18})/cm^3$ من ذرّات مادّة الفوسفور P التي تحتوي كلّ واحدة منها على خمسة إلكترونات في مستوى طاقتها الخارجي؟ (علمًا أنّ مادّة الجرمانيوم النقية تحتوي على $(2.4 \times 10^{13})/cm^3$ ثقبًا عند درجة الحرارة العادية.)
(ب) ما هو العدد الكلي لحاملات الشحنة الكهربائية في cm^3 التي تساهم في تكوين التيار الكهربائي؟

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: الجرمانيوم مادّة شبه موصّلة رباعية التكافؤ تحتوي على $(2.4 \times 10^{13})/cm^3$ ثقبًا. تمّ تطعيم بلّورة الجرمانيوم بـ $(7.2 \times 10^{18})/cm^3$ ذرّة فوسفور خماسية التكافؤ.

غير المعلوم: **(أ)** نتيجة التطعيم
(ب) عدد حاملات الشحنة

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) بما أنّ ذرّة الفوسفور تحتوي على خمسة إلكترونات في غلافها الخارجي، فهي تُعتبَر مادّة مانحة، أي أنّ كلّ ذرّة فوسفور تمنح البلّورة إلكترونًا حرًّا واحدًا. تكون إذًا مادّة الجرمانيوم المطعّمة بالفوسفور شبه موصّلة من النوع السالب.

(ب) عدد حاملات الشحنة:

$$N_d + n_i + p_i = 2.4 \times 10^{13} + 2.4 \times 10^{13} + 7.2 \times 10^{18}$$
$$= (7.200048 \times 10^{18})/cm^3$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

يساوي العدد الكلّي لحاملات الشحنة تقريبًا عدد ذرّات المادّة المانحة، أي أنّ التحكّم بمقدرة توصيل شبه الموصّل المطعّم يتمّ من خلال تحديد نسبة التطعيم.

مسائل مع إجابات

1. يحتوي شبه موصّل مطعّم (غير نقي) على 100 مليون ذرّة من السيليكون و15 مليون ذرّة من مادّة تحتوي على خمسة إلكترونات في غلافها الخارجي. ما هو عدد الإلكترونات الحرّة الموجودة في المادّة شبه الموصّلة؟

الإجابة: 15 مليون إلكترونٍ ناتج عن التطعيم

2. ما هو عدد حاملات الشحنة في شبه موصّل نقي يحتوي على $(1.4 \times 10^{14})/cm^3$ ثقبًا إذا ما طُعِّم بـ $(6.2 \times 10^{20})/cm^3$ ذرّة من مادّة تحتوي على (5) إلكترونات في غلافها الخارجي؟ اِستنتج نوع شبه الموصّل.

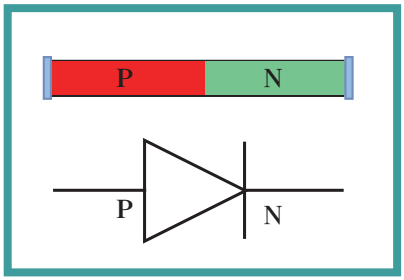
الإجابات:
$(6.2000028 \times 10^{20})/cm^3$، النوع السالب

3. طُعِّمت بلّورة نقية تحتوي على $(1.4 \times 10^{14})/cm^3$ ثقبًا بـ $(8 \times 10^{20})/cm^3$ ذرّة تحتوي على ثلاثة إلكترونات في غلافها الخارجي. ما هو عدد حاملات الشحنة؟ وما نوع شبه الموصّل؟

الإجابات:
$(8.0000028 \times 10^{20})/cm^3$، النوع الموجَب

3. الوصلة الثنائية The Diode

تتكوّن الوصلة الثنائية من شبه موصّل من النوع السالب ملتحم بشبه موصّل من النوع الموجَب، ويُطلى السطحان الخارجيان بمادّة موصّلة من أجل وصلها بأسلاك كهربائية (شكل 71).

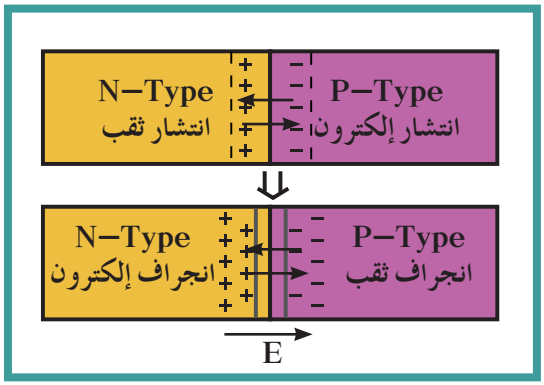


(شكل 71)
وصلة ثنائية

1.3 كيف تعمل الوصلة الثنائية؟

How Does the Diode Work?

إنّ وجود إلكترونات حرّة في شبه الموصّل من النوع السالب، وثقوب في شبه الموصّل من النوع الموجَب يؤدّي إلى نشوء تيّار للإلكترونات من شبه الموصل من النوع السالب باتجاه شبه الموصل من النوع الموجب، وتيّار للثقوب من شبه الموصّل من النوع الموجب باتجاه شبه الموصل من النوع السالب. عندما تتّحد الإلكترونات بالثقوب، تتشكّل منطقة خالية من حاملات الشحنة على جانبي منطقة الالتحام تُعرَف بمنطقة الاستنزاف (أو النضوب) Depletion Region كما في الشكل (72).

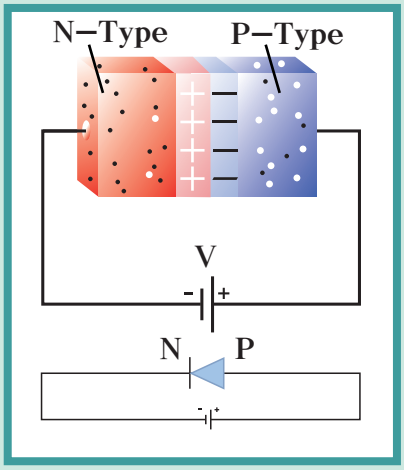


(شكل 72)

ينشأ على جانبي منطقة الاستنزاف فرق في الجهد V_i فينشأ عنه مجال كهربائي E_i يتخلّل منطقة الاستنزاف ويتجه من البلّورة السالبة إلى البلّورة الموجبة لأن البلّورة السالبة تكون قد فقدت عددًا من الإلكترونات فاكتسبت شحنة موجَبة، والبلّورة الموجَبة تكون قد اكتسبت عددًا من الإلكترونات فاكتسبت شحنة سالبة. وتصل الوصلة إلى حالة التوازن الكهربائي عندما يمنع المجال E_i أيّ زيادة في عدد حاملات الشحنة من الانتشار عبر منطقة الاستنزاف. ويكون $V_i = E_i \times d$، حيث تمثّل d اتّساع منطقة الاستنزاف.

2.3 توصيل الوصلة الثنائية بطريقة الانحياز الأمامي
Forward Bias Connection of a Diode

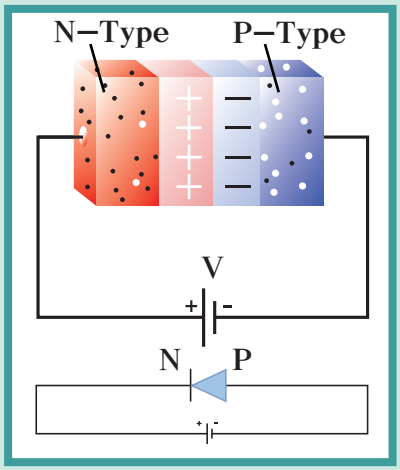
إنّ تسليط جهد كهربائي أمامي على الوصلة الثنائية، أي توصيل قطب البطّارية الموجَب بالبلّورة الموجَبة وقطب البطّارية السالب بالبلّورة السالبة، يجعل الوصلة الثنائية في حالة الانحياز الأمامي Forward Bias (شكل 73).
يكون اتّجاه المجال الكهربائي الخارجي E_{ex} الناتج عن الجهد الكهربائي معاكسًا للمجال الكهربائي الداخلي E_{in} في منطقة الاستنزاف، الأمر الذي يؤدّي إلى اندفاع الإلكترونات الحرّة في البلّورة السالبة والثقوب في البلّورة الموجَبة باتّجاه خطّ التماس بين البلّورتين السالبة والموجَبة، ممّا يسبّب تضييق منطقة الاستنزاف، وخفض نسبة مقاومتها، ومرور تيّار كهربائي (اصطلاحي) باتّجاه حركة الثقوب في البلّورة الموجَبة، أي عكس حركة الإلكترونات الحرّة في البلّورة السالبة.



(شكل 73)

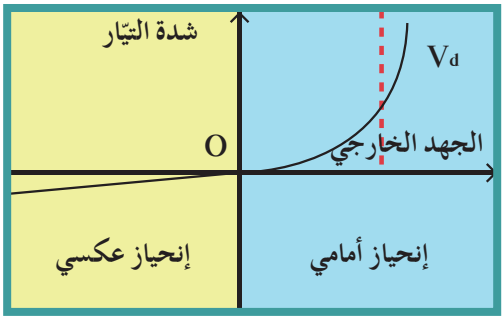
3.3 توصيل الوصلة الثنائية بطريقة الانحياز العكسي
Reverse Bias Connection of a Diode

إنّ تسليط جهد كهربائي عكسي على الوصلة الثنائية، أي توصيل قطب البطّارية الموجَب بالبلّورة السالبة وقطب البطّارية السالب بالبلّورة الموجَبة، يؤدّي إلى حالة الانحياز العكسي Reverse Bias (شكل 74).
في هذه الحالة، يكون المجال الكهربائي الخارجي E_{ex} باتّجاه المجال الكهربائي الداخلي E_{in} نفسه، ما يؤدّي إلى ازدياد اتّساع منطقة الاستنزاف الخالية من حاملات الشحنة، ويمنع مرور تيّار كهربائي، باستثناء تيّار ضعيف جدًّا يُسمّى تيّار الانحياز العكسي، أي أنّ الوصلة الثنائية تُعتبَر في هذه الحالة عازلًا للكهرباء.



(شكل 74)

ملاحظة: بما أنّ الجهد المطبَّق على الوصلة الثنائية يكون صغيرًا جدًّا في حالة الانحياز الأمامي ويسمح بمرور التيّار الكهربائي، تُعتبَر الوصلة الثنائية في هذه الحالة مفتاحًا كهربائيًّا مغلقًا. أمّا في حالة الانحياز العكسي، يكون التيّار ضعيفًا جدًّا، حتّى ولو تمّ تطبيق جهد كبير على الوصلة الثنائية، لذلك تُعتبَر الوصلة في هذه الحالة مفتاحًا كهربائيًّا مفتوحًا.



(شكل 75)

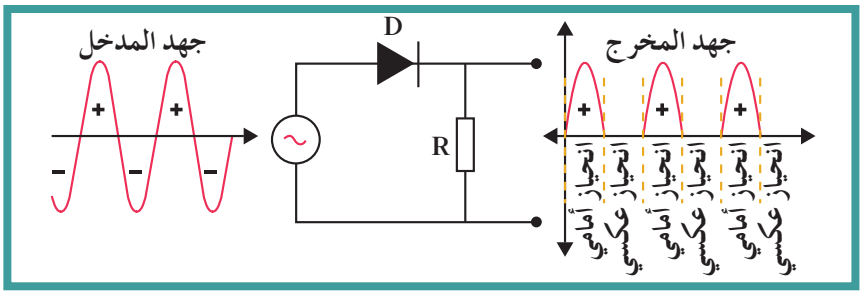
4. تطبيقات الوصلة الثنائية

Applications of Diode

1.4 تقويم التيّار الكهربائي المتردّد

من أهمّ التطبيقات التي تعتمد على الوصلة الثنائية تقويم التيّار المتردّد أو تحويل التيار المتردّد إلى تيار مقوم نصف موجب.

يغيّر التيّار المتردّد Alternating Current اتّجاهه كلّ نصف دورة، أي أنّ اتّجاهه يكون موجبًا في نصف الزمن الدوري وسالبًا في نصفه الآخر.



(شكل 76)

عند توصيل مقاومة ووصلة ثنائية معًا، وتطبيق جهد كهربائي متردّد عليهما، ومن ثمّ عرض رسم الجهد الكهربائي المطبَّق على المقاومة بواسطة راسم الذبذبات Oscilloscope (شكل 76)، نحصل على نصف الموجة الموجَب فقط، لأنّ الوصلة الثنائية تسمح بسريان التيّار في اتّجاه واحد فحسب.

مراجعة الدرس 1-1

أوّلًا – صنّف الموادّ الصلبة من حيث الموصلية الكهربائية.

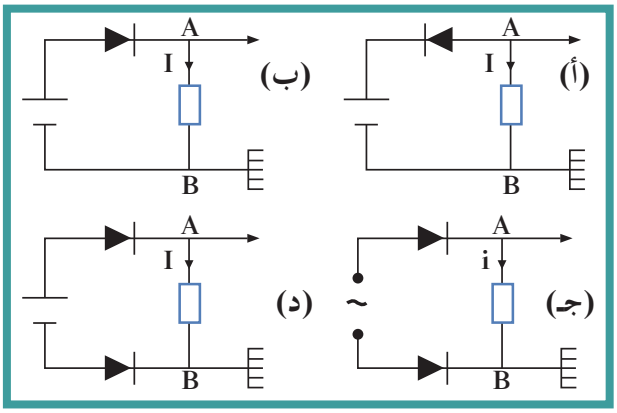
ثانيًا – كيف تتّحد الذرّات لتشكّل بلّورة صلبة؟

ثالثًا – ما علاقة حاملات الشحنة بالموصلية الكهربائية؟

رابعًا – ما الذي يحدّد كمّية حاملات الشحنة في نوع ما من البلّورات عند حرارة معيّنة؟

خامسًا – إذا انخفضت درجة الحرارة، فماذا يحصل لعدد إلكترونات نطاق التوصيل؟ وماذا يحصل لعدد الثقوب في نطاق التكافؤ؟ لماذا؟

سادسًا – فسّر لماذا يعمل المصباح أو لا يعمل في كلّ حالة من الحالات التالية:



(شكل 77)

سابعًا – أُرسم وصلة ثنائية وبيِّن عناصرها.

ثامنًا – ماذا نعني بشبه موصّل مطعّم؟ ميِّز بين نوعين من أشباه الموصّلات المطعمة.

تاسعًا – هناك وصلة ثنائية مؤلّفة من اتّصال شبه موصّل من النوع السالب بشبه موصّل من النوع الموجَب:

(أ) اِشرح كيف تتشكّل منطقة الاستنزاف داخل الوصلة الثنائية.

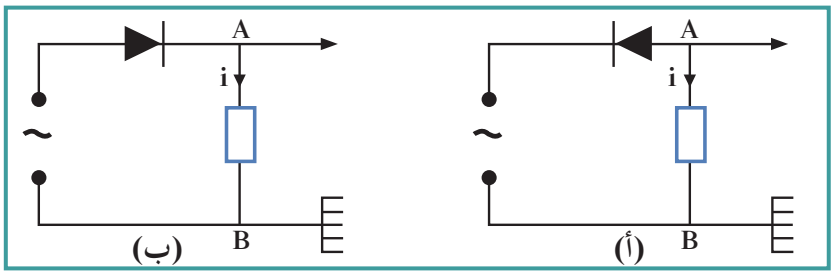
(ب) إذا كان اتّساع منطقة الاستنزاف (0.4)mm، ومقدار الجهد الداخلي المتشكّل (0.6)V، فما هو مقدار شدّة المجال الكهربائي؟

(جـ) مثِّل هذا المجال على الرسم.

عاشرًا – اِشرح ماذا يحصل داخل الوصلة الثنائية في حالتي الانحياز الأمامي والعكسي.

مراجعة الدرس 1-1 (تابع)

حادي عشر – تمّ تطبيق جهد متردّد له تردّد (20)Hz على وصلة ثنائية ومقاومة كما في الشكلين (78–أ) و(78–ب). أُرسم صورة الشكل الذي يظهر على شاشة راسم الذبذبات في كلّ من الحالتين.



(شكل 78)

الدرس 1-2

الترانزستور
The Transistor

الأهداف العامة

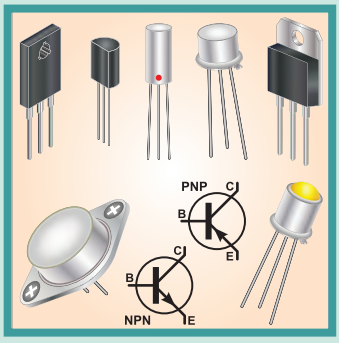
تعلّمنا في الدرس السابق كيفية تكوين الوصلة الثنائية من أشباه الموصّلات المطعّمة، إضافةً إلى خواصّها وعدد من استخداماتها. أمّا هذا الدرس فهو مخصّص للترانزستور، الذي يُعتبَر خطوة جديدة ومتقدّمة، بعد الوصلة الثنائية، على طريق التطوّر الإلكتروني التكنولوجي الهائل الذي شهده النصف الثاني من القرن العشرين، ولا يزال مستمرًّا حتى اليوم. وتحتوي الدوائر المُدمَجة Integrated Circuits، والتي تُستخدَم بشكل كبير في الكثير من الصناعات الإلكترونية والأجهزة، على عدد كبير من الترانزستورات.

فعندما تستمع إلى الموسيقى الصادرة عن مضخّمات الصوت Loudspeakers، أو ترى بعض الأجهزة الحسّاسة التي تشغّل المصباح عند انخفاض شدّة الضوء، اِعلم أنّك تستخدم الترانزستور الذي يدخل كعنصر أساسي في عمل تلك الأجهزة.

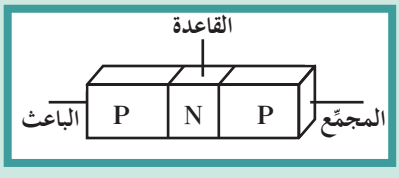
1. أنواع الترانزستور Types of Transistors

هناك عدّة نماذج من الترانزستور (شكل 79)، لكنّنا سنتطرّق في هذا الدرس إلى الترانزستور من النوع ثنائي قطب نقطة الالتقاء، وهو على نوعين، يختلف كلّ منهما عن الآخر من حيث الأداء وطريقة التوصيل.

- النوع الأوّل PNP: يتألّف من ثلاثة أجزاء مرتّبة كما يلي: بلّورتا شبه موصّل من النوع الموجَب تُسمّى الأولى الباعث Emitter والثانية المجمِّع Collector، وبينهما بلّورة رقيقة من شبه موصّل من النوع السالب تُسمّى القاعدة Base (شكل 80).



(شكل 79)
نماذج من الترانزستورات



(شكل 80)

النوع الثاني NPN: يتألّف من ثلاثة أجزاء مرتّبة كما يلي: بلّورتا شبه موصّل من النوع السالب تُسمّى الأولى الباعث Emitter والثانية المجمِّع Collector، وبينهما بلّورة رقيقة من شبه موصّل من النوع الموجَب تُسمّى القاعدة Base (شكل 81).

تختلف بلورات الترانزستور عن بعضها البعض باختلاف سماكتها ونسبة الشوائب فيها:

فالقاعدة B تمثل البلورة الوسطى في الترانزستور وتتميز بأنها رقيقة جداً وبأنها أقل البلورات سمكًا وأقلها في نسبة الشوائب كما أن بلورة القاعدة هي أكبر البلورات مقاومة وأقلّها في درجة التوصيل ودائما من نوع مخالف لبلورات الطرفين.

الباعث E هي أحد بلوراتا الطرفين في الترانزستور يتميز الباعث باحتوائه على أعلى نسبة شوائب، وبأنها أقل سماكة من المجمع وأكثر سماكة من القاعدة. يميز الباعث في الرسم الاصطلاحي للترانزستور بوجود سهم عليه يشير إلى اتجاه التيار الاصطلاحي فيه.

المجمع C: هو البلورة الطرفية المقابلة للباعث تتميز بلورة المجمع بأنها أكبر البلورات سماكة أما نسبة الشوائب فيها فهي أقل من نسبة الشوائب في بلورة الباعث.

يُشار إلى أنّ الترانزستور من النوع NPN هو الأكثر استخدامًا، كما أنّ فهم كيفية عمله يعطينا فكرة كافية عن عمل الترانزستور من النوع PNP، حيث إنّ طريقة عمل الترانزستور هي نفسها في كلتا الحالتين، باستثناء تغيّر حاملات الشحنة واختلاف سهولة انسياب التيّار الكهربائي، وانعكاس الجهد الكهربائي عند التوصيل.

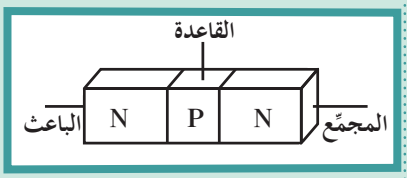
ويختلف تمثيل الترانزستور الكهربائي باختلاف نوعه (شكل 82). فهذان الشكلان يبيّنان أنّ الترانزستور وصلة ثلاثية الأقطاب، وأنّ هنالك اختلاف في اتّجاه التيّار الكهربائي (الاصطلاحي) في كلّ نوع، بحيث يكون اتّجاه التيّار داخل الترانزستور من القاعدة إلى الباعث في النوع NPN، ومن الباعث إلى القاعدة في النوع PNP.

2. توصيل الترانزستورات Transistors Setup

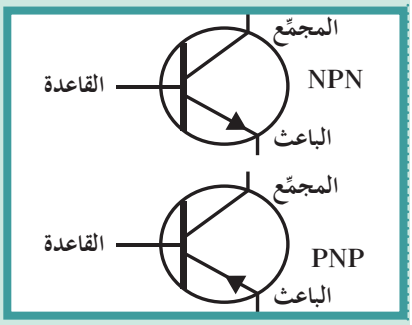
لا يعمل الترانزستور إلّا إذا أُدخِل في دائرتين كهربائيتين. ثمّة ثلاث طرائق لتوصيل الترانزستور:

- طريقة القاعدة المشترَكة Common Base
- طريقة الباعث المشترَك Common Emitter
- طريقة المجمِّع المشترَك Common Collector

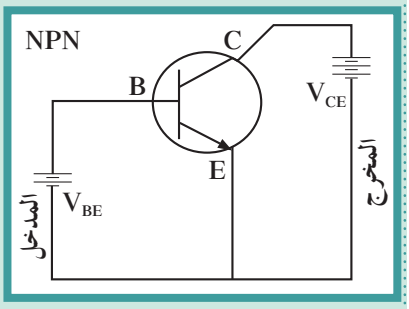
علمًا أنّ التوصيل بطريقة الباعث المشترَك هو الأكثر استخدامًا وشيوعًا لتكبير الجهد والقدرة، وهذا ما سنتناوله في سياق الدرس.



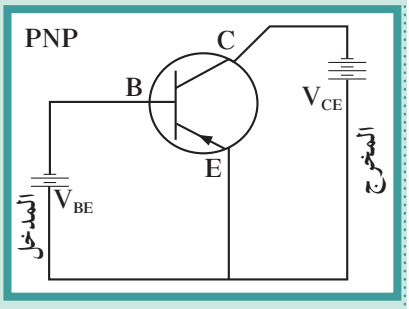
(شكل 81)



(شكل 82)
يوضع شكل رأس السهم على الباعث لتمييزه عن المجمِّع.



(شكل 83)



(شكل 84)

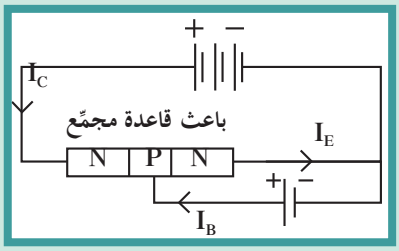
1.2 توصيل الترانزستور بطريقة الباعث المشترَك

Common Emitter Setup

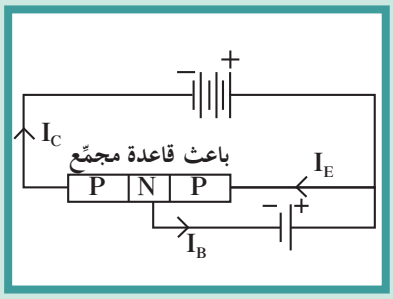
يتمّ هذا التوصيل بحيث يكون الباعث مشترَكًا، فتتشكّل الدائرة الأولى بين القاعدة والباعث وتُعرَف بدائرة المدخل، أمّا الدائرة الثانية فتكون بين المجمّع والباعث وتُعرَف بدائرة المخرج (شكل 83).

في حالة الترانزستور من النوع NPN، تكون وصلة المجمّع والقاعدة في حالة انحياز عكسي ووصلة الباعث والقاعدة في حالة انحياز أمامي ويكون لكلٍّ من القاعدة والمجمّع جهد موجَب (شكل 85).

أمّا في حالة الترانزستور من النوع PNP، فتكون وصلة المجمّع والقاعدة في حالة انحياز عكسي ووصلة الباعث والقاعدة في حالة انحياز أمامي ويكون لكلٍّ من القاعدة والمجمّع جهد سالب (شكل 86).



(شكل 85)



(شكل 86)

2.2 عمل الترانزستور من الناحية التطبيقية عند توصيله بطريقة الباعث المشترَك

عند توصيل الترانزستور بالدوائر الكهربائية بطريقة الباعث المشترك فإن معظم تيار الباعث I_E يتجه للمجمع ويمر تيار المجمع I_C ويكون تيار القاعدة I_B صغير جدا بحيث يكون دائمًا:

$$I_E = I_C + I_B \quad (1)$$

وتبيّن التجارب أنّ شدّة تيّار المجمّع I_C تتأثّر كثيرًا بأيّ تغيّر يطرأ على تيّار القاعدة I_B. إذ يؤدّي توقّف تيّار القاعدة إلى توقّف تيّار المجمّع، **ويؤدّي ازدياد شدّة تيّار القاعدة أو انخفاضها إلى ازدياد شدّة تيّار المجمّع أو انخفاضها بنسبة ثابتة تُسمّى "معامل التكبير β"**. ويمكننا تمثيل ذلك بالعلاقة :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_C = \beta\, I_B$$

أي أنّ :

ما يعني أنّ تيّار المجمّع أكبر من تيّار القاعدة، وبالتعويض عن المقادير في المعادلة (1) نجد أنّ :

$$I_E = (\beta + 1)\, I_B \quad (1)$$

وبما أنّ مقدار معامل التكبير β يتراوح بين (50) و(200)، أي أنّ β أكبر بكثير من الواحد الصحيح، فيمكننا أن نكتب: $\beta + 1 \approx \beta$

وبالتالي، نستنتج العلاقة التالية بين التيّار الباعث وتيّار القاعدة:

$$I_E = \beta\, I_B$$

وبالمقارنة بين I_B و I_C، نجد أنّ: $\alpha = \frac{I_C}{I_E}$

وأنّ معامل التناسب α (كسب التيّار) هو أصغر من (1)، وبالتالي نستنتج أنّ:

$$I_C = \alpha I_E \approx I_E$$

فقرة إثرائية

عمل الترانزستور من الناحية النظرية عند توصيله بطريقة الباعث المشترك

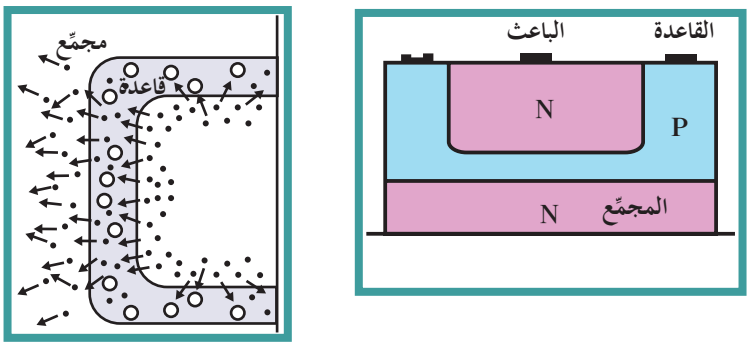
لنلقِ نظرة على الرسم التخطيطي للترانزستور، ولنلاحظ أنّ وجود طبقة من شبه الموصّل من النوع الموجَب (القاعدة) بين بلّورتين من شبه الموصّل من النوع السالب يؤدّي إلى نشوء منطقتي استنزاف: منطقة استنزاف بين الباعث والقاعدة، ومنطقة استنزاف بين القاعدة والمجمِّع.

بما أنّ $(V_{BE} > 0)$، فإنّ الدائرة المؤلّفة من القاعدة (B) والباعث (E) تكون في حالة الانحياز الأمامي. أمّا الدائرة المؤلّفة من الباعث (E) والمجمِّع (C) فتكون في حالة الانحياز العكسي، وذلك لأنّ:

$$V_{CE} > V_{BE} \Rightarrow V_{CE} - V_{BE} > 0 \Rightarrow V_{CE} > 0$$

هذا وقد تعلّمنا في الدرس السابق أنّ التيّار الكهربائي يسري في الوصلة الثنائية في حالة الانحياز الأمامي، أمّا في حالة الانحياز العكسي، فيكون التيّار ضعيفًا جدًّا ويُسمّى تيّار الانحياز العكسي I_0، علمًا أنّ هذا التيّار الضعيف يتكوّن بسبب حاملات الشحنة الأقلّية، لأنّ حاملات الشحنة الأكثرية تختفي من منطقة الاستنزاف عند الانحياز العكسي، ولا تتمكّن من عبور المجال الكهربائي المتشكِّل. أمّا حاملات الشحنة الأقلّية فتسير مع المجال الكهربائي عبر منطقة الاستنزاف.

وبما أنّ الوصلة الثنائية (القاعدة والمجمِّع) في حالة الانحياز العكسي، يُتوقَّع أن يكون التيّار الكهربائي في المجمِّع صغيرًا جدًّا. إلّا أنّ وجود الانحياز الأمامي في الوصلة الثنائية (القاعدة والباعث) يؤدّي إلى ضخّ عدد كبير من الإلكترونات من الباعث إلى القاعدة، علمًا أنّ الإلكترونات في قاعدة الترانزستور NPN هي حاملات الشحنة الأقلّية، وأنّ تطعيم الباعث أكبر بكثير من تطعيم القاعدة. لذلك، فإنّ دخول الإلكترونات من الباعث إلى القاعدة كحاملات الشحنة الأقلّية في القاعدة ولكن بأعداد كبيرة يؤدّي إلى سحب تلك الإلكترونات عبر المجال الكهربائي الشديد للانحياز العكسي بين القاعدة والمجمِّع.



(شكل 87)

فقرة إثرائية تابعة

وتؤدّي هندسة الترانزستور الداخلية دورًا مهمًّا في هذه العملية، لأنّ القاعدة رقيقة جدًّا، حيث تصل تقريبًا الإلكترونات جميعها إلى منطقة الاستنزاف للانحياز العكسي بين القاعدة والمجمّع، كما أنّ أعدادًا قليلة من الإلكترونات تتّحد في القاعدة مع الثقوب لأنّ القاعدة قليلة التطعيم. وهكذا يكون تيّار القاعدة صغيرًا جدًّا، ويؤدّي الانحياز الأمامي بين القاعدة والباعث دور الدافع الذي يسمح للإلكترونات بالاندفاع من الباعث إلى القاعدة. أمّا واجهة المجمّع المقابلة للباعث فهي كبيرة جدًّا بحيث تسمح بالتقاط معظم الإلكترونات الحرّة التي تصل إلى القاعدة.

وكما في الترانزستور من النوع (NPN) فإنّه في الترانزستور النوع (PNP) نستخدم نفس قوانين معامل التكبير ومعامل التناسب (كسب التيار) إلا أنه ينعكس اتجاه حركة حاملات الشحنة بالدائرة الكهربائية وينعكس اتجاه أقطاب البطاريات الموصلة.

مثال (1)

تبلغ شدّة تيّار المجمّع $I_C = (6 \times 10^{-3})A$ وشدّة تيّار القاعدة $I_B = (60 \times 10^{-6})A$ في ترانزستور من النوع NPN متّصل بطريقة "الباعث المشترَك". أُحسب

(أ) معامل التكبير في شدّة التيّار.

(ب) شدّة تيّار الباعث.

طريقة التفكير في الحلّ.

1. **حلّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: $I_C = (6 \times 10^{-3})A$

$I_B = (60 \times 10^{-6})A$

غير المعلوم: **(أ)** معامل التكبير β.

(ب) شدّة تيّار الباعث I_E.

2. **أُحسب غير المعلوم.**

(أ) باستخدام العلاقة بين تيّار المجمّع وتيّار القاعدة:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{6 \times 10^{-3}}{60 \times 10^{-6}} = (100)$$

(ب) $I_E = I_C + I_B$

$$I_E = 6 \times 10^{-3} + 60 \times 10^{-6} = (0.00606)$$

3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟

النتيجة مُتوقَّعة حيث إنّ $I_E \approx I_C$ ومعامل التناسب α أصغر من 1.

مسائل مع إجابات

1. في ترانزستور متّصل بطريقة الباعث المُشترَك، شدّة تيّار المجمّع تساوي (20)mA، ويساوي معامل التناسب (0.8). أُحسب شدّة تيّار الباعث.

الإجابة: (25)mA

2. في ترانزستور NPN متّصل بطريقة الباعث المُشترَك، شدّة تيّار الباعث تساوي $(2.563 \times 10^{-3})A$ وشدّة تيّار القاعدة تساوي (63)μA. أُحسب:

(أ) مقدار شدّة تيّار المجمع.

(ب) معامل التكبير.

(جـ) معامل التناسب α

الإجابات: **(أ)** (2.5)mA

(ب) (39.68)

(جـ) (0.975)

2. في مجمّع ترانزستور NPN متّصل بطريقة الباعث المُشترَك، شدّة تيّار المجمّع تساوي (3)mA وشدّة تيّار القاعدة تساوي (30) μA. أُحسب:

(أ) شدّة تيّار الباعث.

(ب) معامل التكبير.

(جـ) معامل التناسب α.

الإجابات: **(أ)** (3.030)mA

(ب) (100)

(جـ) (0.99)

مثال (2)

تمّ توصيل ترانزستور NPN بواسطة "الباعث المشترَك" (شكل 86)، حيث إنّ $V_{CE} = (10)V$ ومقدار معامل التكبير (100). أُحسب:

(أ) مقدار التيّار في المجمِّع والباعث عندما تكون مقادير تيّار القاعدة كما يلي:

(0)mA، (1)mA، (5)mA

(ب) معامل التناسب (كسب التيار).

طريقة التفكير في الحلّ.

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: معامل التكبير: $\beta = (100)$

مقادير تيّار القاعدة: (0)mA ، (1)mA ، (5)mA

غير المعلوم: **(أ)** قِيَم تيّار المجمِّع والباعث

(ب) العلاقة بين تيّار المجمِّع وتيّار الباعث.

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ)

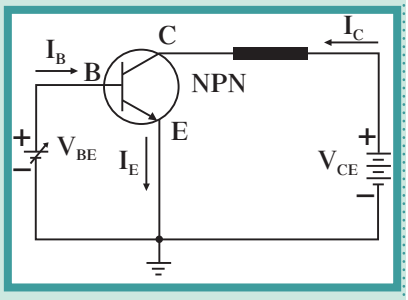
I_B	$I_C = \beta \times I_B = 100\ I_B$	$I_C + I_B = I_E$
(0)mA	(0)mA	(0)mA
(1)mA	(100)mA	(101)mA
(5)mA	(500)mA	(505)mA

(ب) يُحسَب "كسب التيّار" من العلاقة بين تيّاري المجمِّع والباعث:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{100}{101} = \frac{500}{505} = (0.99)$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

النتيجة متوقعة حيث أن $I_C \approx I_E$ ومعامل التناسب α أصغر من 1.



(شكل 88)

مراجعة الدرس 1-2

أوّلًا – أُرسم الشكل الاصطلاحي لترانزستور من النوع NPN.

ثانيًا – كم يصبح مقدار تيّاري المجمّع والباعث عندما يتوقّف تيّار القاعدة؟

ثالثًا – كيف يكون الانحياز بين القاعدة والمجمّع عندما يكون الترانزستور في حالة عمل عادية (مكبّر)؟ وبين القاعدة والباعث؟

رابعًا – ارسم دائرة توصيل ترانزستور من النوع (N–P–N) بطريقة الباعث المشترك موضحًا اتجاه التيار بالدائرة ثم اكتب العلاقة التي تربط بين كل من تيار الباعث I_E وتيار المجمع I_C وتيار القاعدة I_B.

خامسًا – ما العلاقة بين تيّار القاعدة وتيّار المجمّع عندما يعمل الترانزستور كمكبّر؟ أُحسب مقدار تيّار القاعدة إذا كان مقدار معامل التكبير (120)، ومقدار تيّار المجمّع (0.6)A. أُحسب مقدار تيّار الباعث في تلك الحالة.

سادسًا – ما هي حاملات الشحنة الأقلّية وحاملات الشحنة الأكثرية في قاعدة الترانزستور NPN؟

مراجعة الوحدة الثالثة

المفاهيم

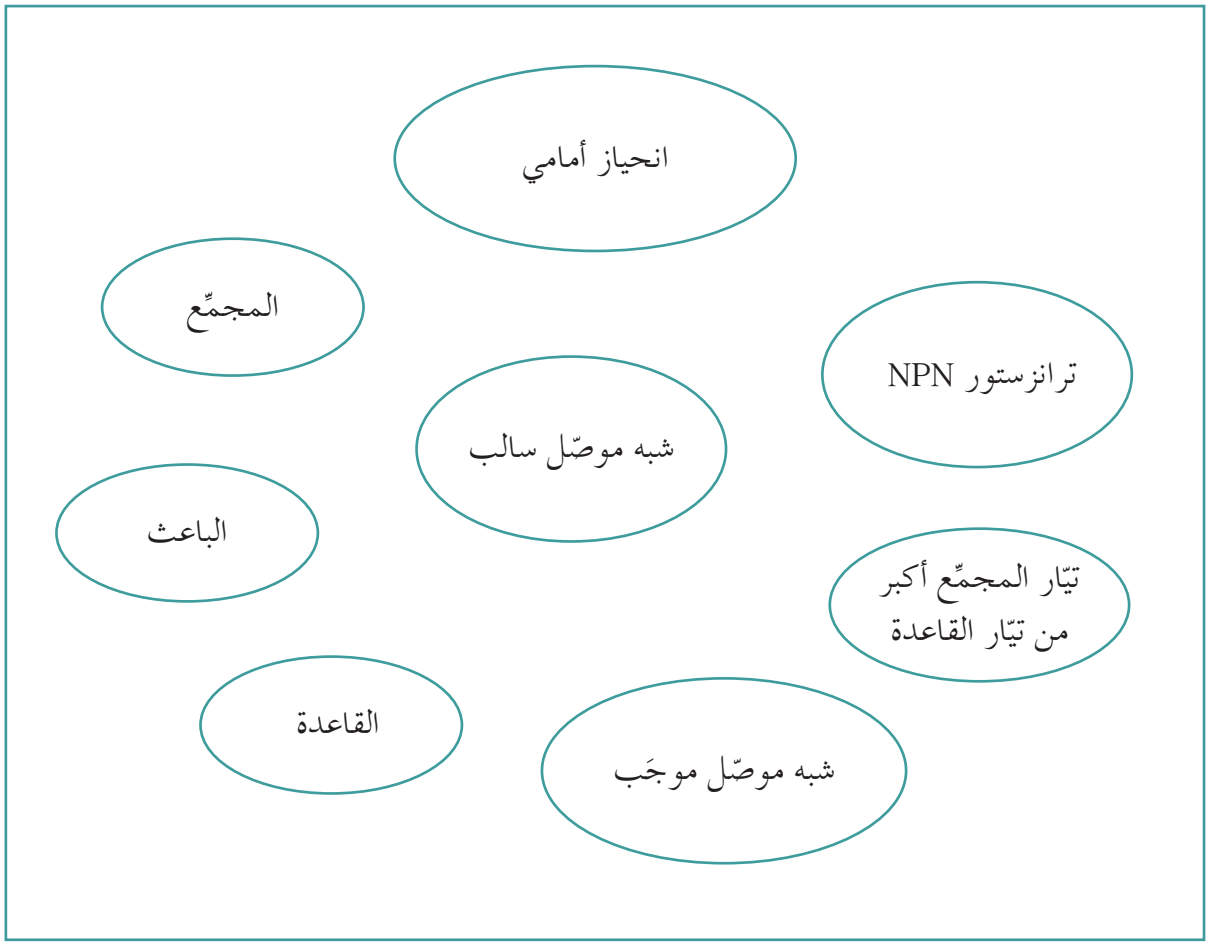
أشباه الموصّلات	Semiconductors	انحياز أمامي	Forward Bias
انحياز عكسي	Reverse Bias	باعث	Emitter
بلّورات	Crystals	ترانزستور	Transistor
نطاق التكافؤ	Valence Band	نطاق التوصيل	Conduction Band
نطاق الطاقة	Energy Band	دوائر مدمجة	Integrated Circuits
شبه موصّل مطعّم	Extrinsic Semiconductor	شبه موصّل نقي	Intrinsic Semiconductor
فجوة الطاقة المحظورة	Forbidden Energy Gap	قاعدة	Base
مجمِّع	Collector	وصلة ثنائية	Diode

الأفكار الرئيسة في الوحدة

- تكون إلكترونات المستويات الداخلية للذرّة أكثر ارتباطًا بالنواة من إلكترونات المستوى الأخير.
- تكوّن إلكترونات الغلاف الخارجي الموجودة في مدارات جزيئية مشتركة نطاقًا يجمع مستويات متقاربة من الطاقة يُسمّى نطاق التكافؤ.
- فجوة الطاقة المحظورة هي الفجوة الموجودة بين نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ.
- في المواد شبه الموصلة يكون مقدار طاقة الفجوة المحظورة أكبر من صفر وأقل من (4)eV
- يقفز الإلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل عندما يكتسب طاقة تساوي الفرق بين طاقة نطاق التوصيل وطاقة نطاق التكافؤ.
- في الموادّ الموصّلة للكهرباء، يكون نطاق التوصيل متّصلًا بنطاق التكافؤ.
- في الموادّ العازلة، تكون الفجوة المحظورة بين نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ كبيرة جدًّا بحيث يحتاج الإلكترون إلى طاقة عالية ليقفز بينهما.
- أشباه الموصّلات المطعّمة نوعان: سالبة وتُعرَف بـ N−type وموجبة وتُعرَف بـ P−type.
- تتكوّن الوصلة الثنائية من شبه موصّل من النوع السالب موصول بشبه موصّل من النوع الموجَب.
- تعمل الوصلة الثنائية في حالة الانحياز العكسي كعازل للكهرباء بحيث تتّسع منطقة الاستنزاف، بينما في حالة الانحياز الأمامي، تضيق منطقة الاستنزاف وتقلّ مقاومتها.
- من التطبيقات العملية على الوصلة الثنائية تقويم التيّار الكهربائي المتردّد.
- الترانزستور من النوع ثنائي قطب نقطة الالتقاء مؤلّف من ثلاث بلّورات شبه موصّلة مرتّبة، إمّا بتوسّط بلّورة سالبة بين بلّورتين موجَبتين في النوع PNP أو بتوسّط بلّورة موجَبة بين بلّورتين سالبتين في النوع NPN.
- لا يعمل الترانزستور إلّا إذا أُدخِل في دائرتين كهربائيتين ويمكن توصيله بثلاث طرائق مختلفة: القاعدة المشترَكة، أو الباعث المشترَك أو المجمِّع المشترَك.

خريطة مفاهيم الوحدة

اِستخدم المصطلحات الموضَّحة في الشكل التالي لرسم خريطة مفاهيم تنظِّم معظم الأفكار التي احتوتها الوحدة.



تحقق من فهمك

ضع علامة (✓) في المربّع الواقع أمام الإجابة الأنسب في كلّ ممّا يلي:

1. في الموادّ الموصّلة للكهرباء:
   - ☐ يكون نطاق التكافؤ متّصلًا بنطاق التوصيل لعدم وجود نطاق الطاقة المحظورة.
   - ☐ يشكّل نطاق الطاقة المحظورة فاصلًا بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل.
   - ☐ يؤخّر نطاق الطاقة المحظورة من انتقال الإلكترونات بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل.
   - ☐ يكون نطاق الطاقة المحظورة كبير عند درجات الحرارة المرتفعة.
2. تتميّز الموادّ شبه الموصّلة بأنّ:
   - ☐ نطاق التوصيل أقرب إلى نطاق التكافؤ منه في الموادّ العازلة.
   - ☐ نطاق التوصيل أقرب إلى نطاق التكافؤ منه في الموادّ الموصّلة.
   - ☐ نطاق الطاقة المحظورة غير موجود.
   - ☐ نطاق الطاقة المحظورة كبير جدًّا.
3. الثقوب في نطاق التكافؤ هي نتيجة انتقال شحنات:
   - ☐ موجَبة من نطاق التوصيل إلى نطاق التكافؤ.
   - ☐ سالبة من نطاق التوصيل إلى نطاق التكافؤ.
   - ☐ سالبة من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل.
   - ☐ موجَبة من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل.
4. إنّ عدد حاملات الشحنة في شبه الموصّل النقيّ عبارة عن:
   - ☐ عدد الإلكترونات التي تقفز إلى نطاق التوصيل.
   - ☐ عدد الثقوب في نطاق التكافؤ الناتج عن قفز الإلكترونات إلى نطاق التوصيل.
   - ☐ الفرق بين عدد الثقوب في نطاق التكافؤ وعدد الإلكترونات المتبقّية.
   - ☐ مجموع عدد الثقوب في نطاق التكافؤ وعدد الإلكترونات في نطاق التوصيل.

تحقق من معلوماتك

أجب عن الأسئلة التالية:

1. تُطعَّم أشباه الموصّلات النقية بذرّات أخرى تملك في غلافها الخارجي عددًا مختلفًا من الإلكترونات. اِشرح أهمّية تطعيم أشباه الموصّلات النقية.
2. تُسمّى الثقوب في شبه الموصّل من النوع السالب حاملات الشحنة الأقلية. اِشرح.
3. تُسمّى بعض الذرّات التي تُستخدَم في تطعيم أشباه الموصّلات ذرّات متقبلة. اِشرح.
4. ما هو عدد حاملات الشحنة في شبه الموصّل من النوع الموجَب؟
5. **(أ)** اِشرح مع الرسم كيف يتمّ توصيل الوصلة الثنائية في حالة الانحياز الأمامي.
   (ب) وضّح تأثير هذا التوصيل في منطقة الاستنزاف.
6. قارن بين مكوّنات الترانزستور من النوع NPN والنوع PNP من حيث سماكة البلّورات ونسبة الشوائب فيها.
7. اِشرح مع الرسم كيف يختلف اتّجاه التيّار الكهربائي بين الباعث والقاعدة بحسب أنواع الترانزستورات.

تحقق من مهاراتك

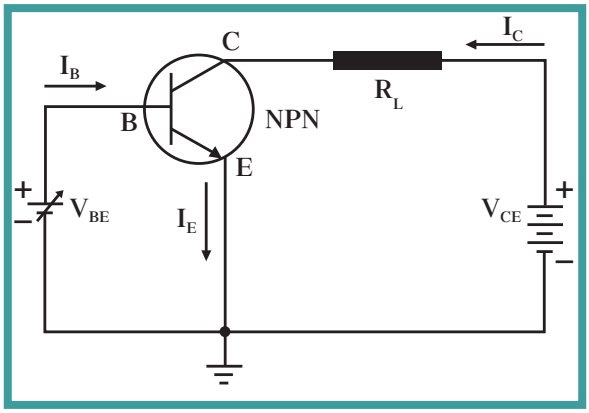
حلّ المسائل التالية:

1. يبلغ عدد الثقوب في قطعة شبه موصّل نقيّ $(2.2 \times 10^{10})/cm^3$ ثقبًا عند درجة الحرارة العادية $300(K)$. أُحسب العدد الكلّي لحاملات الشحنة الكهربائية التي تكوّن التيّار الكهربائي في cm^3.
2. طُعِّم شبه الموصّل من مادّة السيليكون النقيّ بـ $(5.2 \times 10^{18})/cm^3$ ذرّة من مادّة الفوسفور P تحتوي كلّ ذرّة منها على خمسة إلكترونات في غلافها الخارجي. علمًا أنّ مادّة السيليكون النقيّ تحتوي على $(2.2 \times 10^{13})/cm^3$ إلكترونًا عند درجة الحرارة العادية:
   (أ) أُحسب عدد حاملات الشحنة الكلّية في شبه الموصّل.
   (ب) قارن بين عدد حاملات الشحنة وعدد ذرّات المادّة المانحة.
   (جـ) اِستنتج أهمّية التطعيم في موصلية شبه الموصّل.
3. عند وصل ترانزستور من النوع NPN بطريقة الباعث المشترَك، وكانت شدّة تيّار المجمِّع تساوي $I_C = (2 \times 10^{-3})A$ وشدّة تيّار القاعدة $I_B = (30 \times 10^{-6})A$. أُحسب:
   (أ) معامل التكبير في شدة التيّار.
   (ب) شدّة تيّار الباعث.

4. تمّ توصيل ترانزستور NPN بطريقة الباعث المشترَك كما هو موضّح في الشكل (89)، حيث إنّ $V_{CE} = (20)V$ ومقدار معامل التكبير (100). أُحسب:

(أ) مقدار التيّار المارّ في المجمِّع والباعث عندما تبلغ قيمة تيّار القاعدة (10)mA.

(ب) معامل التناسب α بين تيّار المجمِّع وتيّار الباعث.



(شكل 89)

5. في ترانزستور NPN متّصل بواسطة الباعث المشترَك، اِستنتج أنّ العلاقة التي تربط بين معامل التكبير β ومعامل التناسب α تُمثَّل بالمعادلة التالية: $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$

التواصل

أُكتب مقالًا لا يزيد عن عشرة أسطر تبيّن فيه أهمّية الترانزستور ودوره في أجهزة الصوت.

نشاط بحثي

الترانزستور عنصر مهمّ يُستخدَم في معظم الدوائر الإلكترونية والأجهزة مثل التلفاز والراديو وغيرها. أجرِ بحثًا تبيّن فيه تاريخ اكتشافه وحلوله مكان الصمّامات المُفرَغة. ضمِّن بحثك سبب ارتباط اسمه قديمًا باسم جهاز الراديو.

إضافةً إلى ذلك، أشر إلى تطوّر استخدامه في عصر أُطلِق عليه عصر ثورة الترانزستور مبيّنًا أهمّيته في صناعة معالجات أجهزة الكمبيوتر Microprocessor وتطويرها، والتي أصبحت تحتوي على الملايين منه.

بعد أن طرح ماكس بلانك مبدأ تكميم الطاقة وأحيا أينشتاين فكرة نيوتن حول الطبيعة الجسيمية للضوء، انطلقت الفيزياء الحديثة التي درست تركيب الذرّة من جانب تحليل الضوء وأسهمت في إدخال مفاهيم غيّرت جذريًّا مفاهيمنا السابقة لعالم الذرّة.

في الفصل الأوّل من هذه الوحدة، سنبرهن الطبيعة المزدوجة للضوء والمادّة، وسَنبيّن العلاقة بين انبعاث الضوء والتغيّر في التركيب الإلكتروني. أمّا في الفصلِ الثاني، فسندخل عمق نواة الذرّة لنتعرّف تركيبها ونشاطها الإشعاعي ونتائج انشطارها واندماجها.

اكتشف بنفسك

النشاط الإشعاعي الكوني

إنّ معظم النشاط الإشعاعي الذي نتعرّض إليه هو إشعاع كوني علمًا أنّ الغلاف الجوي يعكس معظم البروتونات وأنوية الذرّات. فبعض الأشعّة الكونية تخترق الغلاف الجوّي كجسيمات لا شحنة لها ولا تتفاعل مع الموادّ ولها كتلة تقترب من الصفر تُسمّى نيوترينو. تُعدّ النيوترينوات من أكبر الجسيمات المعروفة بسرعتها وتمرّ كلّ ثانية بالمليارات في أجسامنا من دون أيّ إعاقة، ولكنّها لا تسبّب تلفًا كالذي تسبّبه أشعّة جامّا التي تخرج من الموادّ المشعّة في الطبيعة وتخترق المادّة الحية، مسبّبة تغييرًا في DNA وتشوّهات وراثية.

بالعودة إلى النصّ، أجب عن الأسئلة التالية:

1. ما مصدر جسيمات النيوترينو التي تصل إلى الأرض؟
2. ما هي خواصّ هذه الجسيمات؟
3. ما هو مصدر أشعّة جامّا التي تتعرّض له المادّة الحية على الأرض؟
4. قارِن بين خطر جسيمات النيوترينو وأشعّة جامّا على المادّة الحية.

فصول الوحدة

الفصل الأوّل
- الذرّة والكمّ

الفصل الثاني
- نواة الذرّة والنشاط الإشعاعي

أهداف الوحدة

- يوضّح نماذج الذرّة ونماذج الضوء.
- يعرّف طاقة الضوء على أنّها مضاعفات لوَحدة صغيرة من الطاقة.
- يبرهن الطبيعة الجسيمية للضوء.
- يبرهن الطبيعة الموجية للإلكترونات.
- يبرهن الطبيعة المزدوجة للضوء.
- يصف الخواصّ الموجية للمادّة.

معالم الوحدة

اكتشف بنفسك: النشاط الإشعاعي الكوني.

فقرة إثرائية

الأشعّة الكونية

هي جسيمات نووية ذات شحنة وطاقة عالية تنشأ في الفضاء وتتكوّن بغالبيتها من بروتونات وجسيمات ألفا وأنوية ذات عدد ذرّي بين 4 و 26.

إنّ مصدر الأشعّة الكونية هو المواقع النشطة لمراكز المجرات حيث يكون للثقب الاسود كتلة وحجم كبيرين جدا وحيث المجال المغناطيسي المحيط بالثقب الأسود يقوم بقذفها بسرعات كبيرة تسمح لها باختراق الغلاف الجوّي للأرض. إنّ اختراق الأشعّة الكونية لغلاف الأرض يجعلها تتفاعل مع الذرّات في جوّ الأرض لتكوّن وابلًا من الجسيمات الثانوية مثل النيترونيوات والميزونات وأشعّة جامّا على سطح الأرض. إنّ ظاهرة الشفق القطبي هي نتاج تصادم الأشعّة الكونية الصادرة عن الشمس بغلافنا الغازي الذي يتأيّن وينتج جسيمات ثانوية تتصادم بشحناتها المختلفة بعضها ببعض وبالشحنات الموجودة في الغلاف الغازي مفرغة طاقتها ومتوهّجة ألوانًا مختلفة.

إنّ الفيزياء الكلاسيكية التي درست حركة الأجسام ووضعت النظريات والقوانين التي سمحت لها بتفسير الكثير من الظواهر الفيزيائية الطبيعية من حركة الأجسام المنتظِمة والمعجّلة، إلى حركة الكواكب وغيرها من الظواهر التي كانت معروفة في ذلك الوقت، حتّى ظنّ العلماء أنّهم قد توصّلوا، بفضل إنجازاتهم هذه، إلى معرفة القوانين الفيزيائية الأساسية للطبيعة.

ولكن في أوائل القرن التاسع عشر، بدأ العلماء يكتشفون ظواهر فيزيائية تعجز الفيزياء الكلاسيكية عن تفسيرها مثل إشعاع الجسم الأسود، وظاهرة التأثير الكهروضوئي، وانبعاث خطوط الطيف، وتصرّف الأجسام بحجم الذرّة وغيرها، ما دفع الفيزيائيين إلى التفكير بطرائق جديدة أسهمت في إطلاق الفيزياء الحديثة التي شرعت تعالج العالم المجهري (الميكروسكوبي). أعادت الفيزياء الحديثة النظر في نماذج الذرّة المعروفة سابقًا، وقدّمت نماذج جديدة أكثر عمقًا، واهتمّت بدراسة نواة الذرّة ومكوّناتها وأهمّيتها في الفيزياء النووية، وأطلقت فيزياء الكمّ التي اعتُبِرت ثورة عظيمة في علم الفيزياء الحديثة.

سيعرض هذا الفصل من الوحدة نماذج الذرّة وتطوّرها مبيّنًا الأسباب العلمية التي كانت وراء هذا التطوّر، وسيفسّر الكثير من الظواهر الفيزيائية التي عجزت الفيزياء الكلاسيكية عن تفسيرها، وسيناقش أيضًا طبيعة الضوء المزدوجة والعلاقة بين الموجات والجسيمات ونظريات فيزياء الكمّ.

دروس الفصل

الدرس الأوّل
- نماذج الذرّة ونظرية الكمّ

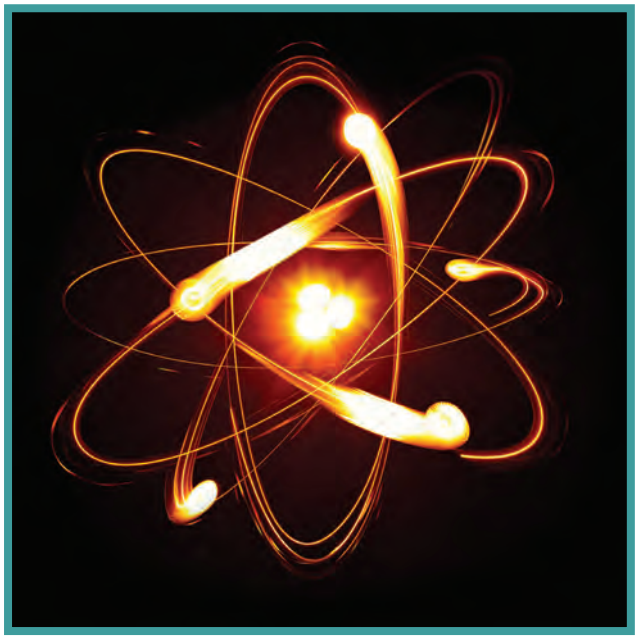
الدرس الثاني
- الموجات والجسيمات

الدرس 1-1

نماذج الذرّة ونظرية الكمّ
Atom Models and the Quantum Theory

الأهداف العامة

- يعرّف بعض نماذج الذرّة.
- يحسب أنصاف أقطار مدارات الإلكترون في ذرّة الهيدروجين بدلالة رتبة المدار.
- يعطي أمثلة على نماذج الضوء.
- يوضّح مبدأ التكميم العائد لبلانك.
- يشرح طاقة الضوء على أنّها مضاعفات لوحدة صغيرة من الطاقة.
- يفسّر ظاهرة التأثير الكهروضوئي ويعبّر عنها رياضيًّا.



(شكل 90)

تمثيل الذرّة

نحن نعلم أنّ الموادّ تتكوّن من دقائق متناهية الصغر تُعرَف بالذرّات، وقد درسنا الذرّة وكيفية تواجدها داخل المادّة لوصف حالات المادّة الثلاث. لكنّ السؤال الذي سنناقشه هو: كيف يمكننا أن نتناول تركيب الذرّة الداخلي حيث لا يمكننا رؤيتها؟ وما العلاقة بين نماذج الذرّة التي تنوّعت وتطوّرت وانبعاث الضوء؟ وما علاقة الضوء وانبعاثه باكتشاف الذرّة وتعرّف مكوّناتها؟

الاهتمام بنماذج الضوء وارتباطها بنماذج الذرّة المتعدّدة هو محور هذا الدرس.

1. نماذج الذرّة Atom Models

إنّ اهتمام العلماء بدراسة الذرّة والعمليات التي تحدث فيها حثّ العلماء على تصميم نماذج متنوّعة للذرّة اختلفت وتطوّرت مع تطوّر المفاهيم والأدوات الفيزيائية.

- كان نموذج جون دالتون John Dalton أوّل تلك النماذج. وقد اعتبر أنّ الذرّة أصغر جزء من المادّة لا يمكن تقسيمه إلى أجزاء أخرى ويحمل خواصّ المادّة.
- في العام 1897، اكتشف جوزف جون طومسون Joseph John Thomson الإلكترون، ومعه ظهر نموذج الذرّة المؤلّفة من كتلة موجَبة تحتوي على إلكترونات والمعروف بنموذج البطيخة، بحيث شبّه الإلكترونات ببذور البطيخ الموزَّعة في اللب الأحمر (الكتلة الموجَبة).
- في العام 1909، ومع تجربة إرنست رذرفورد Ernest Rutherford الذي قام بتوجيه أشعّة ألفا على صفيحة من الذهب ودراسة ارتداد بعضها وانحراف بعضها الآخر ونفاذ معظمها في المسار نفسه، اقتُرِح نموذج جديد للذرّة يقضي باعتبار الذرّة تتكوّن من نواة صغيرة وكثيفة موجَبة الشحنة ومحاطة بإلكترونات سالبة الشحنة تدور حول النواة.
- في العام 1913، طوّر العالم الدنماركي نيلز بور Niles Bohr نموذج رذرفورد، الذي اعتبر أنّ الإلكترونات تدور حول النواة في مدارات كما تدور الكواكب حول الشمس. وعرّف هذا النموذج بالنموذج الكوكبي وهو أكثر النماذج التي يتخيّلها الناس عند تخيّلهم الذرّة، علمًا أنّه قد حلّت مكان هذا النموذج نماذج أخرى أكثر تعقيدًا تُمثَّل فيها الإلكترونات بسحابة تنتشر داخل الذرّة.

ولا بدّ أن نعرف أنّ تلك النماذج الذرّية مهمّة من حيث فائدتها في فهم العمليات التي يصعب تخيّلها وليس من حيث مصداقيتها، ولهذا سنتناول النموذج الكوكبي للذرّة كنموذج يصلح لتفسير انبعاث الضوء. فالنموذج المفيد للذرّة يجب أن يتوافق مع نموذج الضوء، لأنّ معظم ما نعرفه عن الذرّة اكتشفناه من الضوء والإشعاعات الأخرى التي تنبعث من الذرّات. وسنكتشف لاحقًا أنّ حركة الإلكترونات في الذرّة تُعَدّ مصدر معظم الأضواء.

2. نماذج الضوء Light Models

على مرّ القرون، كان هناك نموذجان أساسيان للضوء: النموذج الجسيمي والنموذج الموجي. فقد كان إسحق نيوتن Isaac Newton يعتبر أنّ الضوء سيل من جسيمات متناهية الصغر، في حين كان كريستيان هيجنز يعرّف الضوء على أنّه ظاهرة موجية.

وقد دعمت هذه الظاهرة الموجية بعد قرن من الزمن النموذج الموجي للضوء حين اكتشف توماس يونج Thomas Young ظاهرة التداخل.
كما أنّ جايمس كليرك ماكسويل James Clerk Maxwell عرّف الضوء على أنّه إشعاع كهرومغناطيسي ويُعتبَر جزءًا من الطيف الكهرومغناطيسي الواسع. وقد نال النموذج الموجي للضوء دعمًا بإنتاج هاينريش هرتز Heinrich Hertz لموجات الراديو التي كان سلوكها مؤكِّدًا على ما اقترحه ماكسويل حول الطبيعة الموجية للضوء.
ولكنّ نموذج ماكسويل لطبيعة الضوء لم يكن النموذج النهائي. فبعد طرح ماكس بلانك Max Planck فكرة تكميم الطاقة، والتعرّف على ظاهرة التأثير الكهروضوئية Photo Electric Effect، عاد ألبرت أينشتاين Albert Einstein في العام 1905 ليحيي من جديد النظرية الجسيمية للضوء.

3. فرضية بلانك للتكميم

Planck's Quantum Hypothesis

وفقًا للنظرية الكلاسيكية، يصدر الإشعاع عن الشحنات المهتزّة داخل المادّة ويكون هذا الانبعاث متّصلًا (شكل 92).

(شكل 91)
الإشعاع الصادر يكون متّصلًا بحسب النظرية الكلاسيكية.

ولكنّ ظاهرة الأطياف الخطّية للذرّة والتي اكتُشِفت مع ظهور المطيافية (علم الطيف) Spectroscopy (العلم الذي يهتمّ بدراسة العلاقة بين الإشعاع والمادّة ويستخدم جهازًا يُعرَف بالمطياف)، بيّنت أنّ انبعاث الأشعّة لم يكن متّصلًا (شكل 92)، ممّا أدّى إلى وضع النظرية الكلاسيكية في موقف العاجز عن تفسير ما يتمّ ملاحظته.

(شكل 92)
الطيف المنبعث من ذرّة الهيدروجين وهو غير متّصل وهذا غير ما توقّعته النظرية الكلاسيكية.

فرضيّات بلانك:

1. الطاقة الإشعاعية (الطاقة التي تحملها الموجات الكهرومغناطيسية مثل موجات الضوء، الحرارة، اللاسلكي، الأشعة السينية، أشعة جاما) لا تنبعث ولا تمتصّ بشكل سيل مستمرّ ومتّصل إنّما تكون على صورة وحدات أو نبضات متتابعة ومنفصلة عن بعضها تُسمّى كلّ منها كمّة أو فوتون وطاقة فوتون إشعاع معيّن هي أصغر مقدار يمكن أن يوجد مستقلًّا.

2. طاقة الفوتون تتناسب طرديًّا مع تردّده فإذا كانت E ترمز لطاقة الفوتون فإنّ:

$$E \propto f$$

$$E = \text{constant} \times f$$

$$E = hf$$

حيث h مقدار ثابت يساوي (6.626×10^{-34})J.s ويُسمّى ثابت بلانك وهو النسبة بين طاقة الفوتون وتردده.

4. كمّات الضوء (طاقة الفوتون)

Quanta of Light (Photon Energy)

اعتمد أينشتاين على فكرة بلانك، الذي اقترح قبل عدّة سنوات أنّ الذرّة تبعث الطاقة وتمتصّها على شكل كمّات، ليقترح **أنّ الضوء نفسه يتكوّن من كمّات، وأنّ كمّات الضوء أو الإشعاع الكهرومغناطيسي هذه تُسمّى الفوتونات Photons.**

تتحرّك الفوتونات بسرعة ثابتة هي سرعة الضوء التي تساوي $c = (3 \times 10^8)$m/s، وهي أكبر سرعة ممكن أن يتحرّك بها أيّ شيء بحسب النظرية النسبية، علمًا أنّ العلاقة التي تربط بين الطول الموجي λ والطاقة E هي:

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

$$c = \lambda \times f$$

إنّ الطاقة الكلّية للفوتون هي نفسها طاقته الحركية، وهذه الطاقة تتناسب طرديًّا مع تردّد الفوتون، أي أنّ طاقة الفوتون تُحسَب بالعلاقة التالية:

$$E = h \times f$$

حيث إنّ f هي تردّد الفوتون و h هي ثابت بلانك.

وتمثّل هذه المعادلة أيضًا أصغر كمّية من الطاقة يمكنها أن تتحوّل إلى ضوء له تردّد f، نتيجة تغيُّر في طاقة الإلكترون عند انتقاله من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أدنى داخل الذرّة.

وعليه، نلخّص أنّ الضوء لا ينبعث بشكل مستمرّ ولكن على شكل حزم من الفوتونات. استطاع أينشتين أن يفسّر انبعاث الطيف غير المتّصل من الغازات بأنّه ينتج عن انتقال الإلكترون من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقلّ، الفرق بين طاقة المستويين ΔE يبعث بصورة ضوء فوتون له تردّد محدّد يُعطى بالعلاقة: $\Delta E_{\text{الكترون}} = \frac{hc}{\lambda} = hf = E_{\text{فوتون}}$.

إنّ طاقة الفوتون تُحسَب بحسب النظام الدولي للوَحدات بوَحدة الجول (J).
كما أنّ هناك وحدات أخرى تُستعمَل في حساب الطاقة وبخاصّة عندما تكون صغيرة مثل الإلكترون فولت (eV) حيث إنّ:

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

علمًا أنّ (1)eV تمثّل الشغل المبذول لنقل إلكترون بين نقطتين فرق الجهد بينهما (1)V.

مثال (1)

انبعث فوتون نتيجة انتقال الإلكترون من مستوى طاقة $E_1 = (-3.4)\text{eV}$ إلى مستوى طاقة $E_2 = (-13.6)\text{eV}$. أُحسب:

(أ) طاقة الفوتون المنبعث.

(ب) تردّد الفوتون المنبعث.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: مستوى الطاقة الابتدائي: $E_1 = (-3.4)\text{eV}$

مستوى الطاقة النهائي: $E_2 = (-13.6)\text{eV}$

ثابت بلانك: $h = (6.6 \times 10^{-34})\text{J.s}$

غير المعلوم: **(أ)** طاقة الفوتون المنبعث

(ب) تردّد الفوتون المنبعث

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) إنّ طاقة الفوتون المنبعث نتيجة انتقال الإلكترون تُحسَب باستخدام العلاقة التالية:

$$E = h \times f = E_1 - E_2$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$E = (-3.4) - (-13.6) = (10.2)\text{eV}$$

وتساوي بحسب النظام الدولي للوَحدات:

$$E = 10.2 \times (1.6 \times 10^{-19}) = (1.632 \times 10^{-18})\text{J}$$

(ب) إنّ تردّد الفوتون يُحسَب باستخدام العلاقة التالية:

$E = h \times f$، وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد أنّ:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{1.632 \times 10^{-18}}{6.6 \times 10^{-34}} = (2.472 \times 10^{15})\text{Hz}$$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة.

مسائل مع إجابات

1. أُحسب بوَحدة eV طاقة فوتون له تردّد (2.6×10^{15}) Hz، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})\text{J.s}$.

الإجابة: $E = (10.725)\text{eV}$

2. أُحسب تردّد فوتون انبعث من سقوط إلكترون من مستوى الطاقة $E_1 = (-2.6 \times 10^{-19})\text{J}$ إلى مستوى الطاقة $E_2 = (-4.6 \times 10^{-19})\text{J}$ في ذرّة مادّة ما، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})\text{J.s}$

الإجابة: $f = (3.03 \times 10^{14})\text{Hz}$

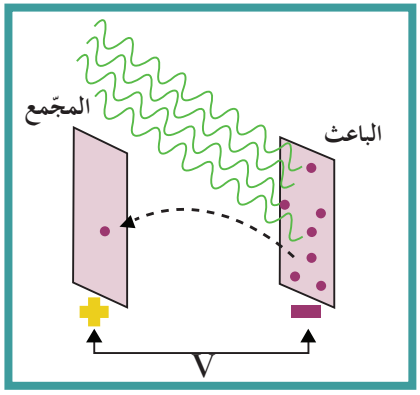
3. أُحسب بوَحدة الجول كمّية الطاقة التي يجب أن تمتصّها ذرّة مادّة الهيدروجين لينتقل الإلكترون داخلها من مستوى الطاقة $(-13.6)\text{eV}$ إلى مستوى الطاقة $(-3.4)\text{eV}$.

الإجابة: $E = (1.632 \times 10^{-18})\text{J}$.

5. التأثير الكهروضوئي The Photoelectric Effect

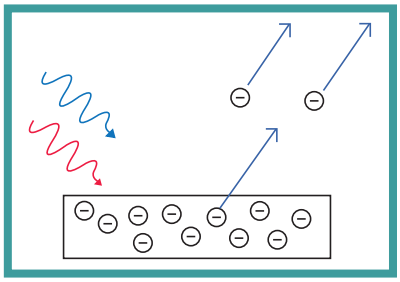
إنّ انبعاث الإلكترونات من فلزات معيّنة، نتيجة سقوط ضوء له تردّد مناسب، يُعرَف بالتأثير الكهروضوئي Photoelectric Effect، وتُسمّى الإلكترونات المنبعثة، نتيجة سقوط الضوء، إلكترونات ضوئية Photoelectrons.

اكتشف الباحثون، وأوّلهم العالم لينارد Lenard، أنّ سقوط ضوء فوق بنفسجي على لوح معدني حسّاس للضوء يُسمّى الباعث يؤدّي إلى انبعاث إلكترونات من السطح المعدني نحو سطح آخر مقابل له يُسمّى المجمّع. و بالتالي يكون الضوء قد أعطى الإلكترونات كمّية كافية من الطاقة سمحت لها بالتحرّر من الفلز. هذا يعني أنّ تلك الطاقة قد تحوّلت إلى طاقة حركية للإلكترون، فيتولّد تيّار كهربائي يمكن قياسه بواسطة ميكروأميتر متّصل على التوالي مع مصدر جهد متّصل قطبه السالب بالباعث وقطبه الموجَب بالمجمّع (شكل 93).



(شكل 93)

وقد لوحظ نتيجة عدّة تجارب أنّ الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة لا تتأثر بشدّة الضوء، إذ يمكن، على سبيل المثال، أن تبعث طاقة ضوء أزرق خافت (شدّته صغيرة) أو بنفسجي إلكترونات من سطوح معدنية معيّنة، في حين لا يستطيع ضوء أحمر ساطع جدًّا (شدّته كبيرة) أن يفعل ذلك (شكل 94). وهذا يتناقض مع الفيزياء الكلاسيكية التي كانت تعتقد أنّ زيادة شدّة الضوء الساقط على الفلزّ يزيد من معدّل امتصاص الإلكترونات للطاقة، مهما كان تردّد الضوء، على عكس ما أثبتت التجارب.



(شكل 94)

بإمكان طاقة ضوء أزرق خافت أن تبعث إلكترونات من سطوح معدنية.

فقرة إثرائية

بين الفيزياء الكلاسيكية وفيزياء الكمّ

تستخدم الفيزياء الكلاسيكية قوانين الميكانيكا الكلاسيكية مثل قوانين نيوتن لدراسة حركة الأجسام الكبيرة (العينية) في عالم الماكرو، بينما تحتاج دراسة حركة الجسيمات الدقيقة والذرّات المجهرية في عالم الميكرو (المجهري) إلى ميكانيكا الكمّ كأحد فروع فيزياء الكمّ.

إن كانت الفيزياء الكلاسيكية تتميّز بعدم وجود حدود للدقّة في قياسات التجارب، إذ يمكن مبدئيًّا إجراء قياسات أكثر دقّة باستخدام أدوات أكثر ضبطًا، فإنّ مبدأ عدم اليقين هو السمة الأساسية لفيزياء الكمّ. إنّ مبدأ عدم اليقين ليس نتيجة مشكلة في النظام أثناء القياس أو عدم دقّة الأدوات المستخدَمة بل هو ناتج عن الطبيعة الموجية للجسيمات.

فبحسب العالم هايزنبرج Heisenberg، إنّه من المستحيل قياس موقع الجسيم وكمّية حركته في اللحظة نفسها بدقّة عالية، فكلّما كانت دقّة القياس لكمّية حركته عالية، قلّت معرفتنا لموقعه والعكس صحيح. وعليه، فإنّ بنية فيزياء الكمّ تقوم على أساس الاحتمالات التي تحكم تفاعلات الأجسام المجهرية، بينما تقوم الفيزياء الكلاسيكية على قوانين الحتمية.

فسّر أينشتاين التأثير الكهروضوئي باعتبار أنّ الضوء فوتونات وأنّ امتصاص فوتون بواسطة الذرّة هو المهمّ في هذه العملية، بحيث يعطي الفوتون الواحد عند سقوطه على سطح الفلز طاقته الكاملة التي تتناسب مع تردّده إلى إلكترون واحد ليخرج من الفلز.

وهذا يفسّر أنّ عدد الفوتونات التي تصطدم بالفلز ليس له علاقة بإمكانية انبعاث الإلكترونات، فالعامل الأساسي والمهمّ في تحرير الإلكترون من الفلز هو تردّد الضوء، أي طاقة الفوتون وليس سطوع الضوء وشدّته (عدد الفوتونات).

كما أنّ ارتباط الإلكترون بالذرّة يحدّد كمّية الطاقة التي يجب تزويده بها ليتحرّر، فالإلكترونات شديدة الارتباط بالذرّة تحتاج إلى امتصاص كمّية أكبر من الطاقة مقارنة بالإلكترونات قليلة الارتباط.

وإنّ أقلّ مقدار للطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون من سطح الفلز تُعرَف بدالة الشغل Work Function وتساوي:

$$\Phi = h.f_0$$

حيث إنّ f_0 تمثّل تردّد العتبة وهي خاصّية من خواصّ الفلز.

المادّة	تردّد العتبة f_0 (Hz)
ألومنيوم Aluminum	9.846×10^{14}
رصاص Lead	9.99×10^{14}
زنك Zinc	1.038×10^{15}
حديد Iron	1.086×10^{15}
نحاس Copper	1.134×10^{15}
فضّة Silver	1.141×10^{15}
نيكل Nickel	1.209×10^{15}
ذهب Gold	1.231×10^{15}
بلاتينوم Platinum	1.532×10^{15}

جدول (2)
مقدار تردّد العتبة لعدّة فلزات

وعليه، نستنتج أنّ أيّ ضوء يسقط على سطح ما له تردّد أقلّ من تردّد العتبة للسطح ($f < f_0$) لن يستطيع تحرير إلكترون لأنّ طاقته تكون أقلّ من دالة الشغل Φ. أمّا الضوء ذو تردّد $f > f_0$، فتكون له طاقة E قادرة على انتزاع الإلكترون من الفلز وتزويده بطاقة حركية KE.

ويمكن التعبير عن ذلك رياضيًّا باستخدام العلاقة:

$$E = \Phi + KE$$

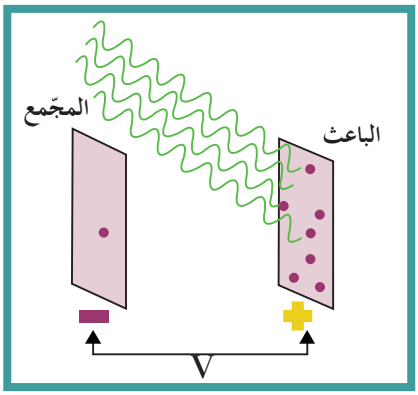
أي

$$h.f = h.f_0 + \frac{1}{2} m.v^2$$

فقرة إثرائية

التنبؤ والفوضى

تنقسم الأنظمة في الفيزياء إلى أنظمة مرتّبة وأنظمة فوضوية (عشوائية). إنّ التوقّع والتنبّؤ في الأنظمة المرتّبة، سواء أكانت نيوتنية أم مكمّمة، يعتمدان على معلوماتنا حول الشروط الأوّلية. فمعرفتنا بالشروط الأوّلية لأيّ نظام مرتّب يمكننا التوقّع والتنبّؤ عنه. فعلى سبيل المثال، في عالم الأجسام العينية، يمكننا أن ننطلق من معرفتنا الدقيقة للشروط الابتدائية للنظام لتوقّع موضع كوكب ما بعد فترة، أو مكان هبوط صاروخ بعد إطلاقه. كذلك الأمر في عالم الأجسام الكمّية متناهية الصغر نستطيع أن نتنبّأ عن موضوع احتمال وجود الإلكترون في ذرّة، أو فترة الانحلال لجسيم له نشاط إشعاعي. أمّا في الأنظمة الفوضوية أو المشوّشة Chaotic Systems، سواء أكانت نيوتنية أم مكمّمة، فهي غير خاضعة لنظام معيّن وللتنبّؤ فالاختلافات الصغيرة جدًّا في الشروط الابتدائية للأنظمة المشوّشة تؤدّي إلى نتائج مختلفة في النهاية. ومن الأمثلة على الأنظمة المشوّشة (الفوضوية) الانسياب المضطرب للمياه والطقس. فمهما كانت معرفتنا واسعة حول الشروط الأوّلية لقطعة خشب طافية، لا نستطيع توقّع موضعها بعد فترة من سريانها في مجرى النهر أو الشلال.



(شكل 95)

وتجدر الإشارة إلى أنّ عكس أقطاب البطّارية على السطح الباعث والمجمّع (شكل 95) يؤدّي إلى نشوء مجال كهربائي يعاكس حركة الإلكترونات بين السطحين ويبطئ سرعتها. أمّا أكبر فرق جهد يؤدّي إلى إيقاف الإلكترونات يُسمّى جهد القطع فيؤدّي إلى إيقاف الإلكترونات حيث:

$$KE = e.V_{cut}$$
$$V_{cut} = \frac{KE}{e}$$

مثال (2)

سقط ضوء تردّده (10^{15})Hz على سطح ألومنيوم تردّد العتبة له (9.78×10^{14})Hz.

علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})$J.s.

(أ) أُحسب طاقة الفوتون الساقط على سطح الألومنيوم.

(ب) أُحسب دالة الشغل Φ.

(جـ) هل الفوتون قادر على انتزاع الإلكترون؟

(د) أُحسب الطاقة الحركية للإلكترون المنبعث.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: تردّد الفوتون الساقط: $f = (10^{15})$Hz

تردّد العتبة للسطح: $f_0 = (9.78 \times 10^{14})$Hz

ثابت بلانك: $h = (6.6 \times 10^{-34})$J.s

غير المعلوم: **(أ)** طاقة الفوتون ؟ $= E$

(ب) دالة الشغل ؟ $= \Phi$

(جـ) تفسير ما إذا كان باستطاعة الفوتون انتزاع الإلكترون.

(د) الطاقة الحركية ؟ $= KE$

فقرة إثرائية

فيزياء الألعاب الرياضية

الفوضى على المنحدرات

إذا جلست وصديقك كل منكما على لوحة تزلّج على قمّة منحدر أملس تمامًا، ثمّ انطلقتما من موضعين متجاورين بالسرعة نفسها تقريبًا، فإنّكما سوف تتّبعا مسارات متماثلة تنتهي بالقرب من بعضها عند قاع المنحدر. هذا السلوك خاضع لنظام معيّن مرتب، وان الاختلافات الصغيرة في الشروط عند البداية تُحدث بدورها اختلافات صغيرة في الشروط عند النهاية. ولكن، إذا كان منحدر التزلّج مليئًا بمئات البروز، فإنّك غالبًا ما ستجد بعد الارتداد والارتجاج أنّك في النهاية تبعد عدّة أمتار عن صديقك أسفل المنحدر، بغضّ النظر عن مدى اقترابك من الشروط الأوّلية. هذا يمثل السلوك الفوضوي حيث غالبًا ما تُحدث الاختلافات الصغيرة عند البداية اختلافات كبيرة في الشروط عند النهاية، تمنع من التنبؤ بالمكان الذي سوف تنتهي عنده. ومن المثير للاهتمام، أنّ التنبّوء ببعض من الفوضى ليس مستحيلًا. فإذا قارنت وصديقك ملاحظاتكما بعد هبوط المنحدر الذي تعلوه البروز، فإنّك ستجد أنّ لديك بعض التجارب المتشابهة. إذ من الممكن أن تلتفّ حول عدّة بروز التي في الطريق نفسها، كذلك لا يمكنك أبدًا الصعود مباشرة فوق قمّة البروز. وهذا يعني أنّ هناك قواعد للفوضى. لقد درس العلماء كيفية معالجة الفوضى رياضيًّا وكيفية تعرّف أجزائها المرتّبة

مثال (2) تابع

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) تُحسَب طاقة الفوتون الساقط باستخدام العلاقة التالية:

$E = h.f$، وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$E = 6.6 \times 10^{-34} \times 10^{15} = (6.6 \times 10^{-19})J$$

(ب) تُحسَب دالة الشغل بالمعادلة التالية:

$$\Phi = h.f_0$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$\Phi = 6.6 \times 10^{-34} \times 9.78 \times 10^{14} = (6.4548 \times 10^{-19})J$$

(جـ) إنّ طاقة الفوتون الساقط أكبر من دالة الشغل، وبالتالي يستطيع الفوتون انتزاع الإلكترون من سطح الألومنيوم.

(د) تُحسَب الطاقة الحركية للإلكترون باستخدام علاقة أينشتاين التالية:

$$KE = E - \Phi$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد أنّ:

$$KE = (6.6 \times 10^{-19}) - (6.4548 \times 10^{-19}) = (1.452 \times 10^{-20})J$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وهي متوقّعة لأنّ تردّد الفوتون الساقط أكبر من تردّد العتبة.

6. حساب أنصاف أقطار مدارات الإلكترون في ذرّة الهيدروجين

Calculating the Radiuses of the Electrons Orbits in a Hydrogen Atom

باستخدام النموذج الذرّي لبور وبالاستعانة بقوانين الفيزياء الكلاسيكية، يمكن حساب أنصاف أقطار مدارات الإلكترون رياضيًّا مستخدمين قوانين التفاعل الكهربائي بين الشحنة الموجَبة للبروتون في النواة وشحنة الإلكترون السالبة في ذرّة الهيدوجين.

يدور الإلكترون في ذرّة الهيدروجين حول النواة بتأثير قوّة تجاذب كهربائية نتيجة انجذابه للبروتون الموجود في النواة. وبحسب المعادلة التالية:

$$F = \frac{Kq^2}{r^2}$$

فقرة إثرائية

الأحجام النسبية للذرات

أكّد نموذج بور الذرّي تواجد الإلكترونات على مدارات منفصلة ومتباعدة ولكن السؤال هو: هل هناك تناسُب بين عدد الإلكترونات المدارية وحجم النواة؟ بحسب نموذج بور أنّ أنصاف أقطار مدارات الإلكترون في الذرّة تنتج من تفاعل شحنة البروتون الموجَبة في ذرّة الهيدروجين كهربائيًّا مع إلكترون في مدار له نصف قطر محدّد. وبحسب معادلة قوّة الجذب الكهربائية نتوقّع أنّ النواة التي تحتوي بروتونين، أي مقدار شحنة يساوي ضعف ما كان عليه في ذرّة الهيدروجين، فإنّ الإلكترون المداري ينجذب إلى مدار أضيق له نصف قطر أقلّ من السابق بمقدار النصف. ولكنّ هذا لا يحدث لأنّ الشحنة الموجَبة المزدوجة في النواة تتجاذب مع إلكترون ثانٍ والشحنة السالبة للإلكترون الثاني تُضعِف تأثير النواة الموجَبة لتكون ذرّة هيليوم متعادلة كهربائيًّا. وكلّما تتابع ازياد عدد البروتونات في النواة يزداد عدد الإلكترونات وعدد المدارات على التوالي حتّى نصل إلى رقم ذرّي أكبر من 100، ونحصل بالتالي على ذرّات مشعّة. إنّ النواة التي تزداد شحنتها، يزداد عدد إلكتروناتها في المدارات الخارجية بينما تنكمش مداراتها الداخلية، وتقترب أكثر من النواة بسبب زيادة قوّة الجذب الكهربائية مع النواة. وهذا يعني أنّ أنصاف أقطار ذرّات العناصر الثقيلة ليست أكبر بكثير من أنصاف أقطار ذرّات العناصر الأخفّ. فنصف قطر ذرّة اليورانيوم ذات الرقم الذرّي 92، أكبر من نصف قطر ذرّة الهيدروجين ذات الرقم الذري 1 بثلاث مرّات على الرغم من أنّ كتلة ذرّة اليورانيوم أكبر بـ 238 مرّة من كتلة ذرّة الهيدروجين.

وبما أنّ قوّة جذب الإلكترون هي قوّة باتّجاه مركز النواة، وبإهمال كتلة الإلكترون، فإنّ القوّة الكهربائية هي قوّة جاذبة مركزية تؤدّي إلى حركة دائرية منتظِمة. وبتطبيق قانون نيوتن للحركة، نكتب:

$$F = \frac{mv^2}{r} = \frac{Kq^2}{r^2}$$

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Kq^2}{r^2}$$

$$v^2 = \frac{Kq^2}{r.m} \qquad (1)$$

وافترض بور أن كمية الحركة الزاوية تكون في صورة كمات أي أن

$$m.v.r = \frac{n.h}{2\pi}$$

وبتربيع المعادلة السابقة، نحصل على:

$$m^2v^2r^2 = \frac{n^2h^2}{4\pi^2} \qquad (2)$$

وبالتعويض في المعادلة **(1)** والمعادلة **(2)** نحصل على:

$$m^2 \times (\frac{Kq^2}{m.r}) \times r^2 = \frac{n^2h^2}{4\pi^2}$$

$$r_n = \frac{n^2h^2}{4\pi^2.m.K.q^2} = r_1n^2$$

وبالتعويض عن مقدار كتلة الإلكترون، وثابت بلانك، ومقدار شحنة الإلكترون، نجد أنّ أنصاف أقطار مستويات الطاقة تساوي:

$$r_n = (5.29 \times 10^{-11}) \times n^2$$

في حالة استقرار الذرّة، أي عندما يكون الإلكترون في المستوى الأوّل ويكون نصف قطر المستوى الأوّل للطاقة يساوي $r_n = (5.29 \times 10^{-11})m$ حيث $n = 1$، يساوي نصف القطر المستوى الأوّل للطاقة $r_n = (5.29 \times 10^{-11})m$ ويُسمّى نصف قطر بور.

وبهذا تساوي أنصاف أقطار مستويات الطاقة بالنسبة إلى نصف قطر بور المعادلة التالية:

$$r_n = r_1n^2$$

تسمح هذه المعادلة بحساب أنصاف أقطار مستويات الطاقة التي يمكن أن يتواجد عليها الإلكترون المثار بمقدار محدّد من الطاقة. وقد أظهرت رياضيًّا أنّ هذه المستويات منفصلة وتبعد عن النواة بمضاعفات نصف قطر بور. فالمدار الأوّل يبعد نصف قطر بور $r_1 = r_B$، ويبعد نصف قطر المدار الثاني أربعة أضعاف نصف قطر بور $r_2 = 4r_B$، بينما يبعد نصف قطر المدار الثالث تسعة أضعاف نصف قطر بور $r_3 = 9r_B$ ...

وعليه، يكون نموذج بور، رغم بدائيته وعدم نضجه، قد أكّد أنّ مدارات الإلكترونات (شكل 96) في الذرّة منفصلة، وبنى بالتالي نموذجًا مختلفًا عمّا سبقه من نماذج قبل القرن العشرين.

(شكل 96)
تمثيل الذرّة بحسب نموذج بور.

مراجعة الدرس 1-1

أوّلًا – عرّف كمّة الضوء.

ثانيًا – ما العلاقة بين كمّة الضوء (طاقة الفوتون) وتردّده؟

ثالثًا – أيّ ضوء له طاقة فوتون أكبر، الضوء الأحمر أم الأزرق علمًا أن الطول الموجي للأزرق (420)μm وطول الموجي للأحمر (700)μm ؟

رابعًا – عرّف ظاهرة التأثير الكهروضوئي.

خامسًا – هل تدعم ظاهرة التأثير الكهروضوئي النموذج الجسيمي للضوء أو النموذج الموجي؟

سادسًا – علِّل، مستخدِمًا تفسير أينشتاين، لماذا يستطيع الضوء الأزرق الخافت انبعاث إلكترونات من سطح حسّاس للضوء بينما لا يستطيع ضوء أحمر ساطع فعل ذلك؟

سابعًا – هل يبعث الضوء الساطع إلكترونات أكثر من ضوء خافت له التردّد نفسه؟ علِّل إجابتك.

ثامنًا – أُحسب طاقة فوتون ضوء في الفراغ طوله الموجي (0.6)μm، علمًا أنّ سرعة الضوء في الفراغ تساوي $c = (3 \times 10^{8})$m/s وثابتة بلانك $h = (6.6 \times 10^{-34})$J.s.

تاسعًا – انتقل إلكترون داخل الذرّة من مستوى طاقة $E_1 = (-1.51)$eV إلى مستوى طاقة $E_2 = (-3.4)$eV علمًا أن ثابتة بلانك $h = (6.6 \times 10^{-34})$J.s. أُحسب:

(أ) طاقة الفوتون المنبعث نتيجة انتقال الإلكترون.

(ب) تردّد الفوتون المنبعث.

عاشرًا – سقط ضوء تردّده $f = (1.5 \times 10^{15})$Hz على سطح ألومنيوم تردّد العتبة له $f_0 = (9.92 \times 10^{14})$Hz، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})$J.s وأنّ كتلة الإلكترون تساوي $m = (9.1 \times 10^{-31})$kg.

(أ) أُحسب طاقة الفوتون الساقط على سطح الألومنيوم.

(ب) أُحسب دالة الشغل Φ.

(جـ) اِستنتج إن كان الفوتون قادرًا على انتزاع الإلكترون.

(د) أُحسب الطاقة الحركية للإلكترون المنبعث.

(هـ) أُحسب سرعة الإلكترون لحظة تركه سطح الألومنيوم.

(و) أُحسب مقدار فرق جهد القطع بين سطح المجمّع والباعث والذي يمنع الإلكترونات من الانتقال بينهما.

الأهداف العامة

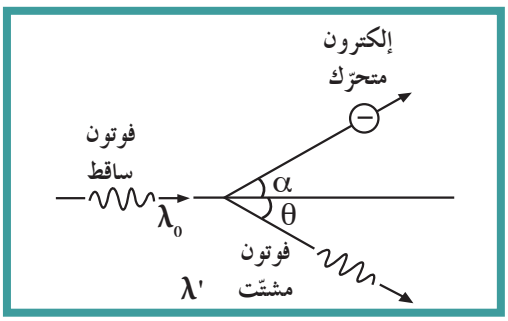
- يعرف تأثير كومبتون.
- يبرهن أنّ للضوء طبيعة جسيمية.
- يبرهن أنّ للإلكترونات طبيعة موجية.
- يصف الخواصّ الموجية للمادّة.
- يستخدم نموذج دي برولي لموجات المادّة في الذرّة لشرح الخطوط التي تظهر في أطياف الذرّة.

1. تأثير كومبتون Compton Effect

وضّح تفسير ظاهرة التأثير الكهروضوئي أنّ الإلكترون الحرّ الموجود على سطح الفلزّ يأخذ طاقة الفوتون المناسبة ليتحرّر من سطح الفلزّ ويحوّل ما يتبقّى من طاقة الفوتون الساقط إلى طاقة حركية، وهذا يعني اختفاء الفوتون الساقط وتحوّله إلى طاقة حركية بعد انطلاق الإلكترون. وهذا التفسير لظاهرة التأثير الكهروضوئي جعل فهمنا لكمّة الطاقة أو الفوتون مرتبطًا بانبعاثه وامتصاصه فحسب، إذ إنّه لم يظهر وجود فوتون له الطبيعة الجسيمية. ولكن في العام 1923، أجرى الفيزيائي الأميركي هولي كومبتون Holly Compton تجربة ساهمت في اكتشافه تأثير جديد أصبح يُعرَف في ما بعد بتأثير كومبتون.

وجّه كومبتون حزمة من الأشعّة السينية على قطعة من الجرافيت، ولاحظ أنّ طول موجة الأشعّة المتشتّتة λ من الجرافيت أكبر من طول موجة الأشعّة الساقطة عليه λ_0. وقد فسّر كومبتون نتيجة تجربته بما يلي:

إنّ الأشعّة السينية الساقطة هي مجموعة من الفوتونات تحمل طاقة تساوي: $E = hf$. ولكن عند اصطدام الفوتون بالإلكترون الحرّ الساكن بالجرافيت، ينتقل جزء من طاقة الفوتون إلى الإلكترون، فيخرج الالكترون منحرفًا بزاوية α مع اتّجاه حركة الفوتون، بينما يتشتّت الفوتون الساقط وينحرف الفوتون بزاوية θ بالنسبة لاتجاهه الأصلي وبطاقة $E = hf'$ أقلّ من طاقته قبل التصادم، ما يجعل طول موجة الأشعّة المشتّتة أكبر من طول موجة الأشعّة الساقطة (شكل 97).



(شكل 97)

باستخدام قانون حفظ الطاقة، نستنتج أنّ طاقة الإلكترون الحركية تساوي طرح طاقة الفوتون بعد التصادم من طاقة الفوتون قبل التصادم، أي:

$$KE_e = h\,(f - f')$$

واستطاع كومبتون، من خلال هذه التجربة، ومستخدمًا قوانين أينشتاين للنسبية التي تبرهن أنّ كمّية الحركة الفوتون باتّجاه محدّد تساوي قسمة ثابت بلانك على الطول الموجي كما يلي:

$$E = mc^2 = mcc \text{ ،}$$

$$hf = Pc$$

$$P = \frac{hf}{c} = \frac{hf}{f\lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

كما استطاع كومبتون أن يستنتج أنّ كمّية الحركة محفوظة، حيث إنّ التصادم بين الفوتون والإلكترون هو تمامًا مثل التصادم المرن بين الأجسام المادّية. وبما أنّ كمّية الحركة هي من خواصّ الجسيمات، فقد استطاع كومبتون بذلك أن يؤكّد الطبيعة الجسيمية للموجة الكهرومغناطيسية.

وتوصّل كومبتون أيضًا، وباستخدام قوانين حفظ الطاقة وكمّية الحركة النسبية لأينشتاين، إلى إيجاد معادلة الفرق بين طول الموجة المتشتّتة والموجة الساقطة $\Delta\lambda$ والتي تُسمّى إزاحة كومبتون:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \left(\frac{h}{m_e \times c}\right)(1 - \cos\theta)$$

نستنتج من تفسير ظاهرة التأثير الكهروضوئي لأينشتاين ومن تفسير تأثير كومبتون أنّ الفوتونات تتفاعل مع المادّة بحسب طاقتها وطبيعة المادة، فإمّا تُمتَصّ بالكامل مطلِقة إلكترونًا حرًّا، كما في ظاهرة التأثير الكهروضوئي، أو تتشتّت بعد أن تفقد جزءًا من طاقتها من دون أن تتغيّر سرعتها كما في تأثير كومبتون. وفي كلتا الحالتين، تتأكّد الطبيعة الجسيمية لموجة الضوء، ونتحقّق من أنّ للضوء طبيعة مزدوجة.

مثال (1)

حزمة من الأشعّة السينية لها طول موجي $\lambda_0 = (0.2)\text{nm}$ سقطت على جسيم مادّي. يصنع الفوتون المتشتّت زاوية مقدارها $(45°)$ بالنسبة إلى اتّجاه الفوتون الساقط. أُحسب الطول الموجي للفوتون المتشتّت بتلك الزاوية، علمًا أنّ كتلة الإلكترون تساوي $(9.1 \times 10^{-31})\text{kg}$ وثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})\text{J.s}$.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: الطول الموجي للفوتون الساقط: $\lambda_0 = (0.2)\text{nm}$

مثال (1) تابع

زاوية انحراف الفوتون المتشتّت: $\theta = (45°)$

كتلة الإلكترون: $m = (9.1 \times 10^{-31})kg$

ثابت بلانك: $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$

غير المعلوم: طول موجة الفوتون المتشتّت: $\lambda = ?$

1. أُحسب غير المعلوم.

باستخدام المعادلة التالية:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = (\frac{h}{m \times c})(1 - \cos\theta)$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد أنّ:

$$\Delta\lambda = (\frac{6.6 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^{8}})(1 - \cos 45) = (7.1 \times 10^{-13})m$$

$$\lambda = \Delta\lambda + \lambda_0 = (0.20071)nm$$

2. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ الطول الموجي للفوتون المتشتّت أكبر من الطول الموجي للموجة الساقطة، وهذا متوقّع بحسب كومبتون.

2. الطبيعة الموجية للجسيمات

Wave Aspect of Particles

إنّ السؤال الذي طُرِح في مقدّمة الدرس حول إمكانية أن يكون للجسيمات طبيعة موجية قد حيّر الفيزيائي الفرنسي لويس دي برولي Louis de Broglie عام 1924 وهو ما زال طالبًا. وقد منحته الإجابة عليه درجة الدكتوراه في الفيزياء، ونال بعدها جائزة نوبل في الفيزياء.

افترض دي برولي في رسالته لنيل الدكتوراه أنّ للموادّ كلها طبيعة مزدوجة أي طبيعة الجسيمات وطبيعة الموجات.

وانطلق من أنّ الطول الموجي λ للفوتون يساوي ثابت بلانك h مقسومًا على كمّية الحركة P للفوتون، ($\lambda = \frac{h}{P}$) ليفترض أنّ هذا يمكن تطبيقه على الجسيمات. فأيّ جسيم يتمتّع بسرعة وبكتلة تكون له كمّية حركة، فالجسم المتحرّك ترافقه موجة مادّية أو موجة دي برولي. يمكن حساب طوله الموجي λ بالعلاقة التالية:

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

ويُسمّى الطول الموجي للجسيم طول موجة دي برولي. إنّ الكتل المتحرّكة ترافقها موجة تُسمّى الموجة المادية أو موجة دي برولي.

تُظهر العلاقة الرياضية التناسب العكسي بين الطول الموجي وكمّية حركة الجسيم، فكلّما كانت كمّية الحركة أكبر كان الطول الموجي أصغر.

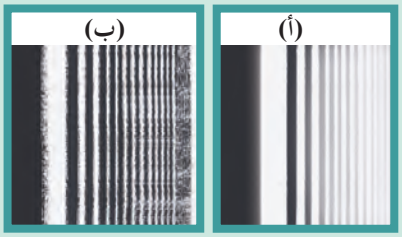
إنّ الطول الموجي للجسيم المتناهي الصغر، مثل الإلكترون على سبيل المثال، والمتحرّك بسرعة كبيرة يكون أصغر من الطول الموجي للضوء المرئي. وقد صَعُب على العلماء تبنّي نظرية دي برولي إذ اعتبروها مجرّد فرضية نظرية غير قابلة للتطبيق عمليًّا.

ولكنّ العالِمين دافيسون Davisson وجرمر Germer توصّلا بعدها إلى استنتاج أنّ حزمة من الإلكترونات يمكنها أن تُحدِث ظاهرة حيود على بلّورة من النيكل مشابهة لظاهرة حيود الموجات الضوئية (شكل 98).
وتمكّن هذان العالمان تجريبيًّا من حساب مقدار طول موجة الإلكترون والتي تطابقت مع معادلة دي برولي. وبهذا أصبحت نظرية دي برولي حقيقة لا يمكن رفضها، وتحقّق العلماء من إمكانية حساب الطول الموجي للجسيمات باستخدام ظاهرة الحيود الناتجة عن حزم منها.
وأثبتت التجارب لاحقًا أنّ حزمة من الإلكترونات يمكنها أن تشكّل ظاهرة التداخل بشروط تداخل الضوء نفسها.
وبالمقارنة مع الفوتونات، افترض دي برولي أنّ التردّد الموجي للجسيمات الذي يُسمّى تردّد دي برولي يمكن حسابه بالمعادلة التالية للتردّد الموجي للجسيمات:

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

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

حيث إنّ E تساوي طاقة الجسيم وh تساوي ثابت بلانك.
وبهاتين المعادلتين، يكون دي برولي قد أكّد على الطبيعة المزدوجة للجسيمات، إذ إنّها تتمتّع بطاقة وكتلة وتردّد وطول موجي.
ومن التطبيقات التكنولوجية المهمّة على الخواصّ الموجية للجسيمات نذكر الميكروسكوب الإلكتروني (شكل 99) الذي يسمح بتعرّف تفاصيل دقيقة جدًّا لعيّنات لا يمكن تعرّفها بالميكروسكوبات الضوئية.
يعتمد تمييز التفاصيل الدقيقة للأجسام على قوّة تمييز الميكروسكوب التي تعتمد بدورها على الطول الموجي للضوء المستخدَم على الجسم (العيّنة) لرؤيته. ومن المستحيل تمييز تفاصيل أجسام لها أبعاد أصغر من الطول الموجي للضوء المستخدَم. ولكن عند استخدام موجات الإلكترون، تُقلّل زيادة سرعة الإلكترون مقدار الطول الموجي، وبالتالي ترفع قوّة التمييز وتسمح بتحديد أدقّ التفاصيل التي عجز الميكروسكوب الضوئي عن تحديدها (شكل 100).



(شكل 98)
الأهداب الناتجة عن حيود حزمة من الإلكترونات (ب).
والأهداب الناتجة عن الضوء (أ).

(شكل 99)
الميكروسكوب الإلكتروني

(شكل 100)
الميكروسكوب الضوئي

مثال (2)

أُحسب طول موجة دي برولي لجسم كتلته (20)g يتحرّك بسرعة (330)m/s، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$.

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلِّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: كتلة الجسم: $m = (20)g$

سرعة الجسم: $v = (330)m/s$

ثابت بلانك: $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$

غير المعلوم: طول موجة دي برولي: $\lambda = ?$

2. **أُحسب غير المعلوم.**

باستخدام المعادلة التالية:

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{m.v}$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد أنّ:

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{20 \times 10^{-3} \times 330} = (10^{-34})m$$

3. **قيِّم:** هل النتيجة مقبولة؟

الطول الموجي للجسم صغير جدًّا، ما يشير إلى صعوبة الكشف عن صفات موجية لهذا الجسم.

3. موجات الإلكترون Electron Waves

كان نيل بور Niels Bohr قد وضع النموذج الكوكبي للذرّة مستفيدًا من مبدأ تكميم الطاقة العائد لبلانك (شكل 101)، ليفسّر ما أثبتته التجارب من أطياف ذرّات العناصر Atomic Spectrum نتيجة انبعاث موجات محدّدة التردّد من الذرّة.

فقد أشار بور في نموذجه الذرّي إلى اختلاف طاقة الإلكترون باختلاف موقعه على المدارات المختلفة حول النواة والتي وصفها بأنّها مستويات طاقة. وأشار أيضًا إلى أنّ الإلكترونات تشغل أقلّ مستويات من الطاقة الموجودة في الذرّة وأنّ الإلكترون المتحرّك في مداره له كمّية حركة زاوية محدّدة من مضاعفات $\frac{h}{2\pi}$، أي أنّ $L = n\frac{h}{2\pi}$.

مسائل مع إجابات

1. أُحسب طول موجة دي برولي لإلكترون كتلته $m = (9.1 \times 10^{-31})kg$ يتحرّك بسرعة مقدارها (107)m/s، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$.

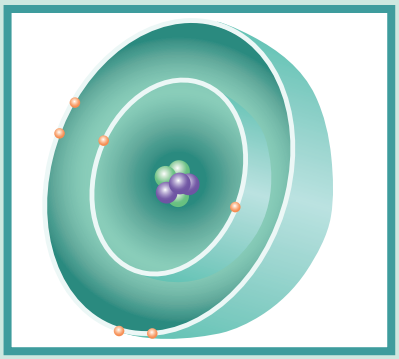
الإجابة: $(6.78 \times 10^{-6})m$

2. أُحسب سرعة كرة كتلتها (0.17)kg إذا كان طول موجة دي برولي يساوي $(1.3 \times 10^{-34})m$، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$.

الإجابة: (29.86)m/s

3. أُحسب سرعة إلكترون كتلته $m = (9.1 \times 10^{-31})kg$ إذا كان طول موجة دي برولي يساوي $(7.28 \times 10^{-11})m$؟

الإجابة: $(9.96 \times 10^{6})m/s$



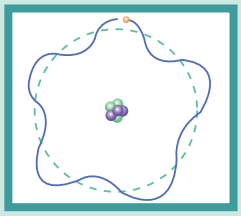
(شكل 101)
نموذج بور للذرّة

(شكل 102)
نموذج لذرّة الهيدروجين

وأضاف بور أنّ الإلكترون يمكنه أن يقفز إلى مستوى طاقة أعلى عندما يكتسب طاقة إضافية مناسبة. ففي أنابيب التفريغ الغازية التي تُستخدَم في الإعلانات واللافتات على سبيل المثال، يندفع تيّار الإلكترونات المصطدِم بذرّات الغاز الموجودة في الأنبوب، فيثير إلكتروناتها ويدفعها إلى مستويات طاقة أعلى. وبعد عودتها إلى مستويات طاقة أقلّ، تبعث فوتونات لها طاقة محدّدة تساوي فرق الطاقة بين المستويين في الذرّة، ممّا يؤدّي إلى تشكيل الطيف الخطّي للذرّة الذي يحدّد خواصّها ويسمح للفيزيائيين، عند دراسته، بحساب مستويات الطاقة في ذرّات الموادّ المختلفة.

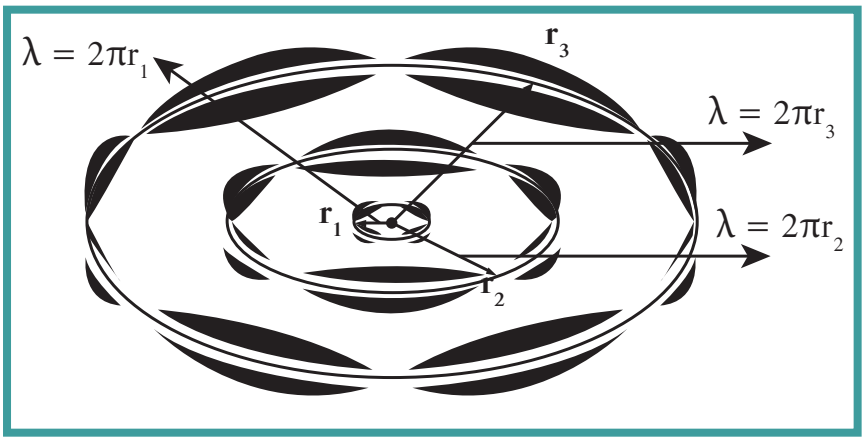
عجز نموذج بور عن تفسير سبب شغل الإلكترونات مستويات طاقة محدّدة في الذرّة وسبب وجود الإلكترونات على مسافات محدّدة من نواة الذرّة. ولكن ما توصّل إليه دي برولي من حيود الإلكترونات والطبيعة الموجية للجسيمات جعلنا نفكّر بالإلكترون بطريقة مختلفة جدًّا عمّا كان سائدًا في نماذج الذرّة السابقة وأدّى إلى وضع نموذج الموجات المادّية Matter Waves في الذرّة.

وفقًا لنظرية دي برولي للموجات المادّية، يُعتبَر الإلكترون موجة وليس جسيمًا يدور حول النواة كما يدور الكوكب حول الشمس، ويُقال إنّ المدار موجود عندما يكون مسار موجة الإلكترون مغلقًا على نفسه ومتّفقًا في الطور، وذلك لإحداث تداخل بنّائي. فالإلكترون يشكّل موجة موقوفة تقوّي نفسها بنائيًّا في كلّ دورة (تمامًا كما يحدث على وتر الآلة الموسيقية، حيث تُقوّى الموجة الموقوفة بنّائيًّا نتيجة الانعكاسات المتتالية للموجات المتّفقة الطور) حيث يكون طول المدار مساويًا عددًا صحيحًا من الطول الموجي للموجة المصاحبة للالكترون (شكل 103).



(شكل 103)
(أ) الإلكترونات المدارية تكوّن موجات موقوفة عندما يكون طول محيط المدار مساويًا عددًا صحيحًا من أطوال الموجة.
(ب) عندما لا تتفق الموجة مع نفسها في الطور يحدث تداخل هدّام.

وعليه، لا يُعَدّ الإلكترون جسيمًا موجودًا في نقطة محدّدة، ولكنّ كتلته وشحنته تنتشران على شكل موجة موقوفة تحيط بالنواة، و طول محيط مداره يساوي عددًا صحيحًا من طول موجة دي برولي للإلكترون في المدار (شكل 104).



(شكل 104)
طول محيط مدار الإلكترون يساوي عددًا صحيحًا يظهر في الشكل من المدار الأوّل إلى المدار الثالث.

من هنا، طول محيط المدار الأوّل يساوي الطول الموجي لموجة الإلكترون، أي:

$$2\pi.r_1 = 1 \times \lambda$$

وهو أصغر طول محيط إذ لا يمكن أن يكون أقلّ من طول موجي واحد.
أمّا طول محيط المدار الثاني فيساوي ضعف الطول الموجي لموجة الإلكترون، أي:

$$2\pi.r_2 = 2 \times \lambda$$

وهكذا، فإنّ طول محيط أيّ مدار يساوي حاصل ضرب رتبة المدار في طول موجة الإلكترون، ويُعبَّر عنه رياضيًّا بالعلاقة التالية:

$$2\pi.r_n = n \times \lambda$$

ومن هذه المعادلة، نستنتج أنّ أنصاف أقطار المدارات التي تتواجد عليها الإلكترونات هي التي تتّفق مع الطبيعة الموجية له. وبما أنّ طول محيط المدارات محدّد، فهذا يعني أنّ أنصاف أقطار هذه المحيطات وطاقة المستويات المختلفة محدّدة أيضًا. وهذا ما يفسّر سبب وجود مستويات محدّدة من الطاقة المسموح بها للإلكترون والتي تُظهر خطوط أطياف محدّدة عند انتقاله بينها.
أمّا إذا أعدنا صياغة المعادلة السابقة بالتعويض عن λ بمعادلة دي برولي، فنحصل على:

$$2\pi.r_n = n\left(\frac{h}{mv}\right) \Rightarrow m.v.r_n = n\frac{h}{2\pi}$$

وبالتعويض عن $L = m.v.r_n$ التي تساوي كمّية الحركة الزاوية للإلكترون، نكتب:

$$L = n\frac{h}{2\pi}$$

نستنتج من هذه المعادلة أنّ للإلكترون كمّية حركة زاوية في المدار تساوي «كمًّا» محدّدًا، وأنّ المدارات التي يتواجد عليها الإلكترون هي المدارات التي تساوي فيها كمّية الحركة الزاوية مضاعفات $\frac{h}{2\pi}$، وهذا ما اتّفق مع ما افترضه بور سابقًا في نموذجه الكوكبي للذرّة.
وأخيرًا، لا بدّ من الإشارة إلى أنّ نماذج الذرّة الحديثة التي اعتمدت على فيزياء الكمّ توصّلت إلى أنّ موجات الإلكترونات لا تتحرّك حول النواة فحسب، إنّما تنتقل أيضًا إلى الداخل والخارج مقتربة من النواة ومبتعدة عنها في الأبعاد الثلاثة (نموذج شرودنجر Schrodinger's Model).

مراجعة الدرس 1-2

أوّلًا – هل للجسيمات المادّية خواصّ موجية؟

ثانيًا – ما العلاقة بين طول موجة الجسيم وسرعته؟

ثالثًا – هل يدعم حيود الإلكترونات النموذج الجسيمي أو النموذج الموجي للإلكترونات؟ اِشرح.

رابعًا – ماذا تساوي طاقة الفوتون بالنسبة إلى مستويات الطاقة في الذرّة الباعثة له؟

خامسًا – اِشرح ما المقصود بأنّ الإلكترون يشغل مستويات طاقة منفصلة في الذرّة.

سادسًا – يُعتبَر استخدام النموذج الموجي للإلكترون أفضل من استخدام النموذج الجسيمي لتفسير مستويات الطاقة المنفصلة. اِشرح سبب ذلك.

سابعًا – أُحسب طول موجة دي برولي لسيارة كتلتها (1200)kg تسير بسرعة (90)km/h علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})$J.s.

ثامنًا – حزمة من الأشعّة السينية لها طول موجي $\lambda_0 = (0.3)$nm سقطت على مكعّب من الجرافيت، فأدّى ذلك إلى تشتّت الفوتون بزاوية (30°) بالنسبة إلى اتّجاه الفوتون الساقط. أُحسب الطول الموجي للفوتون المتشتّت بتلك الزاوية، علمًا أنّ كتلة الإلكترون تساوي (9.1×10^{-31})kg وثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})$J.s.

تاسعًا – أُحسب كتلة بكتيريا سرعتها في عيّنة طبّية (2.5)μm/s، ولها طول موجة دي برولي يساوي (2×10^{-19})m، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})$J.s.

تُعَدّ الطاقة النووية أحد أشكال الطاقة التي يمكنها، إذا ما استُخدِمت لأهداف سلمية، أن تزوّد العالم بطاقة كهربائية هائلة قادرة على الإنارة وتشغيل المصانع وتسيير المركبات.

ساهمت الفيزياء النووية كثيرًا في التقدّم التكنولوجي الذي نشهده اليوم في مختلف المجالات الحياتية. فبالإضافة إلى تأمينها للطاقة الميكانيكية والكهربائية، دعمت البحوث الطبّية في مجال الطبّ النووي، وتحديد عمر الموجودات الأثرية في علم الآثار وغيرها من البحوث الكثيرة.

ما هو إذًا مصدر هذه الطاقة الهائلة، وكيف يتمّ الحصول عليها؟ إنّ مصدر الطاقة النووية هو نواة الذرّة، أي ذلك الجزء الصغير جدًّا داخل الذرّة.

سيهتمّ هذا الفصل بدراسة خواصّ نواة الذرّة ومكوّناتها، وأهمّية طاقة الربط النووي في استقرارها. وسنكتشف من خلال دروس هذا الفصل، النشاط الإشعاعي للنواة وإطلاقها أشعّة وجسيمات مختلفة، كما سنكتشف نتائج عمليات انشطارها واندماجها من خلال دراسة التفاعلات النووية.

دروس الفصل

الدرس الأوّل
- نواة الذرّة

الدرس الثاني
- الانحلال الإشعاعي

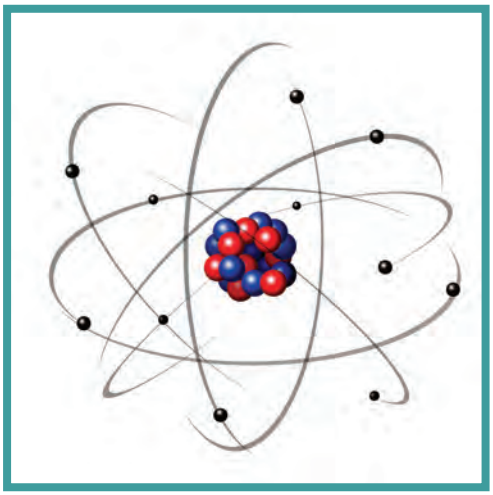
الدرس الثالث
- الانشطار والاندماج النووي

الدرس 2-1

نواة الذرّة
Atomic Nucleus

الأهداف العامة

- يصف نواة الذرّة.
- يعرّف خواصّ النواة.
- يعرّف طاقة الربط النووية.
- يعرّف النيوكليونات.
- يعرّف كلّ من العدد الذرّي Z والعدد الكتلي A.
- يحسب عدد النيوترونات في النواة.
- يعرّف النظائر.
- يعرّف وحدة الكتل الذرّية.



تناولنا في الفصل السابق الذرّة ونماذجها المختلفة، مهتمّين بحركة إلكتروناتها حول النواة. أمّا في هذا الدرس، فسندخل عميقًا داخل الذرّة، لندرس نواة الذرّة ومحتوياتها، وخواصّها وتأثير هذه الخواصّ في استقرارها أو انحلالها.

1. نواة الذرّة Atomic Nucleus

أكّد رذرفورد Rutherford في نموذجه الذي تناولناه سابقًا أنّ للذرّة نواة صغيرة موجَبة الشحنة تحوي بروتونات تدور حولها الإلكترونات السالبة الشحنة. وفي العام 1932، ومن خلال تجربة قذف صفيحة من الذهب بجسيمات ألفا (نواة ذرّة الهيليوم)، اكتشف جيمس شادويك James Chadwick انبعاث جسيم متعادل كهربائيًّا أُطلق عليه اسم نيوترون Neutron.

وباكتشاف شادويك، اتّفق العلماء على أنّ نواة الذرّة مؤلّفة من بروتونات موجَبة الشحنة، ونيوترونات لا شحنة لها، كتلتها قريبة من كتلة البروتونات. وأطلقوا على البروتونات والنيوترونات في النواة تسمية «نيوكليونات» Nucleons.

وبما أنّ الذرّة متعادلة الشحنة الكهربائية، فإنّ عدد البروتونات في نواة الذرّة يساوي عدد الإلكترونات خارجها ويساوي العدد الذرّي Z.

يؤثّر العدد الذرّي في تحديد الخواصّ الكيميائية للذرّة، حيث يحدّد التركيب المحتمَل لمدارات الإلكترون نتيجة لقوى التجاذب الكهربائية بين النواة والإلكترونات كما سبق وتعلّمنا. بينما لا يوجد أيّ تأثير مباشر لعدد النيوترونات في التركيب الإلكتروني، وبالتالي في الخواصّ الكيميائية للذرّة إذ إنّ لا شحنة كهربائية للنيوترونات.

إنّ كتلة البروتون قريبة من كتلة النيوترون، وكتلة النيوترون تساوي 1835 مرّة كتلة الإلكترون. لذا، فإنّ كتلة الذرّة تساوي عمليًّا كتلة نواتها فقط، أي أنّها تساوي مجموع كتل عدد البروتونات وعدد النيوترونات والتي يُرمَز لها بالعدد الكتلي A، أي أنّ:

$$A = N + Z$$

حيث إنّ N تساوي عدد النيوترونات في نواة الذرّة.

وعليه تُمثَّل أيّ نواة لعنصر X باستخدام العدد الكتلي A والعدد الذرّي Z كما تُمثَّل الذرّة تمامًا بِـ ${}^{A}_{Z}X$.

2. نظائر الأنوية Isotopes

${}^{A}_{Z}X$ هي نواة الذرّة لعنصر X، بحيث A تساوي عدد النيوكليونات في النواة، و Z تساوي عدد البروتونات فيها، بينما عدد النيوترونات يساوي $N = A - Z$.

قد يختلف عدد النيوترونات في أنوية العنصر نفسه فنسمّي تلك الأنوية نظائر العنصر. فقد نجد، على سبيل المثال، 7 أو 6 أو 5 نيوترونات في نواة ذرّات الكربون، حيث إنّ للكربون ${}^{12}_{6}C$ النظائر التالية: ${}^{13}_{6}C$ و ${}^{11}_{6}C$.

وعليه نعرّف **نظائر العنصر Isotopes بأنّها أنوية أو ذرّات لها العدد الذرّي نفسه Z (الخواصّ الكيميائية نفسها) وتختلف في العدد الكتلي A.**

تكون بعض نظائر أنوية ذرّات العناصر الكيميائية أكثر وفرة في الطبيعة. وتختلف نسبة وجود نظائر العنصر في الطبيعة بحسب الطريقة التي أدّت إلى تكوّنه (إمّا طبيعية أو صناعية) وبحسب استقراره. فعلى سبيل المثال، إنّ نسبة وجود ${}^{12}_{6}C$ هي 98.89% ويعود باقي النسبة المئوية للنظائر ${}^{10}_{6}C$، ${}^{11}_{6}C$، ${}^{13}_{6}C$، ${}^{14}_{6}C$، ${}^{15}_{6}C$، ${}^{16}_{6}C$.

3. خواصّ النواة (الكتلة، الحجم، الكثافة)

Properties of the Nucleus (Mass, Volume, Density)

تتألّف النواة من البروتونات والنيوترونات. كتلة البروتون تساوي $(1.67262 \times 10^{-27})$kg، أمّا كتلة النيوترون فتساوي $(1.67493 \times 10^{-27})$kg. ويشار إلى أنّه يمكن قياس الكتل في الفيزياء الذرّية باستخدام وحدة الكتل الذرّية Atomic Mass Unit (a.m.u) لقياس الكتل الذرّية.

وتُعرَّف وحدة الكتل الذرّية بأنّها تساوي $(\frac{1}{12})$ من كتلة ذرّة الكربون $^{12}_{6}C$. وجد أنّ:

$$\mathbf{(1)a.m.u = (1.660539 \times 10^{-27})kg}$$

فيكون مقدار كتلة البروتون بوحدة الكتل الذرّية يساوي:

$$m_{proton} = (1.00727)a.m.u$$

وكتلة النيوترون:

$$m_{neutron} = (1.00866)a.m.u$$

وبما أنّ كتلتي البروتون والنيوترون متساويتان تقريبًا، وقد سمّيناهما نيوكليون، نستنتج أنّ كتلة النيوكليون يساوي معدّل كتلة البروتون والنيوترون، أي أنّ متوسّط كتلة النيوكليون تساوي (1.66×10^{-27})kg.

أمّا كتلة نواة العنصر والتي تتألّف من العدد الكلّي A للنيوكليونات فيمكن أن تُحسَب باستخدام العلاقة التالية:

$$m = A\, m_0$$

حيث إنّ m_0 هي كتلة النيوكليون و m هي كتلة النواة و A هي العدد الكتلي للعنصر.

كما أنّه من الممكن التعبير عن الكتلة بما يكافئها من الطاقة بحسب معادلة أينشتاين، كما سبق ودرسنا في السنوات السابقة بحيث نكتب:

$$E = \Delta mc^2$$

$$E = 1.66 \times 10^{-27} \times c^2 = 931.5\ MeV$$

$$(1)a.m.u = (931.4)\ MeV/c^2$$

تمثّل c في المعادلة سرعة الضوء في الفراغ $c = (3 \times 10^8)m/s$ والكتلة m بوَحدة (kg). ويشار إلى أنّنا سنستخدم معادلة أينشتاين في التكافؤ بين الكتلة والطاقة عندما سنتناول الفيزياء النووية في الدروس اللاحقة.

تُعتبَر النواة كرة مؤلّفة من A نيوكليونات كروية الشكل حيث V حجم النواة و V_0 حجم النيوكليون الواحد حيث إنّ $r_0 = (1.2 \times 10^{-15})$ و r_0 نصف قطر النيوكليون الواحد (شكل 105)، أمّا حجم النواة فيُحسَب بالعلاقة:

$$V = A\, V_0$$

حيث إنّ V هو حجم النواة و V_0 هو حجم النيوكليون الواحد.

(شكل 105)
يمكن اعتبار النواة مجموعة من النيوكليونات الكروية المشدودة بعضها على بعض بإحكام. تمثّل الكرات الحمراء البروتونات وتمثّل الكرات الزرقاء النيوترونات.

وبالتعويض عن المقادير المعلومة في: $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ ، نجد أنّ نصف قطر النواة يُحسَب باستخدام العلاقة التالية:

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

أمّا الكثافة (الكتلة الحجمية) ρ للنواة فتساوي حاصل قسمة الكتلة على الحجم، أي:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{A\, m_0}{A\, V_0} = (2.3 \times 10^{17})\text{kg/m}^3$$

مثال (1)

مقدار كتلة النيوكليون الواحد يساوي $(1.66 \times 10^{-27})\text{kg}$ ومقدار نصف قطره يساوي $r_0 = (1.2 \times 10^{-15})\text{m}$. أُحسب:

(أ) كتلة نواة ذرّة الكربون $^{15}_{6}C$.

(ب) مقدار نصف قطر النواة.

(جـ) كثافة النواة.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: عدد النيوكليونات الكلّي: $A = 15$

مقدار كتلة النيوكليون: $m_0 = (1.66 \times 10^{-27})\text{kg}$

نصف قطر النيوكليون: $r_0 = (1.2 \times 10^{-15})\text{m}$

غير المعلوم: **(أ)** كتلة النواة ؟ $= m$

(ب) نصف قطر النواة ؟ $= R$

(جـ) كثافة النواة ؟ $= \rho$

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) إنّ كتلة النواة تساوي مجموع كتل النيوكليونات الموجودة في النواة وعددها $A = 15$. وباستخدام المعادلة التالية:

$$m = A\, m_0$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$m = 15 \times 1.66 \times 10^{-27} = (2.49 \times 10^{-26})\text{kg}$$

(ب) يُحسَب نصف قطر النواة باستخدام المعادلة التالية:

$$R = A^{\frac{1}{3}}\, r_0$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$R = (15)^{\frac{1}{3}} \times (1.2 \times 10^{-15}) = (2.959 \times 10^{-15})\text{m}$$

مسائل مع إجابات

1. تحتوي ذرّة الألومنيوم على 27 نيوكليون. أُحسب حجم النواة، علمًا أنّ مقدار نصف قطر النيوكليون يساوي $r_0 = (1.2 \times 10^{-15})\text{m}$.
الإجابة: $V = (1.95 \times 10^{-43})\text{m}^3$

2. أُحسب عدد النيوكليونات الموجودة في نواة نصف قطرها يساوي $(3.6 \times 10^{-15})\text{m}$. علمًا أن $r_0 = (1.2 \times 10^{-15})\text{m}$.
الإجابة: 27 نيوكليونات

3. أُحسب مقدار نصف قطر نواة ذرّة الحديد $^{56}_{26}Fe$، علمًا أنّ نصف قطر النيوكليون يساوي $r_0 = (1.2 \times 10^{-15})\text{m}$.
الإجابة: $R = (4.59 \times 10^{-15})\text{m}$

مثال (1) تابع

(جـ) إنّ الكثافة تساوي الكتلة مقسومة على الحجم:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{A\, m_0}{A\, V_0} = \frac{1.66 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi \times (1.2 \times 10^{-15})^3} = (2.3 \times 10^{17})\text{kg/m}^3$$

1. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتائج مقبولة وهي تتناسب مع المعطيات لأنّه من الطبيعي أن يكون نصف قطر النواة بهذا الصغر وأن تكون كثافة نواة المادّة تساوي كثافة النيوكليون.

4. طاقة السكون Rest Energy

يُعَبَّر عن كتلة النواة في الكثير من الأحيان بطاقة السكون. **فللجسيم كمّية من الطاقة تُسمّى طاقة السكون Rest Energy وهي الطاقة المكافِئة لكتلته.** وبما أنّ الكتلة غير محفوظة في الكثير من العمليات النووية، حيث يتحوّل جزء من الكتلة إلى طاقة، فإنّه من المناسب أن نعبّر عن كتلة الجسيم بكمّية الطاقة المكافِئة. وتمثّل المعادلة التالية العلاقة الرياضية بين الكتلة وطاقة السكون: $E_r = mc^2$، حيث تمثّل c سرعة الضوء في الفراغ $c = (3 \times 10^8)\text{m/s}$ و m كتلة الجسيم بوَحدة (kg).

ومن خلال هذه المعادلة، نستنتج أنّ طاقة السكون لكتلة تساوي (1)a.m.u تساوي: $E = mc^2 = 1.66 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = (14.9 \times 10^{-11})\text{J}$

وهي تساوي (931.5)MeV، حيث إنّ وَحدة الإلكترون فولت هي وحدة الطاقة: $(1)\text{eV} = (1.6 \times 10^{-19})\text{J}$

$$(1)\text{a.m.u} = (931.5)\text{MeV/c}^2$$

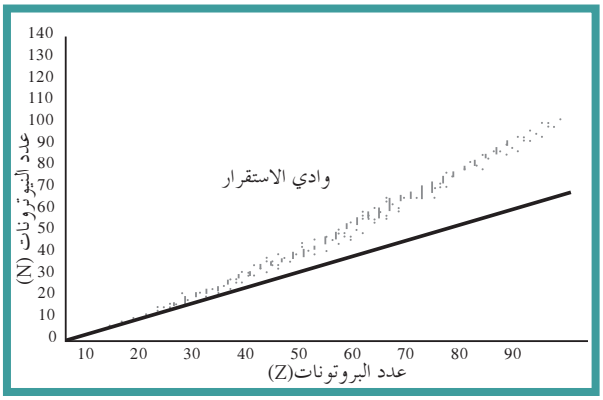
5. استقرار النواة Nucleus Stability

تتفاعل النيوكليونات داخل النواة بعضها مع بعض بقوّة تجاذب نووية Nuclear Force، بغضّ النظر عمّا إذا كانت لها شحنة (بروتونات) أو لم يكن لديها شحنة (نيوترونات). وتُعَدّ القوّة النووية بين النيوكليونات قوّة قصيرة المدى تنشأ بين النيوكليونات المتجاورة. أمّا مقدارها فيكفي لمنع زوج من البروتونات من التنافر الكهربائي والبقاء داخل النواة. تؤدّي القوّة النووية دورًا مهمًّا في استقرار النواة.

ويزيد وجود النيوترونات في النواة قوى التجاذب النووية على حساب قوى التنافر بين البروتونات وتحفظها من الابتعاد عن النواة.

يبيّن الشكل (106) عدد البروتونات بالنسبة إلى عدد النيوترونات في الأنوية المستقرّة. ومن خلال الشكل (106)، يتبيّن لنا أنّ عدد النيوترونات مساوٍ تقريبًا لعدد البروتونات في أنوية العناصر الخفيفة. أمّا في الأنوية الأثقل، حيث تزداد قوّة التنافر بزيادة عدد البروتونات، فتحتاج الأنوية إلى عدد من النيوترونات أكبر من عدد البروتونات لتحافظ على

استقرارها، وهذا ما يفسّر انحراف النوى عن الخطّ $N = Z$. أمّا في الأنوية ذات العدد الذرّي الأكبر من 82 $(Z > 82)$، فإنّ قوّة التنافر بين بروتوناتها تصبح كبيرة جدًّا ولا تستطيع زيادة النيوترونات تعويض زيادة القوّة الكهربائية، وتُسمّى تلك الأنوية أنوية غير مستقرّة.



(شكل 106)

6. طاقة الربط النووية Nuclear Binding Energy

إنّ القوّة النووية التي تربط النيوكليونات في النواة هي قوّة كبيرة جدًّا، وهذا يعني أنّ عملية فصلها تحتاج إلى تعريض النواة لطاقة خارجية هائلة تُساوي طاقة الربط النووية Nuclear Binding Energy. **وتُعرّف طاقة الربط النووية على أنّها الطاقة الكلّية اللازمة لكسر النواة وفصل نيوكليوناتها فصلًا تامًّا، وهي تساوي مقدار الطاقة المحرّرة من تجمّع نيوكليونات غير مترابطة مع بعضها البعض لتكوين نواة.**

إنّ مصدر طاقة الربط هو تحوّل جزء من كتلة النيوكليونات إلى طاقة، حيث إنّ كتلة نواة الذرّة أقلّ من مجموع كتل النيوكليونات المكوّنة لها وهي منفردة. فعلى سبيل المثال، كتلة ذرّة أحد نظائر الهيليوم ^4_2He والذي هو ^3_2He تساوي $(3.0165)a.m.u$. وإن حسبنا كتل النيوكليونات الموجودة في النواة، مع إهمال كتلة الإلكترونين في الأغلفة، نجد:

$$m = 2m_p + m_n = 2 \times 1.00727 + 1.00866 = (3.0232)a.m.u$$

وهذا يبيّن أنّ كتلة نواة الذرّة أقلّ من مجموع كتل النيوكليونات المكوّنة لها، أي أنّ: $m_X < Z\,m_p + N\,m_n$

يُسمّى هذا النقص في الكتلة بفرق الكتلة Mass Defect ويُرمَز له بـ Δm ويساوي:

$$\Delta m = (Z\,m_p + N\,m_n) - m_X$$

حيث إنّ m_p تساوي كتلة البروتون، وm_n تساوي كتلة النيوترون، وZ عدد البروتونات، وN عدد النيوترونات، وm_X كتلة النواة.

وبالاعتماد على مبدأ التكافؤ بين الطاقة والكتلة لأينشتاين: $E = mc^2$، نفسّر أنّ نقص الكتلة يظهر على شكل طاقة ربط نووية E_b تعمل على ربط مكوّنات النواة وتُحسَب باستخدام العلاقة التالية:

$$E_b = \Delta mc^2 = [(Z\,m_p + N\,m_n) - m_X]\,c^2$$

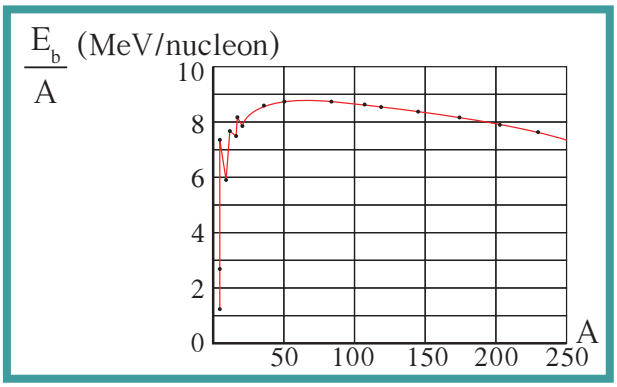
تُحسَب طاقة الربط النووية، بحسب النظام الدولي للوَحدات، بوَحدة جول. كما يمكن حسابها بوَحدة ميجا (مليون) إلكترون فولت، بعد ضرب وَحدة الكتلة الذرّية a.m.u لنقص الكتلة بالرقم (931.5).

أي: $E_b = \Delta m \times (931.5\ MeV/c^2) \times c^2$

يعتمد استقرار النواة على مقدار طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون، ويُرمز لها بالرمز E_b' أكثر الأنوية استقرارًا هي نواة النيكل، حيث تساوي طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون تقريبًا (8.8)MeV.

يُظهر المنحنى في الشكل (107) أنّ الأنوية ذات عدد كتلي متوسّط هي الأكثر استقرارًا ويحتاج فصل مكوّناتها إلى طاقة كبيرة. أمّا في الأنوية الكبيرة، فتقلّ طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون، ما يجعلها غير مستقرّة بسبب نشاطها الإشعاعي، ويمكن انشطارها إلى أنوية أكثر استقرارًا.

وكذلك الأمر بالنسبة إلى الأنوية الخفيفة فهي أيضًا غير مستقرّة وتميل إلى الاندماج مع أنوية أخرى إذا ما توفّرت ظروف مناسبة لذلك. سنتناول ذلك تفصيليًّا في درس الاندماج النووي.



(شكل 107)

مثال (2)

أُحسب طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون لنواة ذرّة الحديد $^{56}_{26}Fe$، علمًا أنّ كتلة نواة الحديد تساوي $m_{Fe} = (55.9206)a.m.u$، وكتلة البروتون تساوي $m_p = (1.00727)a.m.u$، وكتلة النيوترون تساوي $m_n = (1.00866)a.m.u$.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: عدد النيوكليونات الكلّي: $A = 56$

عدد البروتونات: $Z = 26$

عدد النيوترونات: $N = A - Z = 30$

مقدار كتلة نواة الحديد: $m_{Fe} = (55.9206)a.m.u$

كتلة البروتون: $m_p = (1.00727)a.m.u$

كتلة النيوترون: $m_n = (1.00866)a.m.u$

مسائل مع إجابات

1. **(أ)** أُحسب طاقة الربط النووية لنواة ذرّة اليورانيوم $^{235}_{92}U$، علمًا أنّ كتلة نواة اليورانيوم $m_U = (234.9934)\ a.m.u$ وكتلة البروتون $m_p = (1.00727)a.m.u$ وكتلة النيوترون $m_n = (1.00866)a.m.u$

(ب) اِستنتج طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون.

الإجابات: (أ) (1782.72)MeV

(ب) (7.586)MeV/nucleon

2. **(أ)** أُحسب طاقة الربط النووية لنواة ذرّة الهيليوم $^{4}_{2}He$، علمًا أنّ كتلة نواة الهليوم $m_{He} = (4.0015)a.m.u$ وكتلة البروتون $m_p = (1.00727)a.m.u$ وكتلة النيوترون $m_n = (1.00866)a.m.u$

(ب) اِستنتج طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون.

الإجابات:

(أ) (28.28)MeV

(ب) (7.07)MeV/nucleon

3. إنّ طاقة الربط النووية لنواة ذرّة الكالسيوم $^{40}_{20}Ca$ لكلّ نيوكليون تساوي (8.552)MeV/nucleon. أُحسب بدقّة كتلة النواة، علمًا أنّ كتلة البروتون $m_p = (1.00727)a.m.u$ وكتلة النيوترون $m_n = (1.00866)a.m.u$

الإجابة:

$m_{Ca} = (39.95136436)a.m.u$

مثال (2) تابع

غير المعلوم: طاقة الربط لكلّ نيوكليون؟

1. أُحسب غير المعلوم.

باستخدام العلاقة التالية:

$$E_b = \Delta mc^2 = [(Z\, m_p + N\, m_n) - m_X]\, c^2$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$E_b = \Delta mc^2 = [(26 \times 1.00727 + 30 \times 1.00866) - 55.9206]c^2 \times (931.5\ MeV/c^2) = (492)MeV$$

أمّا طاقة الربط لكلّ نيوكليون فتساوي:

$$E_b' = \frac{492}{A} = \frac{492}{56} = (8.79)MeV/nucleon$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة حيث إنّ طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون تدلّ على استقرار نواة الحديد وهذا متوقّع.

مراجعة الدرس 2-1

أوّلًا – عرِّف طاقة الربط النووية.

ثانيًا – أُحسب نصف قطر نواة ذرّة الرصاص $^{206}_{82}Pb$، علمًا أنّ $r_0 = (1.2 \times 10^{-15})m$.

ثالثًا – ما هي أوجه الشبه والاختلاف بين أنوية نظائر عنصر ما؟

رابعًا – هل تُعَدّ الأنوية التي لها طاقة ربط أكبر من (8)MeV لكلّ نيوكليون أنوية مشعّة أم مستقرّة؟

خامسًا – هل تُعَدّ الأنوية التي لها عدد كلّي A أصغر من 20 أنوية مستقرّة؟

سادسًا – أُحسب طاقة السكون بوَحدة ميجا إلكترون فولت MeV لكتلة (1)g، علمًا أنّ $c = (3 \times 10^8)m/s$.

سابعًا – أُحسب طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون لنواة ذرّة الرصاص $^{208}_{82}Pb$، علمًا أنّ كتلة نواة الرصاص تساوي $m_{Pb} = (207.97664)a.m.u$ وكتلة البروتون $m_p = (1.00727)a.m.u$ وكتلة النيوترون $m_n = (1.00866)a.m.u$.

ثامنًا – أُحسب طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون لنواة ذرّة الكربون $^{12}_{6}C$، علمًا أنّ كتلة نواة الكربون $m_C = (11174.7)MeV/c^2$ وكتلة البروتون $m_p = (1.00727)a.m.u$ وكتلة النيوترون $m_n = (1.00866)a.m.u$ وأنّ $(1)a.m.u = (931.5)MeV/c^2$.

الدرس 2-2

الانحلال الإشعاعي
Radioactivity

الأهداف العامة

- يعرّف النشاط الإشعاعي.
- يعدّد أنواع الانبعاثات النووية.
- يقارن بين مقدرة أنواع الانبعاثات النووية على النفاذ.
- يفرّق بين أنواع الانبعاثات النووية الصادرة عن الأنوية الناشطة إشعاعيًّا.
- يتوقّع الكمّية التي ستبقى من عيّنة من نظير مشعّ في نهاية عدد من مضاعفات عمر النصف.
- يتوقّع نواتج الانحلال إذا أُعطِيت رمز النظير المشعّ والجسيمات التي تنطلق منه.
- يصف بعض استخدامات النظائر المشعّة في تحديد عمر الموادّ.

(شكل 108)

لاحظنا في الدرس السابق أنّ النيوكليونات تتفاعل وترتبط بواسطة طاقة ربط نووية، وأنّ نيوكليونات بعض الأنوية تتميّز بطاقة ربط كبيرة مكوِّنة أنوية مستقرّة، بينما نيوكليونات بعض الأنوية الأخرى تتميّز بطاقة ربط صغيرة نسبيًّا، ما يجعلها أنوية غير مستقرّة، تُسمّى أنوية مشعّة. هناك حوالى 400 نواة مستقرّة و100 نواة غير مستقرّة تضمحلّ إلى أنوية أكثر استقرارًا مطلقة انبعاثات من الجزيئات والإشعاعات. إنّ انحلال الأنوية المشعّة والقوانين التي تفسّر شروط الانحلال ونتائجه هي محور هذا الدرس.

1. النشاط الإشعاعي Radioactivity

يُعرَّف النشاط الإشعاعي (الانحلال الإشعاعي) Radioactivity على أنّه عملية اضمحلال تلقائي مستمرّ من دون أيّ مؤثّر خارجي لأنوية غير مستقرّة لتصبح أكثر استقرارًا، حيث تزداد طاقة الربط النووية بين نيوكليوناتها وتقلّ كتلتها.

تمرّ الأنوية المشعّة بسلسلة من التحوّلات قبل أن تصل إلى حالة الاستقرار، وهناك نوعان من النشاط الإشعاعي: طبيعي واصطناعي.

يُعرَّف النشاط الإشعاعي على أنّه طبيعي Natural Radioactivity عندما تكون النواة المشعّة نواة موجودة طبيعيًّا، بينما يُعرَّف على أنّه نشاط اصطناعي Artificial Radioactivity عندما تكون النواة المشعّة محضَّرة اصطناعيًّا.

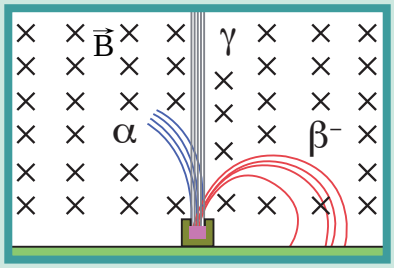
يرافق عملية اضمحلال الأنوية غير المستقرّة وتحوّلها إلى أنوية أكثر استقرارًا إطلاق ثلاثة أنواع من الإشعاعات: إشعاعات ألفا α وبيتا β وجامّا γ وغيرها من الجسيمات.

- إشعاعات ألفا α هي جسيمات موجَبة الشحنة تتكوّن من بروتونين ونيوترونين وهي تماثل نواة الهيليوم ^4_2He.
- إشعاعات بيتا β هي نوعان، إلكترونات سالبة الشحنة $^0_{-1}e$ يُرمَز إليها بِـ β^- وتنتج عن اضمحلال الأنوية الطبيعية، وبوزيترونات موجَبة الشحنة $^0_{+1}e$ يُرمَز إليها بِـ β^+ وتنتج عن اضمحلال الأنوية الإصطناعية.
- إشعاعات جامّا γ هي طاقة لها تردّد كبير أي أنّها فوتونات ليس لها شحنة كهربائية، تنتج عن قفز النيوكليونات في النواة من مستوى طاقة معيّن إلى مستوى طاقة أقلّ. أشعّة جامّا هي جزء من الطيف الكهرومغناطيسي الذي يمثّل كمّية كبيرة من الطاقة والتي تُحسَب باستخدام العلاقة $E = \Delta mc^2$.

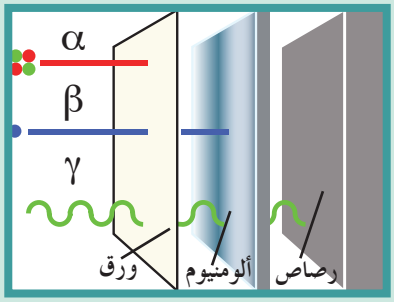
يمكن الفصل بين الإشعاعات الثلاثة الناتجة عن انحلال النواة الطبيعية بتعريض مسارها لمجال مغناطيسي (شكل 109).

تختلف قدرة الأنواع الثلاثة من الأشعّة المنبعثة من العناصر المشعّة على اختراق الموادّ (شكل 110). فأشعّة ألفا يمكن إيقافها بورقة سميكة نسبيًّا، فهي بطيئة نوعًا ما وشحنتها الموجَبة تتفاعل مع الجزيئات التي تقابلها في مسارها. وحتّى عندما تسير في الهواء، تتوقّف بعد قليل من السنتيمترات أي من (2.5)cm إلى (8)cm، نتيجة التقاطها إلكترونات وتحوّلها إلى ذرّة هيليوم غير خطيرة.

بينما تسير أشعّة بيتا بسرعة أكبر من أشعّة ألفا ويمكن إيقافها ببضع رقائق الألومنيوم، كما أنّها تسير في الهواء لمسافات قبل أن تفقد طاقتها نتيجة التصادمات مع إلكترونات الذرّات الموجودة. أمّا أشعّة جامّا فلها قدرة كبيرة على الاختراق، ويتطلّب إيقافها درعًا من الموادّ الثقيلة مثل الرصاص.



(شكل 109)
تنفصل الإشعاعات الناتجة عن انحلال نواة في المجال المغناطيسي.



(شكل 110)
أشعة ألفا توقفها ورقة سميكة بينما تستطيع أشعة بيتا اختراق رقائق الألومنيوم، وتحتاج أشعة جاما إلى سنتميترات من الرصاص لإيقافها.

2. التحوّل الطبيعي والاصطناعي للعناصر
Natural and Artificial Transmutation of Elements

عندما تبعث النواة جسيم ألفا أو بيتا، تتحوّل إلى عنصر مختلف عمّا كانت عليه. وحدوث هذا التحوّل من دون تدخّل خارجي وبشكل طبيعي نتيجة عدم استقرار النواة يُسمّى التحوّل الطبيعي Natural Transmutation. يُعَدّ الانحلال الإشعاعي لأيّ نواة مشعّة مثالًا على التحوّل الطبيعي للعنصر. فتحوّل نواة اليورانيوم المشعّة على سبيل المثال إلى ثوريوم، بعد أن تبعث جسيم ألفا، يُعَدّ مثالًا على التحوّل الطبيعي.

أمّا التحوّل الاصطناعي Artificial Transmutation فيحدث نتيجة قذف أنوية عناصر بجسيمات تؤدّي إلى تحوّلها إلى عناصر ونظائر جديدة. كان الفيزيائي البريطاني إرنست رذرفورد Erbest Rutherford أوّل الذين نجحوا في إنجاز التحوّل الاصطناعي عام 1919. قذف رذرفورد أنوية النيتروجين بجسيمات ألفا منبعثة من مادّة مشعّة ليجد أوكسجين وهيدروجين.

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H + E$$

وتبعت تجربة رذرفورد الكثير من هذه التفاعلات النووية التي تطوّرت طرائق تنفيذها وأنواع القذائف المستخدَمة في قذف الأنوية. وسنتناول ذلك في ما بعد عند دراسة التفاعلات النووية.

3. قوانين البقاء في التفاعلات والتحوّلات النووية
Laws of Conservation in Nuclear Transmutations and Reactions

إنّ التحوّل الطبيعي أو الاصطناعي للنواة غير المستقرّة والمشعّة إلى نواة أكثر استقرارًا بإطلاقها للإشعاعات المختلفة يخضع إلى قوانين البقاء التالية:

- قانون بقاء العدد الذرّي (Z): إنّ العدد الذرّي للنواة قبل الانحلال يساوي مجموع الأعداد الذرّية للأنوية الناتجة بعد الانحلال.
- قانون بقاء العدد الكتلي (A): إنّ العدد الكتلي للنواة قبل الانحلال يساوي مجموع الأعداد الكتلية للأنوية الناتجة بعد الانحلال.
- قانون بقاء الكتلة والطاقة: إنّ طاقة النواة الكلّية قبل الانحلال تساوي مجموع طاقة الفوتون والطاقات الكلّية للأنوية الناتجة، علمًا أنّ الطاقة الكلّية تساوي مجموع الطاقة الحركية وطاقة السكون.

مثال (1)

نواة يورانيوم $^{238}_{92}U$ غير مستقرّة أطلقت جسيم ألفا $^{4}_{2}He$ وتحوّلت إلى نواة ثوريوم عددها الكتلي A وعددها الذرّي Z، بحسب المعادلة التالية:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{A}_{Z}Th + {}^{4}_{2}He$$

أُحسب كلًّا من A و Z مستخدِمًا قوانين البقاء للتحوّلات النووية.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: العدد الكتلي والعدد الذرّي لكلّ من نواة اليورانيوم ونواة الهيليوم

غير المعلوم: العدد الكتلي والعدد الذرّي لنواة الثوريوم؟

2. أُحسب غير المعلوم.

بتطبيق مبدأ حفظ العدد الكتلي والعدد الذرّي، وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$238 = A + 4 \Rightarrow A = 234$$

$$92 = Z + 2 \Rightarrow Z = 90$$

3. قيِّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتتناسب مع معطيات المسألة.

مثال (2)

أُحسب الطاقة الناتجة عن انبعاث نواة الهيليوم $^{4}_{2}He$ من انحلال نواة اليورانيوم $^{238}_{92}U$ غير المستقرّة إلى نواة ثوريوم $^{234}_{90}Th$ بحسب المعادلة التالية:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

علمًا أنّ كتلة نواة اليورانيوم تساوي (238.0508)a.m.u، وكتلة نواة الثوريوم تساوي (234.0435)a.m.u، وكتلة نواة الهيليوم تساوي (4.0026)a.m.u و $(1)a.m.u = (931.5)MeV/c^2$

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: كتل الأنوية: يورانيوم، ثوريوم وهيليوم.

غير المعلوم: الطاقة الناتجة عن الانحلال $E = ?$

2. أُحسب غير المعلوم.

بتطبيق مبدأ حفظ الطاقة الكلّية: $E = \Delta mc^2$، وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$E = [238.0508 - (234.0435 - 4.0026)] \times (931.5\ MeV/c^2) \times c^2$$

$$= (4.378)MeV$$

مثال (2) تابع

3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟

إنّ مقدار الطاقة الناتجة تتناسب مع معطيات المسألة.

4. انبعاث جامّا Gamma Emission

عندما تبعث نواة مشعّة أيّ جسيم، غالبًا ما تكون النواة الناتجة في مستوى إثارة، ما يدفعها إلى إطلاق أشعّة جامّا لتعود إلى مستوى الاستقرار (شكل 111)، أي أنّ انبعاث أشعّة جامّا يرافق أيّ انبعاث للجسيمات من النواة من أجل جعل النواة الناتجة أكثر استقرارًا. وهذا يشبه تمامًا ما تعلّمناه سابقًا عن انبعاث طاقة الفوتون نتيجة انتقال الإلكترون من مستوى طاقة مرتفع إلى مستوى طاقة أقلّ.

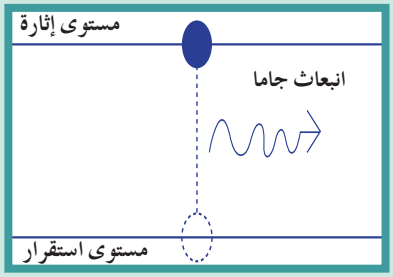
إنّ انبعاث أشعّة جامّا من النواة المشعّة لا يغيّر مقدار عددها الكتلي أو عددها الذري، بل يقلّل من طاقتها بمقدار يساوي طاقة الضوء المنبعث.

يُعبَّر عن اضمحلال جامّا بالمعادلة التالية:

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma $$

حيث إنّ X^{*} تمثّل النواة المشعّة الأصلية، و X النواة الناتجة عن الاضمحلال والتي هي أكثر استقرارًا.

ومن المهمّ الإشارة إلى أنّ انبعاث جامّا غالبًا ما يرافق انبعاث ألفا وبيتا.



(شكل 111)
تبعث النواة أشعة جاما لتعود لمستوى الاستقرار بعد أن تكون في مستوى إثارة.

مثال (3)

أُحسب طول موجة الفوتون المنبعث من نواة $^{24}_{12}Mg$ عندما تنتقل من مستوى إثارة $E_3 = (5.22)MeV$ إلى مستوى $E_4 = (4.12)MeV$، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$.

طريقة التفكير في الحلّ

1. **حلّل:** أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: مستويات الطاقة $E_3 = (5.22)MeV$

$E_4 = (4.12)MeV$

غير المعلوم: طول موجة الضوء المنبعث: $\lambda = ?$

2. **أُحسب غير المعلوم.**

باستخدام العلاقة التالية:

$$E_3 - E_4 = \frac{hc}{\lambda}$$

وعلمًا أنّ $(1)eV = (1.6 \times 10^{-19})J$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{1.1 \times 10^{6} \times 1.6 \times 10^{-19}} = (11.3 \times 10^{-13})m$$

3. **قيّم:** هل النتيجة مقبولة؟

إنّ مقدار طول الموجة صغير، وهذا يعني أنّ كمّية الطاقة كبيرة.

5. اضمحلال ألفا Alpha Decay

عندما تحصل عملية اضمحلال ألفا لنواة مشعّة تكون قد بعثت تلقائيًّا جسيم ألفا (الهيليوم ^4_2He)، أي خسرت اثنين من بروتوناتها واثنين من نيوتروناتها، ممّا يجعل كتلتها أصغر، ويقلّل من شحناتها الموجَبة.

يُعبَّر عن اضمحلال ألفا بالمعادلة التالية:

$$^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$$

فنواة يورانيوم، على سبيل المثال، تتحوّل إلى ثوريوم بعد أن تبعث جسيم ألفا وطاقة جامّا، وتُمثَّل هذه العملية بالرموز على الشكل التالي:

$$^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He} + \gamma$$

وتبيّن المعادلة حفظ العدد الذرّي والعدد الكتلي.

6. اضمحلال بيتا Beta Decay

عندما تقوم نواة مشعّة باضمحلال من نوع بيتا، فهي إمّا تطلق إلكترونًا مشكِّلة اضمحلالًا من نوع بيتا سالب أو تطلق بوزيترونًا مشكِّلة اضمحلالًا من نوع بيتا موجَب. والبوزيترون هو جسيم مساوٍ للإلكترون في الكتلة لكنّه موجَب الشحنة.

1.6 اضمحلال بيتا السالب Negative Beta Decay

عندما تحصل عملية اضمحلال بيتا السالب لنواة مشعّة، تكون قد بعثت تلقائيًّا إلكترون $^0_{-1}\text{e}$. لا تتغيّر كتلة النواة المشعّة إلّا قليلًا، بينما يتغيّر عدد النيوترونات بالنسبة إلى عدد البروتونات.

يُعبَّر عن اضمحلال بيتا السالب بالمعادلة التالية:

$$^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + {}^0_{-1}\text{e} + \gamma$$

حيث إنّ X تمثّل النواة المشعّة الأصلية، وY النواة الناتجة عن الاضمحلال، وتبيّن المعادلة بقاء كلّ من العدد الذرّي والعدد الكتلي.

يحدث انبعاث جسيم بيتا السالب نتيجة تحلّل النيوترون إلى بروتون يبقى داخل النواة، وينبعث الإلكترون إلى الخارج بحسب المعادلة التالية:

$$^1_0\text{n} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + {}^1_1\text{p}$$

تبيّن للعلماء أنّ كمّية الطاقة والكتلة غير محفوظة في معادلة اضمحلال بيتا السالب، ممّا دفع الفيزيائي باولي Pauli إلى إطلاق فرضية وجود جسيم آخر منبعث من اضمحلال بيتا السالب، يصعب تحسّسه، ويحمل الطاقة التي تبدو ضائعة. وقد أكّد فيرمي Fermi في ما بعد على صحّة فرضية باولي بوجود مضادّ النيوترينو $\bar{\nu}$ الذي يرافق دائمًا انبعاث بيتا السالب، ويحقّق قانون حفظ (بقاء) الكتلة – الطاقة.

وعليه، يُعبَّر عن اضمحلال بيتا السالب بالمعادلة العامّة التالية:

$$^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu} + \gamma$$

2.6 اضمحلال بيتا الموجَب Positive Beta Decay

في العام 1934، اكتُشِف اضمحلال بيتا الموجَب بفضل أيرين وفريديريك جوليو كوري. إذ أدّى تصادم نواة بورون $^{10}_{5}B$ بنواة ألفا إلى تكوّن نواة من النيتروجين غير المستقرّة $^{14}_{7}N$ التي تحوّلت إلى نواة كربون مستقرّة $^{14}_{6}C$، مطلقة جسيم بيتا موجَبًا يُسمّى بوزيترونًا. يُشار إلى أنّ البوزيترون ينتج عن تحلّل البروتون إلى نيوترون يبقى في النواة، وبوزيترون ينبعث إلى الخارج بحسب المعادلة التالية:

$$^{10}_{5}B + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{14}_{7}N \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{0}_{+1}e + E$$

$$^{1}_{1}p \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{0}_{+1}e$$

يُعبَّر عن اضمحلال بيتا الموجَب بالمعادلة التالية:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z-1}Y + ^{0}_{+1}e$$

حيث إنّ X تمثّل النواة المشعّة الأصلية، وY النواة الناتجة عن الاضمحلال. وتبيّن المعادلة حفظ (بقاء) كلّ من العدد الذرّي والعدد الكتلي. ومن أجل حفظ (بقاء) الطاقة، أثبت العلماء وجود جسيم يرافق دائمًا انبعاث بيتا موجَب يُسمّى نيوترينو. وعليه تمثّل عملية اضمحلال بيتا موجَب بالمعادلة العامّة التالية: $^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z-1}Y + ^{0}_{+1}e + \nu + \gamma$

3.6 التحوّل بين البروتون والنيوترون Neutron – Proton Transmutation

إنّ اضمحلال بيتا وإطلاقه الإلكترون أو البوزيترون من نواة لا تحتوي إلّا على بروتونات ونيوترونات يبيّن أنّ هذا الاضمحلال ما هو إلّا عملية تحوّل من بروتون إلى نيوترون أو من نيوترون إلى بروتون.

فعندما يتحوّل البروتون إلى نيوترون، ينبعث البوزيترون ويرافقه جسيم النيوترينو بحسب المعادلة التالية:

$$^{1}_{1}p \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{0}_{+1}e + \nu$$

وعندما يتحوّل النيوترون إلى بروتون، ينبعث الإلكترون ويرافقه جسيم مضادّ النيوترينو بحسب المعادلة التالية:

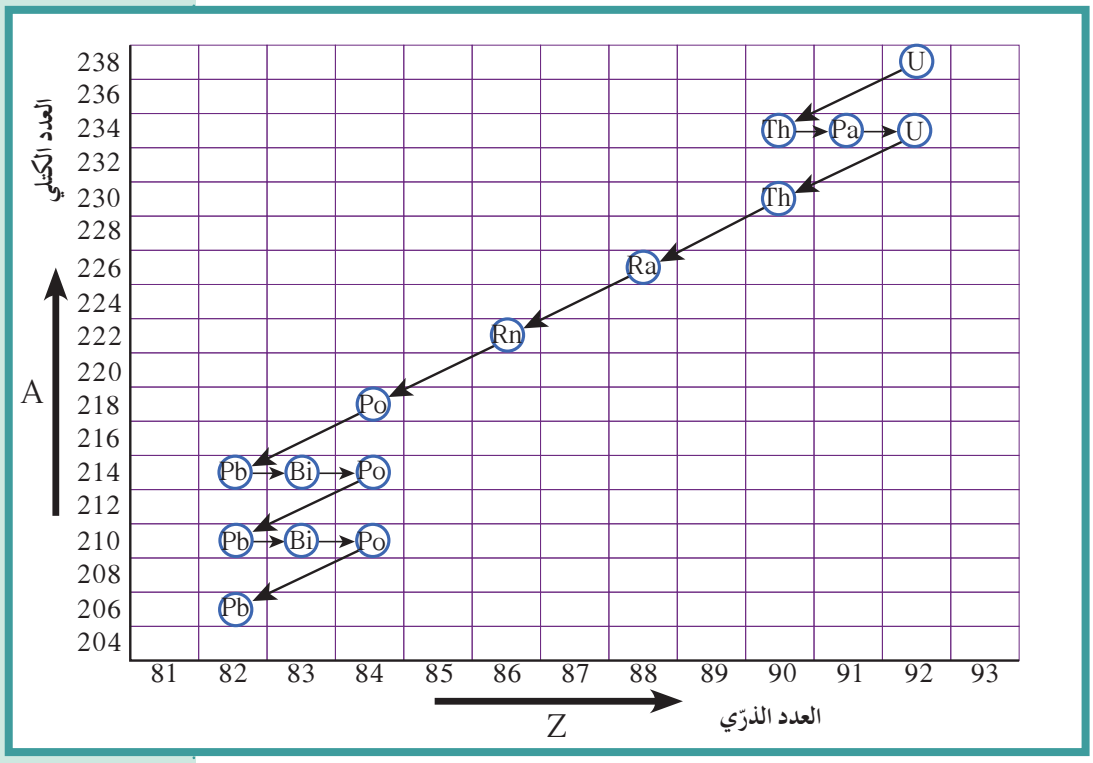
$$^{1}_{0}n \rightarrow ^{1}_{1}p + ^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

وهذا ما يفسّر التناقض الظاهر من إطلاق النواة للجسيمات غير الموجودة في داخلها.

7. سلاسل الانحلال الإشعاعي Chains of Radioactive Disintegration

ذكرنا أنّه في أثناء عملية الانحلال الإشعاعي، يمكن أن ينحلّ العنصر المشعّ تلقائيًّا ليعطي عنصرًا مشعًّا آخر ينحلّ بدوره إلى أن يصل إلى عنصر مستقرّ. **إنّ مجموعة العناصر المشعّة التي ينحلّ أحدها ليعطي عنصرًا مشعًّا آخر حتّى ينتهي بعنصر مستقرّ تُسمّى سلاسل الانحلال الإشعاعي Chains of Radioactive Disintegration.**

تُسمّى السلسلة باسم أوّل عنصر فيها. فسلسلة اليورانيوم تبدأ من عنصر اليورانيوم ^{238}U لتنتهي بعنصر الرصاص ^{206}Pb بعد أن تطلِق عددًا من جسيمات ألفا وبيتا. يوضّح الشكل (108) سلسلة اليورانيوم والتحوّلات التي تتضمّن انبعاث جسيمات ألفا وبيتا.



(شكل 112)

إنّ الإزاحة أربع وحدات إلى أسفل على محور العدد الكتلي الرأسي، ووحدتين إلى اليسار على محور العدد الذرّي في الشكل (112) تمثّل انبعاث جسيم ألفا، بينما تمثّل الإزاحة وحدة واحدة إلى اليمين انبعاث بيتا. ومن سلاسل الانحلال الإشعاعي الطبيعي، نذكر أيضًا سلسلة الثوريوم وسلسلة الأكتينيوم. ومن سلاسل الانحلال الإشعاعي الاصطناعي، نذكر سلسلة النبتونيوم التي تبدأ بالنبتونيوم $^{237}_{92}Np$ وتنتهي بالبيزموث $^{209}_{83}Bi$.

8. عمر النصف Half-Life

تنحلّ النظائر المشعّة عشوائيًّا في العينة وبمعدّلات مختلفة، **ويُسمّى الزمن اللازم لتحلّل نصف عدد أنوية ذرّات العنصر المشعّ عمر النصف** $t_{1/2}$. يختلف عمر النصف باختلاف العناصر المشعّة، ويتراوح بين جزء من مليون $\frac{1}{1000000}$ من الثانية وبلايين السنين.

فالراديوم، على سبيل المثال، له عمر نصف يساوي 1620 سنة. أي أنّ (1)g من الراديوم يحتاج إلى 1620 سنة ليصبح (0.5)g وإلى 1620 سنة أخرى ليصبح (0.25)g. وهكذا، بعد زمن يساوي 20 مرّة عمر النصف، ستكون الكمّية التي بدأنا بها قد تضاءلت إلى حوالى جزء من مليون من الكمّية الأصلية.

العنصر	عمر النصف
يورانيوم 238 $^{238}_{92}U$	(4.5×10^9) سنة
يورانيوم 235 $^{235}_{92}U$	(1.2×10^8) سنة
كربون 14 $^{14}_{6}C$	(5.7×10^3) سنة
هيدروجين 3 $^{3}_{1}H$	(12.3) سنة
بولونيوم 210 $^{210}_{84}Po$	(140) يومًا
رصاص 214 $^{214}_{82}Pb$	(26.8)min
كبريت 30 $^{30}_{16}S$	(3.1)min
نيتروجين 16 $^{16}_{7}N$	(7.2)s

جدول (3)

يظهر الجدول (3) عمر النصف لبعض أنوية العناصر الطبيعية والاصطناعية المشعّة. ويتبين من الجدول أن عمر النصف ثابت للعنصر الواحد ويتوقف على نوعه.

يحسب الزمن الكلي لعملية تحلل اشعاعي من العلاقة التالية:

$$t = nt_{1/2}$$

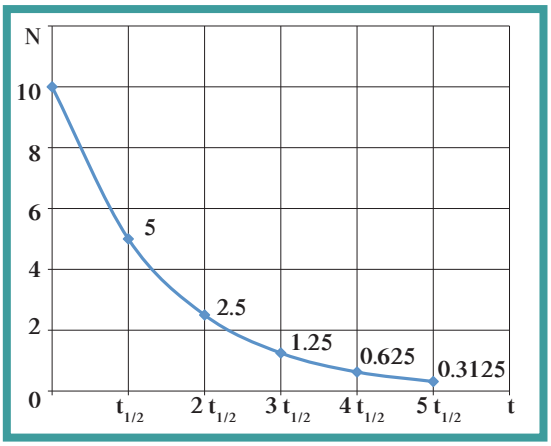
حيث تمثل n عدد مرات التكرار أي أن الزمن الكلي يساوي حاصل ضرب عدد مرات التكرار بعمر نصف العنصر المشع. يمكن تمثيل الانحلال الاشعاعي بيانيًّا لعينة تحتوي على N_0 من الأنوية في لحظة $t = 0$ بدالة الزمن بعد تكرار عملية الانحلال والذي يبين أن ما تبقى نتيجة انحلال أي مادة مشعة هو دالة أسية سالبة مع الزمن.

مثال (4)

عيّنة مشعّة تحتوي على (10)g عند لحظة $t = 0$.

(أ) أُحسب كتلة العيّنة المتبقّية بعد زمن t يساوي 5 مرّات عمر النصف.

(ب) أُرسم بيانيًّا تغيّر الكتلة بدالّة عمر النصف للعيّنة.



(شكل 113)

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: $m_0 = (10)g$

$t = 5\,t_{1/2}$

غير المعلوم: كتلة العيّنة المتبقّية

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) لنحصل على كتلة العيّنة المتبقّية، نقسم الكتلة الأساسية إلى النصف 5 مرّات:

$$(10g) \rightarrow (5)g \rightarrow (2.5)g \rightarrow (1.25)g \rightarrow (0.625)g \rightarrow (0.3125)g$$

إنّ كتلة العيّنة المتبقّية بعد 5 عمر النصف تساوي (0.3125)g.

(ب) باستخدام مقادير كتلة العيّنة من الجزء (أ)، نمثّل بيانيًّا تغيّر الكتلة بدلالة عمر النصف كما هو موضّح في الشكل (113):

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة حيث إنّ كتلة العيّنة المتبقّية أقلّ من الكتلة الأساسية للعيّنة المشعّة.

9. تطبيقات الانحلال الإشعاعي: تحديد العمر

Applications of Radioactive Disintegration: Determination of Age

إنّ نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ في المخلوقات الحية هي نسبة ثابتة بسبب التبادل المستمرّ لثاني أكسيد الكربون مع الوسط المحيط. وعندما يموت المخلوق تتغيّر هذه النسبة، وذلك بسبب اضمحلال $^{14}_{6}C$. وإنّ قياس نسبة $^{14}_{6}C$ المشعّ إلى $^{12}_{6}C$ المستقرّ في جسم الميّت يعطي التاريخ الذي كان المخلوق حيًّا فيه.

أمّا في تحديد عمر الأشياء غير الحيّة، فتُستخدَم نظائر اليورانيوم ^{238}U و^{235}U التي تتحوّل إلى نظائر رصاص ^{206}Pb و ^{207}Pb. وكلّما كان الجسم أكبر عمرًا، كانت نسبة نظائر الرصاص فيه أكبر. وباستخدام عمر النصف لليورانيوم ونسبة نظائر الرصاص في العيّنة، يمكن تحديد تاريخ تكوّنها وعمرها.

مراجعة الدرس 2-2

أوّلًا – أُذكر الفرق بين كلّ من إشعاع ألفا وبيتا وجامّا من حيث طبيعتها وشحنتها وتأثّرها بالمجال المغناطيسي.

ثانيًا – قارِن بين قدرة الإشعاعات الثلاثة (ألفا، بيتا، وجامّا) على النفاذ.

ثالثًا – عرِّف سلاسل الانحلال الإشعاعي.

رابعًا – أُحسب طول موجة الفوتون المنبعث من نواة مشعّة عندما تنتقل من حالة إثارة $E_i = (4.22)MeV$ إلى مستوى $E_f = (3.12)MeV$، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$.

خامسًا – عيّنة مشعّة تحتوي على $(20)g$ عند لحظة $t = 0$.

(أ) أُحسب كتلة العيّنة المتبقّية بعد زمن $t = 6\ t_{1/2}$.

(ب) أُرسم بيانيًّا تغيّر الكتلة بدالّة عمر النصف للعيّنة.

سادسًا – عيّنة من عنصر مشعّ بقي منها $\frac{1}{8}$ ممّا كانت عليه بعد 36 ساعة. أُحسب عمر النصف لهذا العنصر.

مسائل مع إجابات

1. ما هو العدد الكتلي والعدد الذرّي لنواة العنصر الناتج عن انحلال ألفا لنواة الرادون $^{226}_{88}Ra$؟
الإجابة: $A = 222$ ، $Z = 86$

2. ما نوع الإشعاعات الناتجة عن تحوّل $^{56}_{26}Fe$ إلى $^{56}_{27}Co$؟
الإجابة: بيتا سالب

3. أُحسب طاقة الإلكترون الناتجة عن انحلال بيتا سالب من نواة هيدروجين H^3_1 غير مستقرّة بحسب المعادلة التالية:
$$^{3}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{0}_{-1}e$$
علمًا أنّ كتلة الهيدروجين تساوي $(3.016050)a.m.u$ وكتلة الهيليوم تساوي $(3.016030)a.m.u$ وكتلة الإلكترون مهملة.
الإجابة: $(0.0186)MeV$

4. أُحسب نصف العمر لعيّنة كانت كتلتها $(1)mg$، وبعد ساعتين أصبحت كتلتها $(0.25)mg$.
الإجابة: ساعة

5. عينة من عنصر مشع تحتوي على $(8 \times 10^{-4})mg$ منه وعمر النصف له (7) أيام، كم يتبقى من العنصر المشع بعد مرور (28) يومًا؟
الإجابة: $(5 \times 10^{-5})mg$

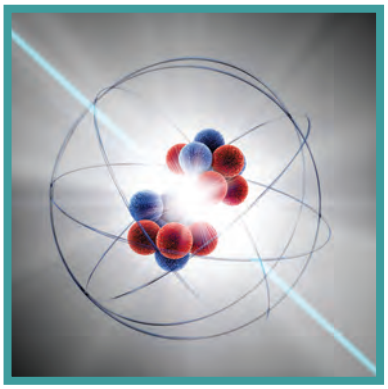
6. عينة من عنصر مشع تبقى $\frac{1}{32}$ منها بعد مرور (15) يومًا من تحضيرها أوجد عمر النصف للعنصر؟
الإجابة: $(3)days$

الدرس 2-3

الانشطار والاندماج النووي
Fission and Fusion of Atomic Nuclei

الأهداف العامة

- يعرّف الانشطار النووي.
- يعرّف الاندماج النووي.
- يقارن بين الانشطار النووي والاندماج النووي.
- يعلّق على الأهمّية التطبيقية لكلّ من التفاعلين كمصادر للطاقة.
- يصف الطرائق المستخدَمة في محطّات الطاقة النووية لإنتاج التفاعلات الانشطارية والتحكّم بها.



(شكل 114)

تناولنا في الدرس السابق التحوّلات النووية التلقائية للأنوية غير المستقرّة، واضمحلالها التلقائي لإنتاج أنوية مستقرّة. ودرسنا أيضًا التحوّلات النووية الاصطناعية، حيث تؤدّي التدخّلات الخارجية على نواة إلى تحوّلات نووية وإلى إنتاج عناصر مختلفة. **تسمّى التفاعلات التي تؤدّي إلى تغيّر في أنوية العناصر تفاعلات نووية Nuclear Reactions.**

تشمل التفاعلات النووية الانشطار النووي حيث تنقسم النواة إلى نواتين أو ثلاث أنوية أصغر، والاندماج النووي حيث تتّحد نواتين أو ثلاث أنوية مشكّلة نواة جديدة. إنّ دراسة الانشطار والاندماج النووي ومعرفة شروط حدوثهما هما محور هذا الدرس.

1. الانشطار النووي Nuclear Fission

كان رذرفورد أوّل من مهّد لفهم عمليات التفاعل النووي في العام 1919، عندما لاحظ اختفاء أنوية ألفا عند مرورها في غاز النيتروجين، حيث تحوّل غاز النيتروجين إلى أوكسجين وإطلاق بروتون. تلاه في العام 1934 العالمان كوري بحيث حصلا من تحوّل الألومنيوم المقذوف بأنوية ألفا على نظائر نواة الفوسفور الاصطناعية المشعّة $^{30}_{15}P$ التي كانت أوّل نواة اصطناعية مكتشَفة.

$$^{27}_{13}AL + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{30}_{15}P + {}^{1}_{0}n$$

في العام 1938 ، اكتشف العالمان أوتو هان Otto Hahn وفريتز ستراسمن Fritz Strassman أنّ قذف نواة اليورانيوم بنيوترون بطيء يؤدّي إلى انشطارها . فنواة اليورانيوم تمتصّ النيوترون وتصبح في حالة عدم استقرار ، لتنشطر إلى نواتين متوسّطتين ومترافقتين وانبعاث طاقة عالية ونيوترونات ، وقد سُمّي هذا التفاعل الانشطار النووي Nuclear Fission (شكل 115) .

الانشطار النووي Nuclear Fission هو تفاعل نووي تنقسم فيه نواة ثقيلة غير مستقرّة بعد قذفها بجسيم (نيوترون) إلى نواتين أو أكثر أخفّ كتلة وأكثر استقرارًا ومترافقة مع إطلاق طاقة .

يمكن تمثيل إحدى نتائج الانشطار النووي لليورانيوم بالمعادلة التالية:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3\ {}^{1}_{0}n $$

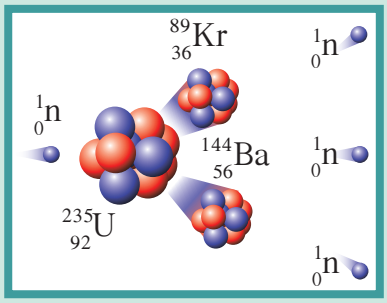
حيث إنّ مبدأ حفظ (بقاء) العدد الكتلي والعدد الذرّي اللذين تناولناهما في الدرس السابق مطبّقان .

تنتج عن هذا التفاعل كمّية هائلة من الطاقة المتحرّرة التي غالبًا ما تزيد عن 200 مليون إلكترون فولت . ويمكن حساب مقدار الطاقة المتحرّرة من الانشطار النووي باستخدام قانون حفظ (بقاء) الطاقة الذي تناولناه في الدرس السابق حيث إنّ:

$$E = \Delta m.c^2$$

علمًا أنّ $\Delta m = m_r - m_p$

علمًا أنّ m_r هي كتلة المتفاعلات و m_p هي كتلة النواتج .

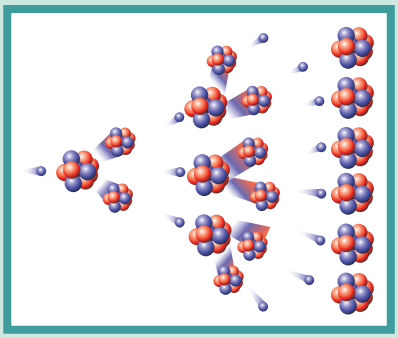


(شكل 115)
الانشطار النووي

2. التفاعل المتسلسل Chain Reaction

نلاحظ من معادلة انشطار اليورانيوم بنيوترون بطيء ظهور ثلاثة نيوترونات في الناتج . تصطدم النيوترونات الخارجة من النواة المنشطرة بعد تهدئة سرعتها بأنوية يورانيوم أخرى موجودة في عيّنة ما محدِثة مرّة أخرى تفاعلات انشطار جديدة وخروج نيوترونات أخرى ، مما يزيد من التفاعل وتكاثر عدد النيوترونات بسرعة ، يؤدّي بالتالي إلى التفاعل المتسلسل Chain Reaction (شكل 116) .

علمًا أن استخدام نيوترون بطيء لقذف نواة ثقيلة يعود لأن النيوترون عديم الشحنة فلا يتأثر بالمجالات الكهربائيّة والمغناطيسيّة ومن غير الضروري تخطي قوى التنافر الكهربائية في النواة.



(شكل 116)
التفاعل المتسلسل

التفاعل المتسلسل Chain Reaction هو التفاعل الذي يؤدّي إلى انشطار جديد، حيث تنتج عن كلّ انشطار جديد نيوترونات يمكنها إحداث المزيد من الانشطارات.

يقوم مبدأ عمل القنبلة النووية الانشطارية على التفاعل المتسلسل، ممّا يجعلها خطيرة وتؤثّر في حيّز واسع.

ويتمّ الاستفادة من الانشطارات النووية المتسلسلة أيضًا في المفاعلات النووية كمصدر للطاقة، وذلك بعد السيطرة عليها والتحكّم بعدد النيوترونات التي تصطدم بأنوية اليورانيوم وسرعتها.

ففي المفاعلات النووية، يتمّ إبطاء سرعة النيوترونات بتصادمها بمادّة ذات كتلة صغيرة من مثل الجرافيت والماء الثقيل D_2O، كما يتمّ التحكّم بسرعة التفاعل المتسلسل باستخدام عدد مناسب من قضبان مصنوعة من الكادميوم لتمتصّ بعض النيوترونات، وتبطئ عملية الانشطار، وتبقيها ضمن معدّل يسمح بالتحكّم بها.

مثال (1)

قُذِفت نواة اليورانيوم $^{235}_{92}U$ الساكنة بنيوترون بطيء لتنشطر بحسب المعادلة التالية:

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{91}_{40}Zr + {}^{142}_{58}Ce + 3\,{}^{1}_{0}n + 6\,{}^{0}_{-1}e$$

علمًا أنّ كتلة كلّ من: $m_U = (235.044)a.m.u$ و $m_{Zr} = (90.905)a.m.u$

و $m_{Ce} = (141.909)a.m.u$ و $m_n = (1.00866)a.m.u$.

وباعتبار أنّ كتلة الإلكترون مهمَلة بالنسبة إلى باقي الكتل،

(أ) أُحسب الطاقة المحرَّرة من هذا الانشطار النووي.

(ب) ما أشكال الطاقة التي تظهر عليها الطاقة المحرَّرة من الانشطار؟

(جـ) هل يمكن حدوث تفاعل متسلسل؟ اِشرح.

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم: كتل الأنوية

غير المعلوم: (أ) الطاقة المحرَّرة: ?=E

(ب) أشكال الطاقة بعد الانشطار؟

(جـ) إمكانية حدوث تفاعل متسلسل؟

2. أُحسب غير المعلوم.

(أ) اعتمادًا على مبدأ حفظ الطاقة، تُحسَب الطاقة المحرَّرة من المعادلة $E = \Delta m.c^2$. وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نحصل على:

$$E = [(235.044 + 1.00866) - (90.905 + 141.909 + 3 \times 1.00866)] \times (931.5\ MeV/c^2) \times c^2$$
$$= (198.111)MeV$$

(ب) إنّ الطاقة المحرَّرة تتحوّل إلى طاقة حركية للجسيمات وإشعاع جاما.

(جـ) يمكن حدوث تفاعل متسلسل بعد تهدئة سرعتها لأنّ الانشطار، كما تبيّن المعادلة، أنتج ثلاثة نيوترونات قادرة على توليد انشطارات نووية جديدة.

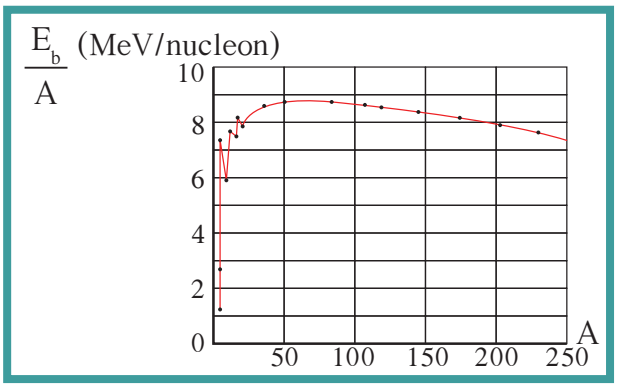
مثال (1) تابع

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ مقدار الطاقة المحرَّرة مقبول ومتوقّع من معادلة انشطار اليورانيوم.

3. الاندماج النووي Nuclear Fusion

يحدث الاندماج النووي عندما تتّحد أنوية صغيرة لتكوّن نواة أكبر وتطلِق طاقة محرَّرة وجسيمات. وبما أنّ الاندماج النووي ينتج أنوية كتلتها أكبر، فإنّ طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون تزداد مع ازدياد العدد الكتلي A.



(شكل 117)

لحدوث الاندماج، يجب أن تكون سرعة الأنوية كبيرة جدًّا للتمكّن من التغلّب على قوى التنافر الكهربائية، مما يتطلّب رفع درجة حرارة الأنوية إلى ملايين الدرجات المطلقة، لهذا تُسمّى عملية الاندماج النووي التفاعل النووي الحراري Thermonuclear Fusion Reaction.

من الأمثلة على عمليات الاندماج النووي، العمليات التي تحدث في النجوم. فالنجوم كلّها تولّد طاقة من خلال الاندماج النووي.

والنجوم بما فيها الشمس التي تصل درجة حرارتها إلى (5778)K تجعل الطاقة الحركية لأنوية الهيدروجين كبيرة جدًّا، ممّا يؤدّي إلى دمج أنوية الهيدروجين، مكوّنة نظائر أثقل للهيدروجين $^{2}_{1}H$ و $^{3}_{1}H$ والهيليوم ومطلقَة طاقة هائلة.

ويتنبّأ الفيزيائيون بحدوث ثلاثة تفاعلات نووية اندماجية متتالية في دورة بروتون – بروتون في الشمس وغيرها من النجوم التي تحتوي على هيدروجين، لإطلاق الطاقة، علمًا أنّ قوانين حفظ (بقاء) العدد الكتلي والذرّي والطاقة تنطبق تمامًا على تفاعل الاندماج النووي، كما هي الحال في الانحلال التلقائي والانشطار النووي.

في دورة بروتون – بروتون، تندمج أربع أنوية من الهيدروجين لتكوّن جسيم ألفا وتطلق 2 بوزيترون وطاقة محرَّرة تساوي 24 مليون إلكترون فولت. وتُمثَّل التفاعلات النووية الثلاثة المتسلسلة بالمعادلات التالية:

$$_{1}^{1}H + {}_{1}^{1}H \rightarrow {}_{1}^{2}H + {}_{+1}^{0}e + \nu$$
$$_{1}^{1}H + {}_{1}^{2}H \rightarrow {}_{2}^{3}He + \gamma$$
$$_{1}^{1}H + {}_{2}^{3}He \rightarrow {}_{2}^{4}He + {}_{+1}^{0}e + \nu$$

ويمكن تمثيل دورة التفاعلات الاندماجية الثلاثة بالمعادلة التالية:

$$4\ {}_{1}^{1}H \rightarrow {}_{2}^{4}He + 2\ {}_{+1}^{0}e + 2\nu + \gamma$$

من التطبيقات على الاندماج النووي القنبلة الهيدروجينية التي جُرِّبت عام 1952 ، والتي تبلغ طاقتها عدّة أضعاف الطاقة الانفجارية للقنبلة النووية الانشطارية . وبما أنّها تحتاج إلى طاقة ابتدائية عالية لدمج الأنوية ، فإنّ تفجيرها يتطلّب قنبلة انشطارية نووية لتعمل على رفع درجة الحرارة التي تحتاج إليها أنوية الهيدروجين لتندمج .

وحتّى الآن ، لا يمكن الاستفادة من طاقة الاندماج النووي في الأنشطة السلمية وتوليد الطاقة نظرًا إلى صعوبة التحكّم بها والسيطرة على الطاقة المحرَّرة .

مثال (2)

إنّ دمج نواتين من الديتوريوم بعد اكتساب كلّ منهما طاقة حركية تساوي 0.1(Mev) يؤدّي إلى انتاج نواة هيليوم وذلك بحسب المعادلة التالية:

$$_{1}^{2}H + {}_{1}^{2}H \rightarrow {}_{2}^{4}He$$

احسب الطاقة الكلّية الناتجة عن هذا الاندماج النووي علمًا أنّ الطاقة الحركية لنواة الهيليوم الناتجة مهمَلة وأنّ كتل الأنوية تساوي:

$m_{He} = (4.002603)a.m.u$ و $m_{H} = (2.014102)a.m.u$

طريقة التفكير في الحلّ

1. حلِّل: أُذكر المعلوم وغير المعلوم .

المعلوم: كتل النوية في معادلة الاندماج

الطاقة الحركية لكلّ نواة من أنوية الديتوريوم

غير المعلوم: الطاقة المحرَّرة

2. أُحسب غير المعلوم .

من مبدأ حفظ الطاقة الكلّية نكتب:

$$E = \Delta m.c^2 + 2KE$$
$$E = [(2 \times 2.014102 - 4.002603) \times (931.5\ MeV/c^2) \times c^2 + 0.2]$$
$$= (24.04733)MeV$$

3. قيّم: هل النتيجة مقبولة؟

إنّ مقدار الطاقة المحرَّرة مقبول ومتوقّع من معادلة الاندماج النووي .

مراجعة الدرس 2-3

أوّلًا – عرِّف الانشطار النووي.

ثانيًا – عرِّف الاندماج النووي.

ثالثًا – عرِّف التفاعل المتسلسل.

رابعًا – ما هو دور قضبان الكادميوم في المفاعلات النووية الانشطارية؟

خامسًا – يُستخدَم النيوترون لقذف نواة اليورانيوم في التفاعلات النووية الانشطارية. اِشرح سبب ذلك.

سادسًا – يمكن للنيوترون أن يتفاعل مع نواة نيتروجين $^{14}_{7}N$ في ثلاث عمليات مختلفة ليطلق نواة هيليوم أو تريتيوم $^{3}_{1}H$ أو بروتون. أُكتب المعادلات الثلاث التي تمثِّل كلّ تفاعل مطبِّقًا قوانين حفظ (بقاء) العدد الكتلي والعدد الذرّي.

سابعًا – أُحسب الطاقة المحرَّرة من الانشطار النووي لذرّة اليورانيوم والممثَّلة بالمعادلة التالية:

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + 2\,{}^{1}_{0}n$$

علمًا أنّ كتلة كلّ من:

$$m_{Xe} = (139.92164)a.m.u$$

$$m_{Sr} = (93.9154)a.m.u$$

$$m_{U} = (235.04392)a.m.u$$

$$m_{n} = (1.00866)a.m.u$$

ثامنًا – إذا كانت معادلة الاندماج النووي هي:

$$2\,{}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{A}_{Z}He + {}^{1}_{0}n$$

(أ) أكمِل المعادلة مستخدِمًا قانوني حفظ (بقاء) العدد الكتلي والعدد الذرّي.

(ب) أُحسب، بوَحدة MeV، الطاقة المحرَّرة من المعادلة، علمًا أنّ كتلة كلّ من:

$$m_{H} = (2.0141)a.m.u$$

$$m_{He} = (3.0162)a.m.u$$

$$m_{n} = (1.0087)a.m.u$$

مراجعة الوحدة الرابعة

المفاهيم

إلكترون ضوئي	Photo Electron	الاندماج النووي	Fusion
الانشطار النووي	Fission	التأثير الكهروضوئي	Photoelectric Effect
تحوّل	Transmutation	تردّد العتبة	Threshold Frequency
التفاعل المتسلسل	Nuclear Chain Reaction	ثابت بلانك	Plank's Constant
دالة الشغل	Work Function	طاقة الربط النووية	Nuclear Binding Energy
العدد الذرّي	Charge Number	العدد الكتلي	Mass Number
الفوتون	Photon	فيزياء الكمّ	Quantum Physics
قوى نووية	Nuclear Forces	الكمّات	Quanta
كمّية الحركة الزاوية	Angular Momentum	مبدأ عدم اليقين	Uncertainty Principle
المطيافية	Spectroscopy	موجات المادّة	Matter Waves
ميكانيكا الكمّ	Quantum Mechanics	نشاط إشعاعي	Radioactivity
نظير	Isotope	نماذج الذرّة	Atomic Models
نيوترينو	Neutrino	نيوترينو مضادّ	Anti−neutrino
نيوكليون	Nucleon	الأشعّة الكونية	Cosmic Rays

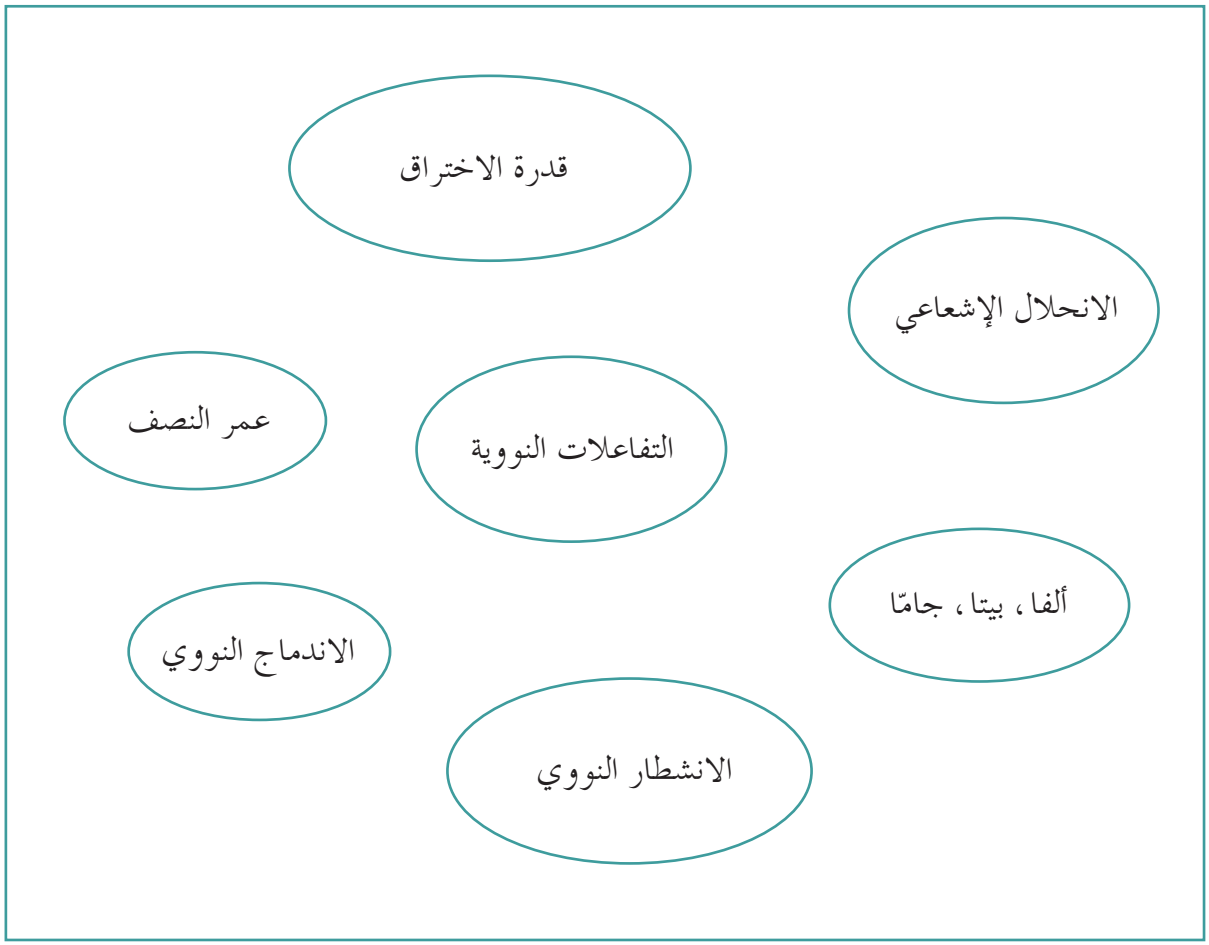
الأفكار الرئيسة في الوحدة

- النماذج الذرّية تقوم بفائدتها على فهم العمليات التي يصعب تخيّلها وليس بمصداقيتها.
- في نموذج بور للذرّة المسمّى النموذج الكوكبي، تدور الإلكترونات حول النواة.
- في نموذج دي برولي، تحيط موجات الإلكترون بالنواة في دوائر أنصاف أقطارها يساوي عددًا صحيحًا من الطول الموجي.
- تتضمّن نماذج الضوء جسيمات وموجات.
- اقترح نيوتن النموذج الجسيمي للضوء وهو سيل من جسيمات متناهية الصغر.
- يعرّف هيجنز الضوء على أنّه ظاهرة موجية.
- أعاد أينشتاين نموذج الجسيم للضوء باقتراحه أنّ الضوء يتكوّن من كمّات من الطاقة الكهرومغناطيسية.
- تنبعث الطاقة أو تُمتَصّ على شكل مضاعفات لكمّية غير قابلة للتجزئة، تتناسب مع تردّد مصدر الإشعاع، أي أنّ الطاقة المنبعثة أو الممتصّة تكون مكمّمة (كمّات).
- أطلق أينشتاين على كمّات الضوء تسمية فوتونات ومفردها فوتون.
- إنّ الطاقة الكلّية للفوتون هي نفسها طاقته الحركية، وهذه الطاقة تتناسب طرديًّا مع تردّد الفوتون.
- التأثير الكهروضوئي هو انبعاث الإلكترونات من فلزات معيّنة نتيجة سقوط ضوء له تردّد مناسب، وتُسمّى الإلكترونات المنبعثة نتيجة سقوط الضوء إلكترونات ضوئية.
- إذا كان تردّد الضوء الساقط على سطح ما أقلّ من تردّد العتبة للسطح ($f < f_0$) فلن يستطيع تحرير إلكترون، لأنّ طاقته تكون أقلّ من دالة الشغل.

- تؤكّد ظاهرة كومبتون على أنّ الفوتونات تتفاعل مع المادّة بحسب طاقتها، فإمّا أن تُمتَصّ بالكامل أو تتشتّت بعد أن تخسر جزءًا من طاقتها من دون أن تتغيّر سرعتها.
- أكّد دي برولي على الطبيعة المزدوجة للجسيمات، حيث إنّ لها طاقة وكتلة وتردّد موجي وطول موجي.
- يُسمّى التردّد الموجي للجسيمات تردّد دي برولي.
- يشرح نموذج بور الأطياف الذرّية للعناصر.
- خطوط الطيف هي نتيجة انتقال الإلكترونات بين مستويات طاقة أعلى إلى مستويات طاقة أقلّ.
- تتألّف نواة الذرّة من بروتونات موجَبة الشحنة، ونيوترونات لا شحنة لها كتلتها متقاربة لكتلة البروتونات.
- نظائر العنصر هي ذرّات لها العدد الذرّي Z نفسه (الخواصّ الكيميائية نفسها) وتختلف في العدد الكتلي A.
- يُعبَّر عن الكتلة بما يكافئها من الطاقة بحسب معادلة أينشتاين $E = m.c^2$، وتُسمّى طاقة السكون.
- القوّة النووية بين النيوكليونات هي قوّة قصيرة المدى تنشأ بين النيوكليونات المتجاورة.
- تحتاج عملية فصل نيوكليونات النواة إلى تعريض النواة إلى طاقة خارجية هائلة تُسمّى طاقة الربط النووية.
- النشاط الإشعاعي (الانحلال الإشعاعي) هو عملية اضمحلال تلقائي مستمرّ من دون أيّ مؤثّر خارجي لأنوية غير مستقرّة لتصبح أكثر استقرارًا حيث تزداد طاقة الربط النووية بين نيوكليوناتها وتقلّ كتلتها.
- يرافق عملية اضمحلال الأنوية غير المستقرّة وتحوّلها إلى أنوية أكثر استقرارًا إطلاق ثلاثة أنواع من الإشعاعات: إشعاعات ألفا α وبيتا β وجامّا γ وغيرها من الجسيمات.
- يحدث التحوّل الاصطناعي نتيجة قذف أنوية عناصر بجسيمات تؤدّي إلى تحوّلها إلى عناصر ونظائر جديدة.
- إنّ مجموعة العناصر المشعّة التي ينحلّ أحدها ليعطي عنصرًا مشعًّا آخر إلى أن تنتهي بعنصر مستقرّ تُسمّى سلسلة الانحلال الإشعاعي.
- الزمن اللازم لتنحلّ نصف ذرّات العنصر المشعّ يُسمّى عمر النصف $t_{1/2}$.
- يُستخدَم $^{14}_{6}C$ لتحديد عمر الآثار الخشبية وبقايا النباتات والحيوانات، بينما تُستخدَم الفلزات المشعّة لتحديد عمر الموادّ غير الحية.
- الانشطار النووي هو تفاعل نووي حيث تنقسم نواة ثقيلة غير مستقرّة بعد قذفها بجسيم (نيوترون) إلى نواتين أو أكثر أخفّ كتلة وأكثر استقرارًا ومترافقة مع إطلاق طاقة.
- التفاعل المتسلسل هو التفاعل الذي يؤدّي إلى انشطار جديد بحيث ينتج عن كلّ انشطار جديد نيوترونات يمكنها إحداث المزيد من الانشطارات.
- يحصل الاندماج النووي عندما تتّحد نوى صغيرة لتكوّن نواة أكبر وتطلِق طاقة محرَّرة وجسيمات.

خريطة مفاهيم الوحدة

إستخدم المصطلحات الموضَّحة في الشكل التالي لرسم خريطة مفاهيم تنظِّم معظم الأفكار التي احتوتها الوحدة.



تحقق من فهمك

ضع علامة (✓) في المربّع الواقع أمام الإجابة الأنسب في كلّ ممّا يلي:

حيث لزم الأمر، اِعتبر أنّ:

$h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$ ، $c = (3 \times 10^{8})m/s$ ، $(1)eV = (1.6 \times 10^{-19})J$ ، $(1)a.m.u = (931.5)MeV/c^2$

1. الطاقة التي تنبعث أو تُمتَصّ من الذرّة:
   - ☐ تكون على شكل مضاعفات لكمّية غير قابلة للتجزئة.
   - ☐ تتناسب عكسيًّا مع تردّد مصدر الإشعاع.
   - ☐ تتناسب مع الطول الموجي لمصدر الإشعاع.
   - ☐ تكون على شكل خطوط مجزّأة.
2. إنّ طاقة فوتون تردّده $(3 \times 10^{14})Hz$ تساوي تقريبًا:
   - ☐ $(0.23)eV$
   - ☐ $(1.24)eV$
   - ☐ $(2.3)eV$
   - ☐ $(3.2)eV$
3. إنّ تردّد الفوتون المنبعث من انتقال الإلكترون بين مستويي طاقة لهما فرق مقدار $(10.2)eV$ يساوي:
   - ☐ $(0.47 \times 10^{15})Hz$
   - ☐ $(2.47 \times 10^{15})Hz$
   - ☐ $(1.47 \times 10^{15})Hz$
   - ☐ $(2.47 \times 10^{-15})Hz$
4. إنّ مقدار جهد القطع لإلكترون شحنته $(1.6 \times 10^{-19})C$ يمتلك طاقة حركية مقدارها $(1.6 \times 10^{-20})J$ يساوي:
   - ☐ $(0.01)V$
   - ☐ $(0.1)V$
   - ☐ $(10)V$
   - ☐ $(100)V$
5. إنّ طول موجة دي برولي لجسم كتلته $(10)g$ يتحرّك بسرعة $(660)m/s$ يساوي:
   - ☐ $(1 \times 10^{-34})m$
   - ☐ $(2 \times 10^{-34})m$
   - ☐ $(1.5 \times 10^{-34})m$
   - ☐ $(5 \times 10^{-34})m$
6. إنّ عدد نيوكليونات ذرّة اليورانيوم $^{238}_{92}U$ يساوي:
   - ☐ 238
   - ☐ 92
   - ☐ 146
   - ☐ 54

7. تُعرَّف طاقة الربط النووية على أنّها:
- ☐ طاقة السكون في الأنوية المستقرّة.
- ☐ الطاقة لانتزاع إلكترون من الغلاف الخارجي للذرّة.
- ☐ الطاقة لانتزاع نيوكليون من النواة.
- ☐ الطاقة اللازمة لتدمير نواة العنصر وانتزاع مكوّناتها.

8. تُخفَّف سرعة النيوترونات في المفاعل النووية باستخدام:
- ☐ الماء الثقيل.
- ☐ الرصاص.
- ☐ الكادميوم.
- ☐ نيوترونات ساكنة.

9. عندما يطلق العنصر المشعّ أشعّة جامّا فإنّ:
- ☐ العدد الكتلي يزداد بمقدار 1 والعدد الذرّي لا يتغيّر.
- ☐ العدد الكتلي لا يتغيّر والعدد الذرّي يزداد بمقدار 1.
- ☐ العدد الكتلي يزداد بمقدار 1 والعدد الذرّي يزداد بمقدار 1.
- ☐ العدد الكتلي لا يتغيّر والعدد الذرّي لا يتغيّر.

تحقق من معلوماتك

أجب عن الأسئلة التالية:

1. أيّ من الفوتونات التالية له طاقة أكبر: فوتون من الأشعّة تحت الحمراء أو الضوء المرئي أو الأشعّة فوق البنفسجية؟
2. لا نستطيع ملاحظة الطول الموجي للمادّة المتحرّكة في تجاربنا اليومية على الرغم من كتلتها وسرعتها المقبولتين. هل يعود سبب ذلك إلى كبر طولها الموجي أو صغره؟
3. حزمتان من الإلكترونات تسيران بسرعتين مختلفتين. لإلكترونات أيّ منهما طول موجي دي برولي أكبر؟
4. **(أ)** أُذكر عدد النيوترونات والبروتونات في الأنوية التالية:

$^{6}_{3}\mathrm{Li}$ ، $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ ، $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$

(ب) ما عدد الإلكترونات التي تحيط بكلّ نواة من هذه الأنوية؟
5. إذا كان عمر النصف لعيّنة مادّة مشعّة أسبوعًا واحدًا فكم يتبقّى منها في نهاية الأسبوع الثالث؟
6. ماذا يحدث للعدد الكتلي والعدد الذرّي في النواة المشعّة عندما تطلق إشعاع بيتا السالب؟
7. ما دور النيوترون في الانشطار النووي؟
8. ما العدد الكتلي والذرّي للعنصر الناتج عن تحلّل الراديوم $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ بانبعاث ألفا؟
9. عندما نتحدّث عن مخاطر التعرّض لإشعاع ما، هل هذا يعني أنّنا نتحدّث بشكل عام عن إشعاع ألفا أو بيتا أو جامّا؟ اِشرح.
10. هل كتلة نواة العنصر أكبر من مجموع كتل مكوّناتها أو أصغر منها؟
11. وُجِدت في المقابر الأثرية قطعة من التماثيل الحجرية. هل يمكن استخدام التأريخ بالكربون لمعرفة عمرها؟

تحقق من مهاراتك

حلّ المسائل التالية:

1. أُحسب نصف قطر نواة ذرّة البلاتينوم $^{195}_{78}Pt$.
2. تحتوي نواة ذرّة الزنك على 65 نيوكليون . أُحسب:
   (أ) نصف قطر النواة .
   (ب) حجم النواة .
   (جـ) كثافة النواة الحجمية .
   علمًا أنّ مقدار كتلة النيوكليون الواحد يساوي $(1.7 \times 10^{-27})kg$ ، العدد الذرّي للزنك يساوي $Z = 30$ ومقدار نصف قطر النيوكليون يساوي $r_0 = (1.2 \times 10^{-15})m$.
3. أُحسب العدد الكتلي للنواة التي يساوي نصف قطرها $\frac{1}{3}$ نصف قطر نواة أزوميوم $^{189}_{76}Os$.
4. أُحسب تردّد الفوتون القادر على جعل إلكترون يقفز من مستوى طاقة $(-3.8)eV$ إلى مستوى طاقة $(-2.6)eV$.
5. انتقل إلكترون داخل الذرّة من مستوى طاقة $E_1 = (-0.85)eV$ إلى مستوى طاقة $E_2 = (-13.6)eV$. أُحسب:
   (أ) طاقة الفوتون المنبعث من انتقال الإلكترون .
   (ب) تردّد الفوتون المنبعث .
6. أُحسب طول موجة الفوتون المنبعث من نواة $^{208}_{81}Tl$ عندما تنتقل من حالة إثارة $E_3 = (0.616)MeV$ إلى مستوى $E_2 = (0.04)MeV$ ، علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$.
7. حزمة من الأشعّة السينية لها طول موجي $\lambda_0 = (0.3)nm$ سقطت على جسم مادّي . يصنع الفوتون المتشتت زاوية $(30°)$ بالنسبة إلى اتّجاه الفوتون الساقط . أُحسب الطول الموجي للفوتون المتشتّت بتلك الزاوية ، علمًا أنّ كتلة الإلكترون يساوي $(9.1 \times 10^{-31})kg$ ، وثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$.
8. أُحسب كم يجب أن تكون سرعة إلكترون كتلته $m = (9.1 \times 10^{-31})kg$ إذا كان طول موجة دي برولي يساوي $(14.56 \times 10^{-11})m$.
9. تتحرّك بكتيريا في عيّنة طبّية بسرعة $(1.5)\mu m/s$ ، ولها طول موجة دي برولي يساوي $(2 \times 10^{-19})m$. أُحسب كتلة تلك البكتيريا في العيّنة علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$.
10. سقط ضوء تردّده $f = (2 \times 10^{15})Hz$ على سطح فلز له تردّد عتبة $(1.4 \times 10^{15})Hz$. علمًا أنّ ثابت بلانك يساوي $h = (6.6 \times 10^{-34})J.s$ ، وأنّ كتلة الإلكترون تساوي $m_e = (9.1 \times 10^{-31})kg$.

أوّلًا – اِستنتج أنّ الفوتون قادر على انتزاع إلكترون .

ثانيًا – أُحسب:
(أ) طاقة الفوتون الساقط على السطح .
(ب) دالة الشغل Φ .
(جـ) الطاقة الحركية للإلكترون المنبعث .
(د) سرعة الإلكترون لحظة تركه لسطح الفلز .

11. إنّ طاقة الربط النووية للتريتيوم $^{3}_{1}H$ تساوي 2.8)MeV). أُحسب كتلة التريتيوم علمًا أنّ كتلة البروتون تساوي $m_p = (1.00727)a.m.u$ وكتلة النيوترون تساوي $m_n = (1.00886)a.m.u$.

12. أُحسب طاقة الربط النووية لكلّ نيوكليون لنواة ذرّة الفناديوم $^{51}_{23}V$، علمًا أنّ كتلة نواة الفناديوم $m_V = (50.943961)a.m.u$ وكتلة البروتون $m_p = (1.00727)a.m.u$ وكتلة النيترون $m_n = (1.00886)a.m.u$.

13. وُضِع نظير مشعّ أمام كاشف الإشعاع الذي سجّل 80 انحلالًا في الثانية. بعد ثماني ساعات، سجّل الكاشف 5 إشعاعات في الثانية. أُحسب عمر النصف للعنصر المشعّ.

14. عيّنة من عنصر مشعّ بقي منها $\frac{1}{32}$ ممّا كانت عليه بعد 20 ساعة. أُحسب عمر نصف لهذا العنصر.

15. تتحوّل نواة يورانيوم $^{238}_{92}U$، بعد عدد من انحلالات ألفا وبيتا سالب، إلى نواة الرصاص $^{206}_{82}Pb$.

(أ) أُحسب عدد أنوية ألفا وعدد بيتا سالب الناتج عن الانحلال.

(ب) أُكتب معادلة الانحلال النهائية التي تبيّن تحوّل اليورانيوم إلى رصاص.

16. تنحلّ نواة يورانيوم $^{238}_{92}U$ غير مستقرّة إلى نواة ثوريوم بانبعاث هيليوم $^{4}_{2}He$.

(أ) اِستخدم قوانين البقاء للتحوّلات النووية لكتابة معادلة الانحلال.

(ب) أُحسب الطاقة المحرَّرة من انبعاث الهيليوم $^{4}_{2}He$ من انحلال نواة اليورانيوم $^{238}_{92}U$، علمًا أنّ كتلة اليورانيوم تساوي $238.0508)a.m.u$، وكتلة الثوريوم تساوي $234.0435)a.m.u$، وكتلة الهيليوم تساوي $4.0026)a.m.u$ و $(1)a.m.u = (931.5)MeV/c^2$.

17. قُذِفت نواة اليورانيوم $^{235}_{92}U$ الساكنة بنيوترون بطيء لتنشطر بحسب المعادلة التالية:

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{88}_{38}Sr + {}^{136}_{54}Xe + x\ {}^{1}_{0}n$$

علمًا أنّ كتلة كلّ من: $m_U = (235.043925)a.m.u$ و $m_{Sr} = (87.905625)a.m.u$ و $m_{Xe} = (135.90722)a.m.u$ و $m_n = (1.008665)a.m.u$:

(أ) أُحسب عدد النيوترونات الناتجة عن هذا الانشطار.

(ب) أُحسب الطاقة المحرَّرة من هذا الانشطار النووي.

(جـ) ما هي أشكال الطاقة التي تظهر عليها الطاقة المحرَّرة من الانشطار؟

(د) هل يمكن حدوث تفاعل متسلسل؟ اِشرح.

التواصل

أُكتب مقالًا لا يزيد عن عشرة أسطر تبيّن فيه كيفية استخدام النظائر المشعّة في الأغراض الطبّية.
حدِّد في مقالك بعض أنواع النظائر المشعّة المستخدَمة ونطاق استخداماتها.

نشاط بحثي

أجرِ بحثًا تبيّن فيه مخاطر الإشعاعات النووية على الكائنات الحية. أشِر في بحثك إلى اختلاف تأثير الإشعاعات الثلاثة في الكائنات الحية باختلاف أنواعها، ومقدار طاقتها، وكتلة الجسم المعرَّض للإشعاعات.
أُذكر أيضًا في بحثك خطر التأيين الناتج عن التعرّض للإشعاع النووي الذي يؤدّي إلى إلحاق الضرر بالأنسجة الداخلية للخلايا، وإحداث تغيّرات في المادّة الوراثية، وتحوّل الخلايا السليمة إلى خلايا سرطانية.
ضمِّن بحثك بعض الشروط والاحتياطات الواجب اتّخاذها في مجال الوقاية من مخاطر الإشعاعات.