

الفيزياء

الصف الثاني عشر

للفرعين
العلمي والصناعي

ISBN 978-9957-84-774-6



9 789957 847746



الفيزياء



للصف الثاني عشر
الفرعين العلمي والصناعي

الناشر

وزارة التربية والتعليم

إدارة المناهج والكتب المدرسية

يسر إدارة المناهج والكتب المدرسية استقبال ملاحظاتكم وآرائكم على هذا الكتاب على العناوين الآتية:

هاتف: ٨-٥/٤٦١٧٣٠٤، فاكس: ٤٦٣٧٥٦٩، ص.ب: ١٩٣٠ الرمز البريدي: ١١١١٨

أو بوساطة البريد الإلكتروني: E-mail: Scientific.Division@moe.gov.jo

قرّرت وزارة التربية والتعليم تدريس هذا الكتاب في مدارس المملكة الأردنية الهاشمية جميعها، بناءً على قرار مجلس التربية والتعليم رقم ٤/٢٠١٧، تاريخ ١٧/١/٢٠١٧م، بدءاً من العام الدراسي ٢٠١٧/٢٠١٨م.

الحقوق جميعها محفوظة لوزارة التربية والتعليم

ص. ب (١٩٣٠) عمّان - الأردن

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية

(٢٠١٧/٣/١٥٧٢)

ISBN: 978 - 9957 - 84 - 774 - 6

أشرف على تأليف هذا الكتاب كل من:

أ.د. معروف خليل عبد الله (رئيساً)	أ.د. خالد موسى أبو مراد
د. عادل أحمد شاهين	أ. بديع صالح الخطيب
أ. موسى محمود جرادات	أ. شفاء طاهر عباس (مقرراً)
وقام بتأليفه كل من:	
ربحي سعيد حميدي	د. حسين محمود الخطيب
ميمي محمد التكروري	أمل محمد الحوامدة
د. أحمد محمد عوض الله	إبتهال إسماعيل العالم

التحرير العلمي: شفاء طاهر عباس

التصميم: نايف محمد أمين مراشدة

التحرير الفني: أنس خليل الجرابعة

الإنجاز: د. عبد الرحمن سليمان أبو صعيلىك

دقق الطباعة وراجعها: شفاء طاهر عباس

١٤٣٨ هـ / ٢٠١٧ م

٢٠١٨ - ٢٠١٩ م

الطبعة الأولى

أعيدت طباعته

المقدمة

٥

الفصل الدراسي الأول

الوحدة الأولى: الكهرباء

٦ الفصل الأول: المجال الكهربائي

٣٠ الفصل الثاني: الجهد الكهربائي

٥٨ الفصل الثالث: المواسعة الكهربائية

٨٠ الفصل الرابع: التيار الكهربائي ودارات التيار المباشر

الفصل الدراسي الثاني

الوحدة الثانية: المغناطيسية

١٢٤ الفصل الخامس: المجال المغناطيسي

١٦٦ الفصل السادس: الحث الكهرومغناطيسي

الوحدة الثالثة: الفيزياء الحديثة

١٩٦ الفصل السابع: مقدمة إلى فيزياء الكم

٢٣٨ الفصل الثامن: الفيزياء النووية

٢٧٣ الملاحق

٢٧٨ المراجع

جاء كتاب الفيزياء للصف الثاني عشر، منسجماً مع فلسفة التربية والتعليم، ومحققاً لرؤيتها في تحسين جودة التعلم والتعليم، ومواكبة التطور العلمي والتكنولوجي المتسارع الذي يشهده العالم.

ويشتمل هذا الكتاب على موضوعات عدة، بُنيت بأسلوب تربوي حديث يكون للطالب فيه الدور الرئيس والمحوري في عمليتي التعلم والتعليم، ويعرض محتوى الكتاب العلمي بأسلوب شائق، وتنظيم تربوي فاعل، يعكس توجهات المنهاج وفلسفته. وقد أُلِّف هذا الكتاب بحيث يساعد على تنمية مهارات التفكير العلمي والتحليل والتفسير والاستنتاج بأسلوب بنائي، ويهتم بالربط بين المفاهيم، واستخدام مهارات حسابية وقراءة الرسوم البيانية وتحليلها، والربط بين العلاقات. بالإضافة إلى اشتماله على العديد من الأنشطة العملية التي تُنفذ بسهولة، وتمكّن الطالب من استخدام مهارات العلم للوصول إلى الاستنتاج المنطقي السليم؛ لتحقيق الهدف من النشاط. ويشتمل الكتاب على رسوم وصور وأشكال توضيحية تساعد الطالب على تصور المفاهيم وتقريبها، وجعلها أكثر سهولة واستيعاباً، ويراعي أيضاً الفروق الفردية بين الطلبة، إلى جانب التكامل مع المواد الدراسية الأخرى، وربط الفيزياء بالحياة.

ويتضمن الكتاب العديد من التطبيقات الحديثة، التي تساهم في توسيع مدارك الطلبة. ولأن الغاية من التعلم هي إظهار أثر ما يتعلمه الطالب في حياته اليومية، فقد تضمن المحتوى أسئلة ونصوصاً تحفز الطلبة على التأمل في التعلم، وتشجعهم على اتباع الأساليب العلمية الصحيحة في جوانب الحياة المختلفة.

وجاء هذا الكتاب في ثلاث وحدات دراسية: الكهرباء، والمغناطيسية، والفيزياء الحديثة. وتحتوي الوحدة الأولى على أربعة فصول هي المجال الكهربائي، والجهد الكهربائي، والمواسعة الكهربائية، والتيار الكهربائي ودارات التيار المباشر، وتحتوي الوحدة الثانية على فصلي المجال المغناطيسي، والحث الكهرمغناطيسي، أما الوحدة الثالثة فتحتوي على فصلي مقدمة إلى فيزياء الكم، والفيزياء النووية. وجاء في نهاية الكتاب بعض الملاحق التي تفيد الطلبة في عملية التعلم.

ولأن عملية تطوير المناهج والكتب المدرسية عملية مستمرة؛ فزجوزملاءنا المعلمين وأولياء الأمور تزويدنا بأية ملحوظات تغني الكتاب وتساهم في تحسينه، بما يلبي حاجات الطلبة وطموحات المجتمع الأردني.

الفصل الدراسي الأول

المجال الكهربائي

Electric Field

الفصل الأول

في هذا الفصل

(١-١)

القوة الكهربائية والمجال الكهربائي.

(٢-١)

المجال الكهربائي الناشئ عن شحنات نقطية.

(٣-١)

المجال الكهربائي المنتظم.

(٤-١)

حماية الأجهزة الإلكترونية من المجالات الكهربائية الخارجية.

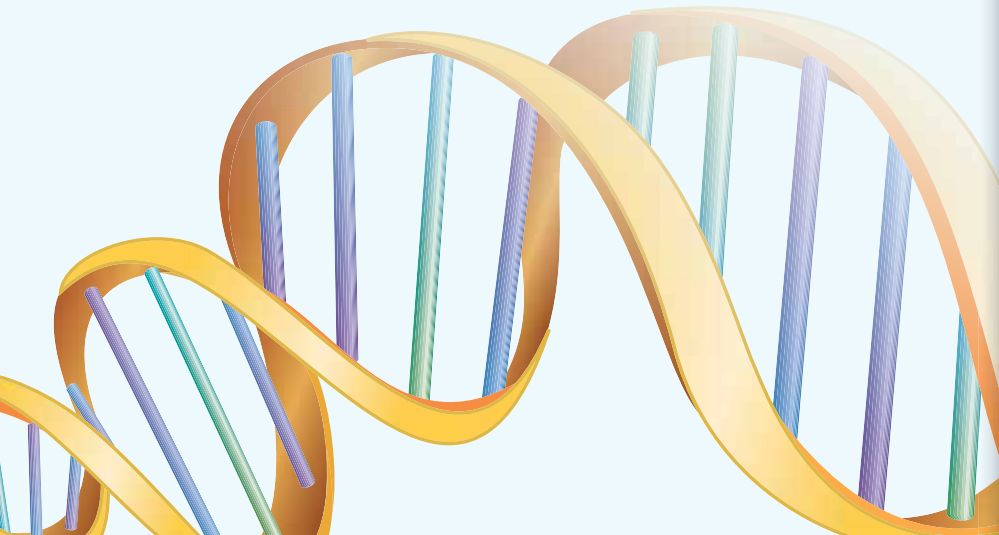
يعود تاريخ اكتشاف الكهرباء السكونية إلى القرن السادس قبل الميلاد على يد الفيلسوف طاليس. وعبر التاريخ درس العديد من العلماء الظواهر الكهربائية المرتبطة بالشحنات الساكنة. وفي هذا الفصل سنبدأ دراستنا لعلم الكهرباء السكونية بدراسة المجال الكهربائي. فما المقصود بالمجال الكهربائي؟ وكيف نكشف عنه؟ وما الآثار المترتبة على المجالات الكهربائية؟ هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

يتكون الحمض النووي (DNA)

من سلسلتين طويلتين، وترتبط

كل سلسلة بالأخرى بقوى

تجاذب كهربائية.



ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- * توضح المقصود بالمجال الكهربائي لشحنة نقطية، وتعبر عنه رياضيًا.
- * تطبق العلاقات الرياضية للمجال الكهربائي في حساب محصلة مجالات شحنات نقطية عدة في بعدين.
- * تصف المجال الكهربائي المنتظم، وتعبر عنه رياضيًا.
- * تحل مسائل حسابية تتعلق بحركة جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم.
- * تبحث في حماية الأجهزة الإلكترونية من المجالات الكهربائية الخارجية.



تتكون المادة من ذرات، ومن مكونات الذرة بروتونات موجبة الشحنة وإلكترونات سالبة الشحنة، وفي الذرة المتعادلة يكون عدد الإلكترونات مساوياً عدد البروتونات، ويصبح الجسم مشحوناً عندما يفقد عدداً صحيحاً من الإلكترونات أو يكسبها، لذلك فإن شحنة أي جسم يجب أن تكون من مضاعفات شحنة الإلكترون، وهذا ما يسمى مبدأ تكمية الشحنة، ويمكن التعبير عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$q = n e \quad (1-1)$$

حيث (q): شحنة الجسم، و(n): عدد الإلكترونات المفقودة أو المكتسبة، و(e): شحنة الإلكترون، وهي أصغر شحنة حرة في الطبيعة، وتساوي (١,٦ × ١٠^{-١٩}) كولوم، وتسمى الشحنة الأساسية. عندما تكون أبعاد الأجسام المشحونة صغيرة جداً بالنسبة إلى المسافات بينها، تبدو الشحنة الكهربائية على الجسم كأنها تتركز في نقطة، فيطلق على الشحنة الكهربائية التي يحملها الجسم عندئذ شحنة نقطية.

تنشأ بين الأجسام المشحونة قوى كهربائية تكون تنافراً أو تجاذباً، وقد تمكن العالم كولوم من تحديد العوامل التي يعتمد عليها مقدار القوة الكهربائية المتبادلة بين شحنتين نقطيتين؛ حيث توصل إلى أن مقدار القوة الكهربائية (ق_ك) يتناسب طردياً مع مقدار كل من الشحنتين النقطيتين (q_١، q_٢) وعكسياً مع مربع المسافة بينهما، وتعتمد القوة الكهربائية أيضاً على طبيعة الوسط الذي توجد فيه الشحنات. ويُعبّر عن مقدار القوة الكهربائية بالعلاقة الرياضية الآتية والتي تعرف بقانون كولوم:

$$q_k = \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1-2)$$

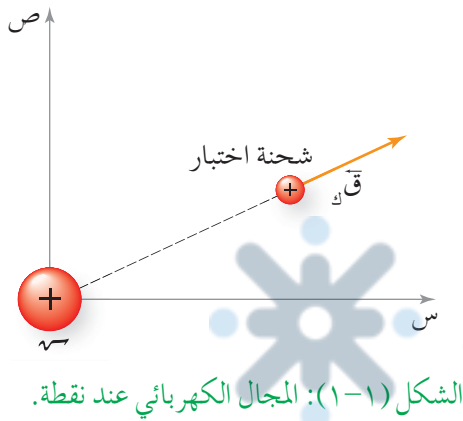
حيث (ف): المسافة بين الشحنتين النقطيتين، و(أ): ثابت كولوم، ويعتمد فقط على طبيعة الوسط الذي توجد فيه الشحنات، ويُعبّر عن هذا الثابت بالمقدار (١/επ٤)؛ حيث (ε): السماحية الكهربائية للوسط، فإذا كان الوسط فراغاً أو هواءً فإنه يُعبّر عن السماحية الكهربائية بالرمز (ε_٠) وتساوي (٨,٨٥ × ١٠^{-١٢}) كولوم^٢/نيوتن.م^٢. وعليه فإن قيمة الثابت (٩ × ١٠^{-٩}) نيوتن.م^٢/كولوم^٢ تقريباً، وستقتصر دراستنا على الشحنات الكهربائية التي توضع في الهواء.

ويمكن التوصل لوحد قياس ثابت كولوم من قانون كولوم على النحو الآتي:

$$ق_ك = \frac{أ_١ أ_٢}{ف_٢} \leftarrow [أ] = \frac{[ق][ف]}{[س][س]} = \frac{نيوتن.م^٢}{كولوم}$$

حيث يعني وضع رمز الكمية الفيزيائية بين قوسين مربعين، الوحدة التي تقاس بها تلك الكمية في النظام العالمي للوحدات.

تُعد القوة الكهربائية ذات تأثير عن بعد، وقد تمكن العالم فارادي من تفسير تأثيرها بافتراض مفهوم المجال الكهربائي، إذ يُعد المجال الكهربائي خاصية للحيز المحيط بالشحنة الكهربائية (س) يظهر تأثيره على شكل قوة كهربائية تؤثر في شحنة أخرى (س). توضع في هذا الحيز، لذلك تصنف القوة الكهربائية بأنها قوة مجال مثل قوة الجاذبية الأرضية والقوة المغناطيسية.



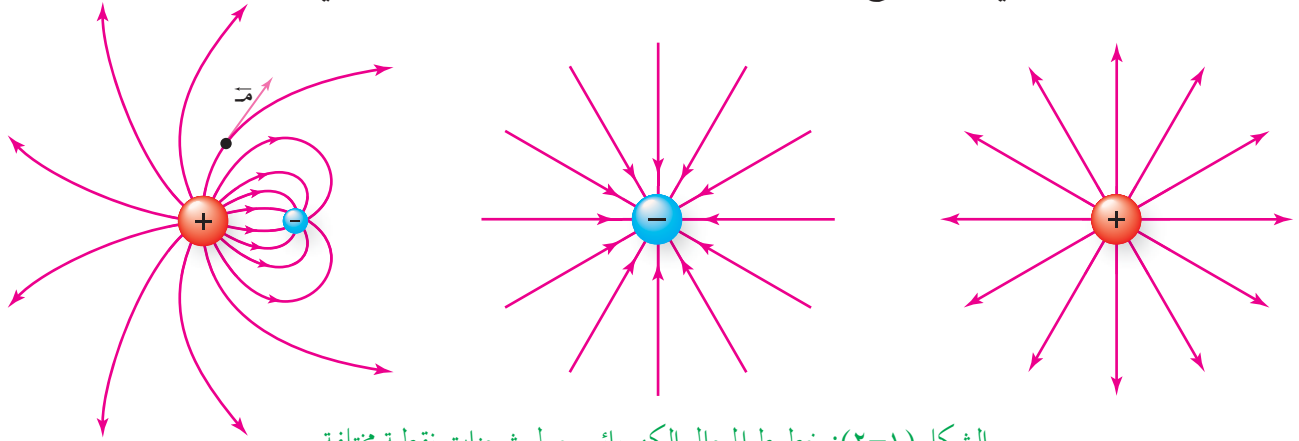
وتستخدم في الكشف عن المجال الكهربائي شحنة نقطية صغيرة موجبة تسمى شحنة الاختبار، فإذا وضعت شحنة اختبار عند نقطة ضمن مجال كهربائي فإنها تتأثر بقوة كهربائية، انظر الشكل (١-١)، ويكون مقدار المجال الكهربائي عند النقطة مساوياً مقدار القوة الكهربائية مقسوماً على مقدار شحنة الاختبار.

ويعرف **المجال الكهربائي** عند نقطة بأنه القوة الكهربائية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة الموضوعة عند تلك النقطة. ويعبر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$م = \frac{ق_ك}{س} \dots \dots \dots (١-٣)$$

والمجال الكهربائي كمية متجهة، يحدد اتجاهه عند نقطة باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة الاختبار الموجبة الموضوعة عند تلك النقطة. ومن المهم الانتباه إلى أن المجال الكهربائي لا يعتمد على مقدار شحنة الاختبار، فإذا أصبح المجال الكهربائي عند نقطة معلوماً فإنه يمكن حساب القوة الكهربائية المؤثرة في أي شحنة كهربائية (س). توضع عند تلك النقطة من العلاقة (ق_ك = م.س)، وفي النظام العالمي للوحدات يقاس المجال الكهربائي بوحدة (نيوتن/ كولوم).

ولتعرّف المجال الكهربائي ووصفه مقداراً واتجهاً، فإنه يُخطّط برسم خطوط وهمية تسمى خطوط المجال الكهربائي، إذ يمثل **خط المجال الكهربائي** المسار الذي تسلكه شحنة الاختبار الموجبة حرة الحركة عند وضعها في المجال الكهربائي. ويبين الشكل (٢-١) خطوط المجال الكهربائي حول شحنات نقطية مختلفة. لاحظ أن خطوط المجال الكهربائي لا تتقاطع، وتبدو خارجة من الشحنة الموجبة وداخلة في الشحنة السالبة؛ لماذا؟



الشكل (٢-١): خطوط المجال الكهربائي حول شحنات نقطية مختلفة.

وتدل كثافة خطوط المجال الكهربائي في منطقة ما (عدد الخطوط التي تخترق وحدة المساحة عمودياً) على مقدار المجال الكهربائي؛ حيث يكون مقدار المجال الكهربائي كبيراً في المنطقة التي تقترب فيها الخطوط، بينما يكون مقداره صغيراً في المنطقة التي تتباعد فيها الخطوط، ويُحدّد اتجاه المجال الكهربائي عند نقطة ما برسم مماس لخط المجال الكهربائي عند تلك النقطة كما في الشكل (٢-١).

مراجعة (١-١)

- ١ هل يمكن لجسم مشحون أن يحمل شحنة (3×10^{-19}) كولوم؟ فسر إجابتك.
- ٢ يعد الكولوم وحدة قياس كبيرة نسبياً من الناحية العملية. وضح ذلك عن طريق حساب عدد الإلكترونات التي يفقدها جسم أو يكسبها لتصبح شحنته (١) كولوم.
- ٣ بيّن كيف يمكن الاستفادة من خطوط المجال الكهربائي في معرفة كل من:
 - أ مقدار المجال الكهربائي في منطقة ما. **ب** اتجاه المجال الكهربائي عند نقطة.
- ٤ وضعت شحنة اختبار موجبة عند نقطة في مجال كهربائي فتأثرت بقوة باتجاه المحاور الصادي السالب:
 - أ ما اتجاه المجال عند تلك النقطة؟
 - ب إذا وضع إلكترون بدلاً من شحنة الاختبار، فهل يتغير مقدار المجال الكهربائي أو اتجاهه عند تلك النقطة؟ فسر إجابتك.

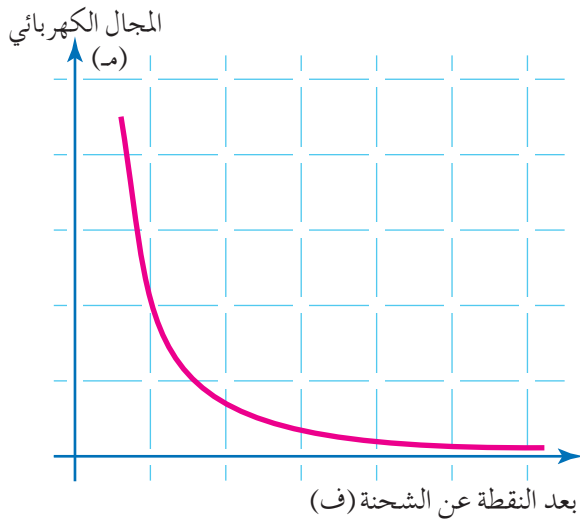
تستخدم العلاقة (٢-١) لحساب المجال الكهربائي عند نقطة بغض النظر عن مصدر المجال الكهربائي، فإذا كان مصدر المجال الكهربائي شحنة نقطية فما العوامل التي يعتمد عليها المجال الكهربائي عند نقطة تقع في مجال تلك الشحنة؟

يبين الشكل (٣-١) نقطة تقع في المجال الكهربائي لشحنة نقطية (س) على بعد (ف) منها، فإذا وضعت شحنة نقطية (س) عند تلك النقطة فإن المجال الكهربائي يؤثر فيها بقوة كهربائية (ق_ك). وبما أن الشحنة الكهربائية المولدة للمجال الكهربائي نقطية، وكذلك الشحنة الكهربائية المتأثرة (س) فإنه طبقاً لقانون كولوم؛ العلاقة (٢-١)، تكون القوة الكهربائية المؤثرة في (س):

$$ق_ك = \frac{أ_س س_ف}{ف^2} \text{ وبتعويض (ق_ك) في العلاقة (٣-١)؛ فإن:}$$

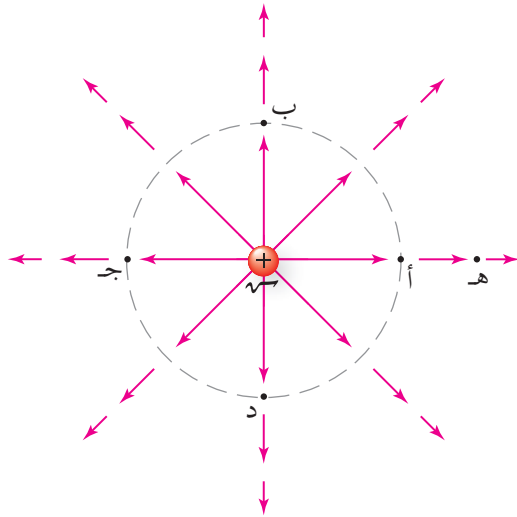
$$\vec{م} = \frac{أ_س س_ف}{ف^2} \text{ وباختصار (س) فإن:}$$

$$\vec{م} = \frac{أ_س}{ف^2} \text{ (٤-١)}$$



الشكل (٤-١): منحنى (ف - م).

تبين العلاقة الرياضية (٤-١) أن مقدار المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية عند نقطة في الهواء يتناسب طردياً مع مقدار الشحنة الكهربائية المولدة للمجال الكهربائي (المصدر)، وعكسياً مع مربع المسافة بين الشحنة الكهربائية والنقطة المراد حساب المجال عندها. ويبين الشكل (٤-١) التمثيل البياني للعلاقة بين المجال الكهربائي عند نقطة، وبعد هذه النقطة عن الشحنة.

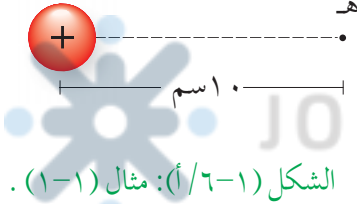


الشكل (٥-١): المجال الكهربائي لشحنة نقطية موجبة.

ويعد المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية مجالا غير منتظم؛ أي أنه غير ثابت في المقدار والاتجاه. ففي الشكل (٥-١) يكون مقدار المجال الكهربائي عند النقاط (أ، ب، ج، د) متساوياً؛ لأن لهذه النقاط البعد نفسه عن الشحنة النقطية (س)، إلا أن اتجاه المجال الكهربائي عند كل منها مختلف، وكذلك فإن مقدار المجال الكهربائي عند النقطة (هـ) أقل من مقداره عند النقطة (أ) بالرغم من أن للمجال الكهربائي الاتجاه نفسه عند هاتين النقطتين.

مثال (١-١)

يبين الشكل (١-٦/أ) شحنة نقطية (2×10^{-6}) كولوم موضوعة في الهواء. إذا كانت (هـ) نقطة تقع في مجال الشحنة الكهربائية وعلى بعد (10) سم منها فجد عند النقطة (هـ):



$$s = 2 \times 10^{-6} \text{ كولوم}$$

الشكل (١-٦/أ): مثال (١-١).

١ المجال الكهربائي مقداراً واتجهاً.

٢ القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة (-2×10^{-9}) كولوم توضع عند هذه النقطة، مقداراً واتجهاً.

الحل:

١ نحسب مقدار المجال الكهربائي عند النقطة (هـ) من العلاقة:

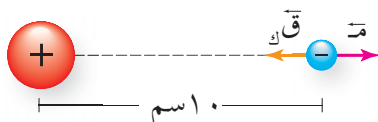
$$E = \frac{A_s}{r^2}$$

$$= \frac{2 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^9}{(10)^2}$$

$$= 18 \times 10^3 \text{ نيوتن/كولوم}$$

ونحدد اتجاه المجال الكهربائي باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة اختبار موجبة نفترض وجودها عند النقطة (هـ)، فيكون اتجاه المجال الكهربائي باتجاه المحور السيني الموجب.

٢ يحسب مقدار القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة توضع عند النقطة (هـ) من العلاقة:



$$قك = م٣$$

$$= 18 \times 10^{-9} \times 2 \times 10^{-9}$$

$$= 36 \times 10^{-18} \text{ نيوتن}$$

الشكل (١-٦/ب): مثال (١-١).

لاحظ أن مقدار الشحنة الكهربائية يعوض من غير الإشارة، وإذا كانت الشحنة المتأثرة سالبة، فإن اتجاه القوة الكهربائية يكون بعكس اتجاه المجال الكهربائي؛ أي باتجاه المحور السيني السالب، لاحظ الشكل (١-٦/ب).

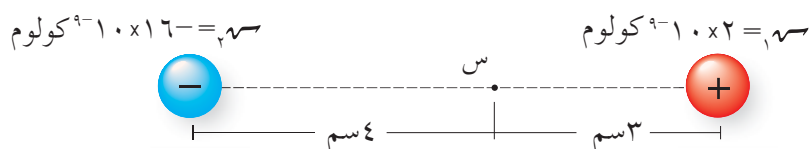
إذا كانت النقطة تقع في مجالات كهربائية عدة ناشئة عن مجموعة من الشحنات النقطية فكيف نحسب المجال الكهربائي عند تلك النقطة؟ في هذه الحالة يحسب المجال الكهربائي بإيجاد المجال الكهربائي المحصل الناشئ عن هذه الشحنات عند تلك النقطة. والأمثلة الآتية توضح ذلك.

مثال (٢-١)

يبين الشكل (١-٧/أ) شحنتين نقطيتين موضوعتين في الهواء. بالاعتماد على البيانات المثبتة في الشكل، جد:

١ المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (س) مقداراً واتجهاً.

٢ القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة (٢) بيكو كولوم توضع عند النقطة (س) مقداراً واتجهاً.



الشكل (١-٧/أ): مثال (٢-١).

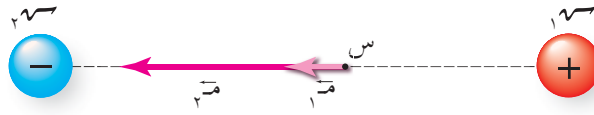
الحل:

١ نحسب مقدار المجالين الكهربائيين (م_١، م_٢) عند النقطة (س) الناشئين عن الشحنتين (م_١، م_٢) على الترتيب من العلاقة (١-٤):

$$م_١ = \frac{١٨ \times 10^{-9}}{٣^2} = ٢ \times 10^{-9} \text{ نيوتن/كولوم، باتجاه المحور السيني السالب.}$$

$$\vec{M}_2 = \frac{q_1 \times q_2 \times r}{r^3} = \frac{9 \times 10^{-10} \times 16 \times 10^{-10}}{(2-1.0 \times 4)^3} = \frac{1.44 \times 10^{-19}}{1} = 1.44 \times 10^{-19} \text{ نيوتن/كولوم، باتجاه المحور السيني السالب.}$$

بما أن المجالين الكهربائيين ($\vec{M}_1$ ، $\vec{M}_2$) بالاتجاه نفسه كما في الشكل (١-٧/ب)، فإن المجال الكهربائي المحصل يساوي حاصل جمعهما:



الشكل (١-٧/ب): مثال (١-٢).

$$M = M_1 + M_2$$

$$= 2 \times 10^{-19} + 9 \times 10^{-19}$$

$$M = 11 \times 10^{-19} \text{ نيوتن/كولوم، باتجاه المحور السيني السالب.}$$

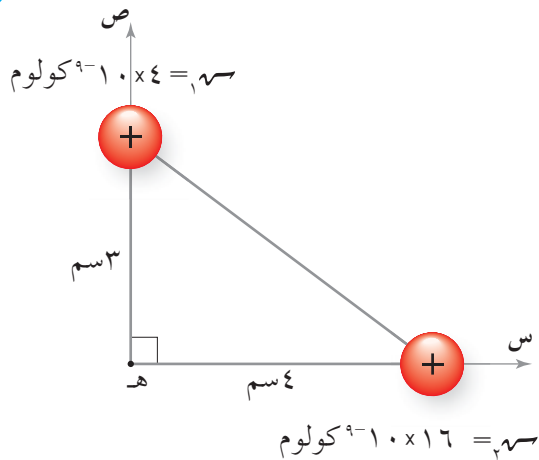
٢) تتأثر الشحنة الكهربائية (٢) ببيكو كولوم الموضوعة عند النقطة (س) في المجال الكهربائي المحصل (م)، بقوة كهربائية محصلة تحسب من العلاقة:

$$Q = M \cdot r$$

$$= 11 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{-10} = 22 \times 10^{-29} \text{ نيوتن.}$$

ويكون اتجاه القوة الكهربائية مع اتجاه المجال الكهربائي المحصل؛ أي باتجاه المحور السيني السالب؛ لأن الشحنة الكهربائية المتأثرة موجبة.

مثال (١-٣)



شحنتان نقطيتان موضوعتان في الهواء، كما يبين الشكل (١-٨/أ). جد المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (هـ) مقدارًا واتجاهًا.

الحل:

نحسب مقدار المجال الكهربائي عند النقطة (هـ) والناشئ عن كل من الشحنتين (M_1 ، M_2) بتطبيق العلاقة (١-٤):

الشكل (١-٨/أ): مثال (١-٣).

$$\vec{M}_1 = \frac{q_1 \times q_2 \times r}{r^3} = \frac{10^{-9} \times 4 \times 10^{-9} \times 9}{(3^2 - 10 \times 3)} = \frac{3.6 \times 10^{-17}}{-27} = -1.33 \times 10^{-18} \text{ كولوم}$$

$\vec{M}_2 = 10 \times 4 = 40$ نيوتن/كولوم، باتجاه المحور الصادي السالب.

$$\vec{M}_3 = \frac{q_1 \times q_2 \times r}{r^3} = \frac{10^{-9} \times 16 \times 10^{-9} \times 9}{(4^2 - 10 \times 4)} = \frac{1.44 \times 10^{-17}}{-24} = -6 \times 10^{-18} \text{ كولوم}$$

$\vec{M}_4 = 10 \times 9 = 90$ نيوتن/كولوم، باتجاه المحور السيني السالب.

وبما أن المجالين الكهربائيين ($\vec{M}_1$ ، $\vec{M}_2$) متعامدان

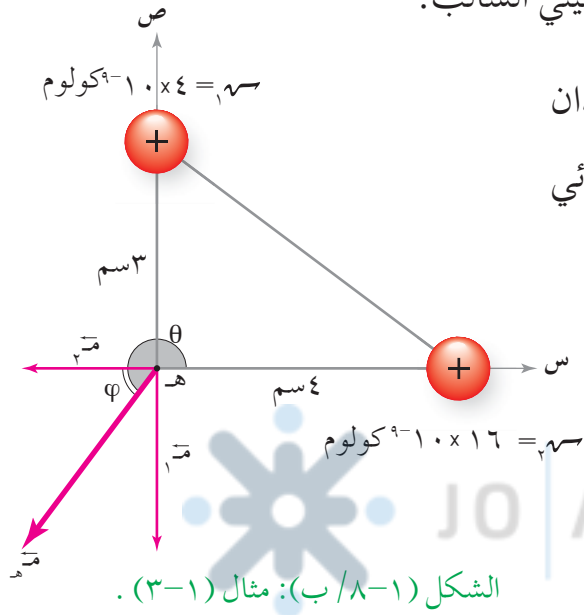
لاحظ الشكل (١-٨/ب)، فإن المجال الكهربائي

المحصل يحسب من قاعدة فيثاغورس:

$$\vec{M} = \sqrt{\vec{M}_1^2 + \vec{M}_2^2}$$

$$\vec{M} = \sqrt{(10 \times 9)^2 + (10 \times 4)^2}$$

$$\vec{M} \approx 9.8 \times 10^4 \text{ نيوتن/كولوم}$$



الشكل (١-٨/ب): مثال (٣-١).

ويبين الشكل (١-٨/ب) أن المجال الكهربائي المحصل يصنع زاوية (φ) مع المحور السيني

السالب، حيث $\varphi = \frac{1}{\vec{M}} = \frac{4}{9}$ ، فتكون $\varphi \approx 24^\circ$.

ويحدد اتجاه المجال الكهربائي المحصل بالزاوية المحصورة بين المحور السيني الموجب

والمجال الكهربائي المحصل (θ)؛ بعكس دوران عقارب الساعة، وعليه تكون:

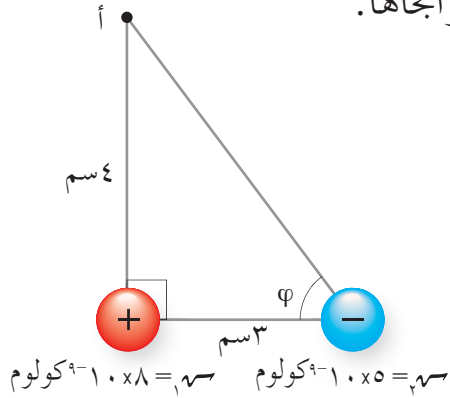
$$\theta = (24 + 180) = 204^\circ$$

$$\vec{M} = 9.8 \times 10^4 \text{ نيوتن/كولوم، } 204^\circ$$

شحنتان نقطيتان موضوعتان في الهواء، كما هو مبين في الشكل (١-٩/أ). ادرس الشكل ثم جد المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (أ) مقداراً واتجهاً.

الحل:

نحسب مقدار المجال الكهربائي عند النقطة (أ) الناشئ عن كل من الشحنتين باستخدام العلاقة:



الشكل (١-٩/أ): مثال (٤-١).

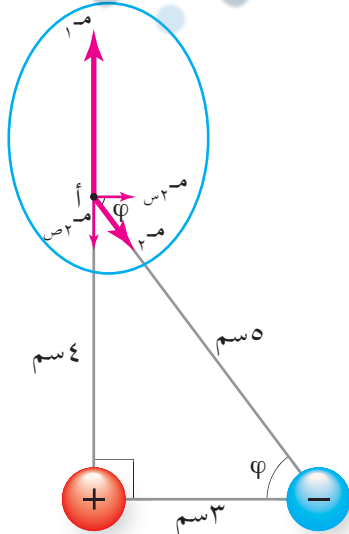
$$E = \frac{q}{r^2}$$

$$E_1 = \frac{1.0 \times 10^{-9} \times 9}{(0.04)^2} = 5.625 \times 10^6 \text{ N/C}$$

$E_2 = 1.0 \times 10^6 \text{ N/C}$ باتجاه المحور الصادي الموجب.

$$E_2 = \frac{1.0 \times 10^{-9} \times 9}{(0.05)^2} = 3.6 \times 10^6 \text{ N/C}$$

$E_3 = 1.0 \times 10^6 \text{ N/C}$ باتجاه يصنع زاوية (ϕ) مع المحور السيني الموجب. كما يبين الشكل (١-٩/ب).



ولإيجاد محصلة المجالين الكهربائيين، نحلل (E_3) إلى مركبتين، لاحظ الشكل (١-٩/ب):

$$E_{3x} = E_3 \cos \phi$$

$$= \frac{3}{5} \times 1.0 \times 10^6 = 0.6 \times 10^6 \text{ N/C}$$

$$E_{3y} = E_3 \sin \phi$$

$$= \frac{4}{5} \times 1.0 \times 10^6 = 0.8 \times 10^6 \text{ N/C}$$

الشكل (١-٩/ب): مثال (٤-١).

نجد مجموع المركبات السينية:

$$E_x = 1.0 \times 10^6 \approx 1.0 \times 10^6 \text{ N/C} \text{ باتجاه المحور السيني الموجب.}$$

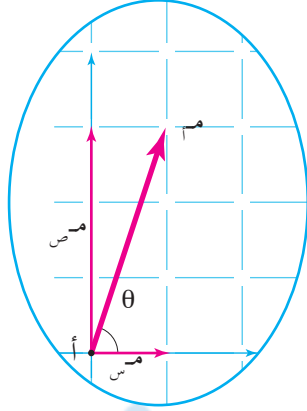
نجد مجموع المركبات الصادية:

$$م_ص = م_1 - م_2 = ١٠ \times ٤,٥ - ١٠ \times ١,٤٤$$

$$م_ص = ١٠ \times ٣,٠٦ \approx ١٠ \times ٣ \text{ نيوتن/كولوم، باتجاه المحور الصادي الموجب.}$$

ولإيجاد المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (أ):

$$م_1 = \sqrt{(١٠ \times ٣)^2 + (١٠ \times ١)^2} = ١٠ \times \sqrt{١٠} \text{ نيوتن/كولوم.}$$



باتجاه يصنع زاوية (θ) مع المحور السيني الموجب كما هو

مبين في الشكل (١-٩/ج). حيث:

$$\theta = \frac{م_ص}{م_س} = \frac{٣}{١}$$

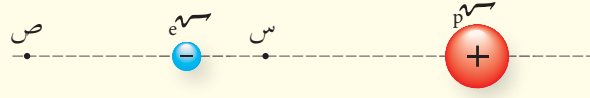
فتكون $\theta = ٧٢^\circ$ ، وعليه فإن:

$$م_1 = ١٠ \times \sqrt{١٠} \text{ نيوتن/كولوم، } ٧٢^\circ.$$

الشكل (١-٩/ج): مثال (١-٤).

JO | ACADEMY.com

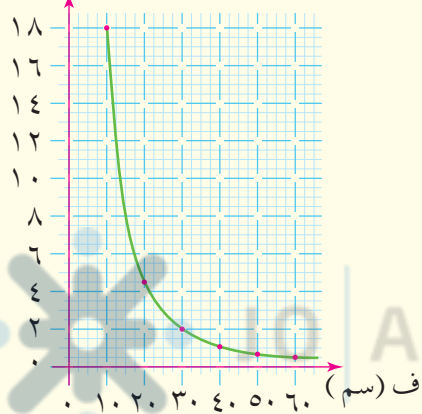
١ بين الشكل (١٠-١) إلكترونًا وبروتونًا موضوعين على المحور السيني. حدد اتجاه المجال الكهربائي المحصل عند النقطتين (س)، (ص).



الشكل (١٠-١): سؤال (١).

٢ بين الشكل (١١-١) منحنى العلاقة بين المجال الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية والبعد عنها. معتمدًا على الشكل جد مقدار كل مما يأتي:

م $\times 10^{-9}$ (نيوتن/كولوم)



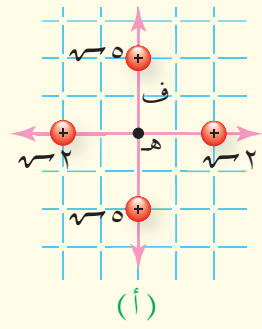
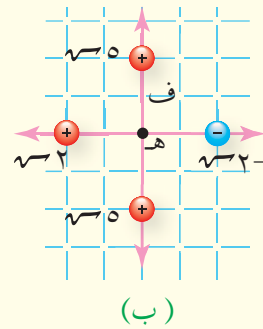
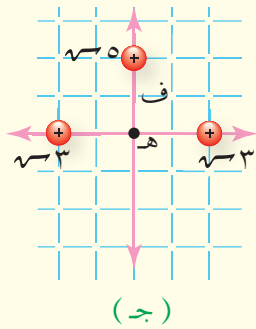
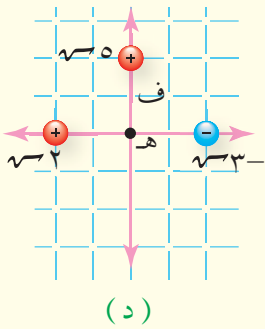
الشكل (١١-١): سؤال (٢).

أ المجال الكهربائي عند نقطة تبعد عن الشحنة (٣٠) سم.

ب القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة (1×10^{-9}) كولوم توضع عند نقطة تبعد (٢٠) سم عن الشحنة.

ج الشحنة الكهربائية المولدة للمجال.

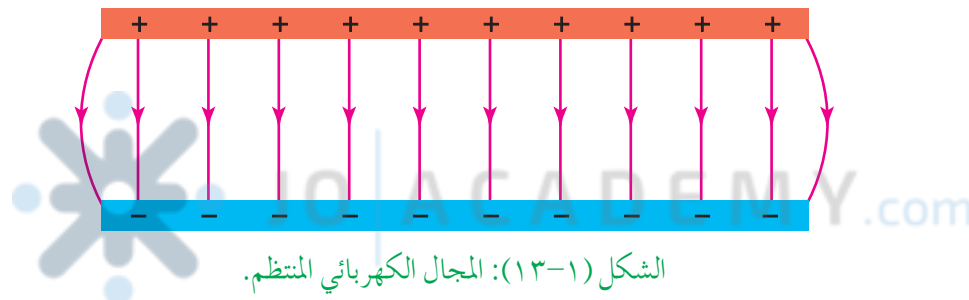
٣ بين الشكل (١٢-١) توزيعات مختلفة من الشحنات النقطية، إذا كان (ف) يمثل بعد كل شحنة عن النقطة (هـ)، فجد المجال الكهربائي المحصل مقدارًا واتجاهًا عند النقطة (هـ) بدلالة كل من (س، ف).



الشكل (١٢-١): سؤال (٣).

يعد المجال الكهربائي الناشئ عن الشحنات النقطية مجالاً كهربائياً غير منتظم، فكيف يمكن الحصول على مجال كهربائي منتظم؟ وكيف نعبر عنه رياضياً؟

عند شحن صفيحتين موصلتين متوازيتين إحداهما بشحنة سالبة والأخرى بشحنة موجبة كما يبين الشكل (١-٣)، فإن الشحنة تتوزع على سطحيهما بانتظام، وينشأ مجال كهربائي منتظم ثابت مقداراً واتجاهاً عند النقاط جميعها في الحيز بين الصفيحتين وبعيداً عن الأطراف. ويمثل المجال الكهربائي المنتظم بخطوط مستقيمة متوازية والبعد بينها متساوٍ، اتجاهاً يمثل اتجاه المجال الكهربائي، وكثافتها تعبر عن مقداره.



الشكل (١-٣): المجال الكهربائي المنتظم.

لاحظ أن مصدر المجال الكهربائي في هذه الحالة الشحنات الموزعة على سطحي الصفيحتين. فإذا كان مقدار الشحنة على إحدى الصفيحتين (q) ومساحة الصفيحة (A) فإن كمية الشحنة الكهربائية لكل وحدة مساحة تعرف **بالكثافة السطحية للشحنة**، ويرمز لها بالرمز (σ) حيث ($\sigma = \frac{q}{A}$)، وتقاس بوحدة (كولوم/م^٢).

يتناسب مقدار المجال الكهربائي المنتظم طردياً مع الكثافة السطحية للشحنة على الصفيحتين، ويعتمد المجال الكهربائي أيضاً على السماحية الكهربائية للوسط الفاصل بين الصفيحتين، فإذا كانت الكثافة السطحية للشحنة على الصفيحتين متساوية، وكان الوسط بين الصفيحتين هواءً أو فراغاً فإن المجال الكهربائي المنتظم يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (١-٥)$$

عندما يوضع جسيم مشحون كتلته (ك) في مجال كهربائي منتظم فإنه يتأثر بقوة كهربائية ثابتة مقداراً واتجاهاً. فإذا تحرك الجسيم تحت تأثير هذه القوة فإنه سيكتسب تسارعاً (ت) ثابتاً مقداراً واتجاهاً، وفقاً للقانون الثاني لنيوتن. وفي حالة الجسيمات الذرية (البروتونات والإلكترونات) فإن وزنها يكون مهملاً مقارنة بالقوة الكهربائية المؤثرة فيها؛ لذلك فإن القوة الكهربائية تمثل $Q_{\text{المحصلة}}$ أي أن:

$$Q_{\text{المحصلة}} = K \cdot T$$

$$Q_K = K \cdot T$$

$$m \cdot a = K \cdot T$$

وبذلك فإن التسارع:

$$T = \frac{m \cdot a}{K} \quad (1-6)$$

ويكون اتجاه التسارع باتجاه القوة الكهربائية. وبما أن التسارع ثابت، فإن حركة الجسيم يمكن وصفها باستخدام معادلات الحركة بتسارع ثابت:

$$E = E_0 + T \cdot Z \quad (1-7)$$

$$\Delta S = E_0 \cdot Z + \frac{1}{2} T \cdot Z^2 \quad (1-8)$$

$$E^2 = E_0^2 + 2 \cdot T \cdot \Delta S \quad (1-9)$$

حيث (ع): السرعة النهائية للجسيم، (ع): السرعة الابتدائية للجسيم، (ΔS): الإزاحة التي يقطعها الجسيم، (ز): الزمن اللازم للحركة.

مثال (٥-١)

صفيحتان موصلتان متوازيتان مساحة كل منهما (1×10^{-2}) م^٢، شحنت إحداهما بشحنة موجبة والأخرى بشحنة سالبة، وكانت الشحنة الكهربائية على كل صفيحة $(1,77 \times 10^{-9})$ كولوم.

إذا علمت أن ($E_0 = 8,85 \times 10^{-12}$) كولوم^٢/نيوتن.م^٢. فاحسب مقدار:

١ المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين.

٢ القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة (1×10^{-9}) كولوم توضع في الحيز بين الصفيحتين.

٣ المجال الكهربائي عندما تصبح الشحنة الكهربائية ضعفي ما كانت عليه على كل من الصفيحتين، مع بقاء مساحة كل من الصفيحتين ثابتة.

الحل:

١ أولاً: نحسب الكثافة السطحية للشحنة بتطبيق العلاقة:

$$\frac{q}{A} = \sigma$$

$$\sigma = \frac{1.77 \times 10^{-9}}{2 \times 10^{-2}} = 8.85 \times 10^{-8} \text{ كولوم/م}^2$$

ثانياً: نحسب المجال الكهربائي بتطبيق العلاقة:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{8.85 \times 10^{-8}}{8.85 \times 10^{-12}} = 10 \text{ نيوتن/كولوم}$$

٢ نحسب القوة الكهربائية المؤثرة في الشحنة الكهربائية بتطبيق العلاقة:

$$F = qE$$

$$F = 10 \times 10^{-9} \times 2 = 2 \times 10^{-8} \text{ نيوتن}$$

٣ عندما تصبح الشحنة الكهربائية ضعفي ما كانت عليه مع بقاء مساحة الصفيحتين ثابتة تصبح

(σ) ضعفي قيمتها، وبما أن المجال الكهربائي (E) يتناسب طردياً مع كثافة الشحنة السطحية

(σ) فإن المجال الكهربائي يصبح ضعفي ما كان عليه، أي أن ($E = 2 \times 10$) نيوتن/كولوم.

تحرك بروتون من السكون في مجال كهربائي منتظم مقداره (٥٠١) نيوتن/ كولوم من نقطة عند الصفيحة الموجبة إلى نقطة عند الصفيحة السالبة، كما يبين الشكل (١-١٤)، وأصبحت سرعة البروتون (١٠×١,٢) م/ث بعد قطعه إزاحة Δ س، إذا علمت أن كتلة البروتون (١٠×١,٦٧) كغ، وشحنته (١٠×١,٦) كولوم فاحسب:

١ تسارع البروتون.

٢ الزمن الذي يحتاجه البروتون لكي يصل إلى الصفيحة السالبة.

٣ الإزاحة التي قطعها.

الحل:

١ يحسب التسارع من العلاقة:

$$a = \frac{F}{m}$$

$$= \frac{10 \times 1,6 \times 501}{10 \times 1,67}$$

$$= 4,8 \times 10^5 \text{ م/ث}^2, \text{ باتجاه المحور السيني الموجب.}$$

٢ يحسب الزمن من العلاقة:

$$v = at + v_0$$

$$1,2 \times 10^6 = 4,8 \times 10^5 t + 0$$

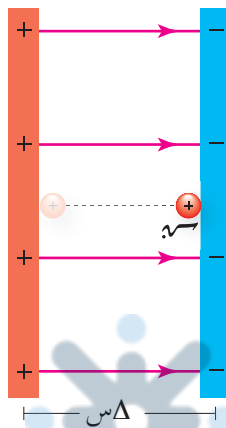
$$t = 2,5 \times 10^{-6} \text{ ث.}$$

٣ يمكن حساب الإزاحة من العلاقة:

$$\Delta s = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t$$

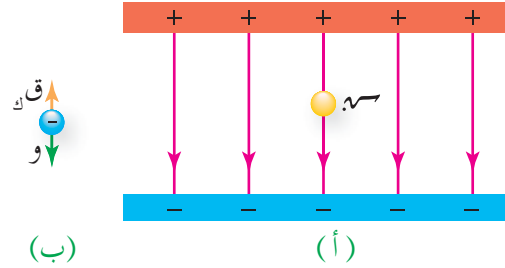
$$= 0 + \frac{1}{2} \times 4,8 \times 10^5 \times (2,5 \times 10^{-6})^2$$

$$\Delta s = 15 \times 10^{-6} \text{ م، باتجاه المحور السيني الموجب.}$$



الشكل (١-١٤): مثال (١-٦).

يبين الشكل (١-١٥/أ) مجالاً كهربائياً منتظماً اتجاهه نحو المحور الصادي السالب، وضع فيه جسيم شحنته (٣) نانوكولوم وكتلته $(3 \times 10^{-10} \text{ كغ})$ ، فاتزن. إذا علمت أن تسارع الجاذبية الأرضية $(ج = 10 \text{ م/ث}^2)$ فأجب عما يأتي:



الشكل (١-١٥): مثال (٧-١).

١ ما نوع شحنة الجسيم؟

٢ احسب مقدار المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين.

٣ إذا استخدمنا صفيحتين لهما نصف المساحة، فكيف نغير الشحنة الكهربائية على الصفيحتين لكي يبقى الجسيم متزنًا؟

الحل:

١ بما أن الجسيم متزن، واتجاه الوزن نحو المحور الصادي السالب، فإن اتجاه القوة الكهربائية يجب أن يكون نحو المحور الصادي الموجب. انظر الشكل (١-١٥/ب)، وبما أن اتجاه القوة الكهربائية بعكس اتجاه المجال الكهربائي فإن شحنة الجسيم سالبة.

٢ بما أن الجسيم متزن، فإن:

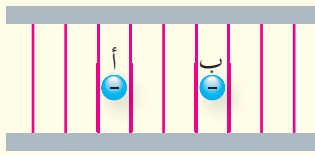
$$ق_ك = و$$

$$م_ج = و_ك$$

$$م = \frac{و_ك}{م_ج} = \frac{3 \times 10^{-10} \times 10}{3 \times 10^{-10}} = 10 \text{ نيوتن/كولوم}$$

$$م = 10 \times 10^{-10} \text{ نيوتن/كولوم}$$

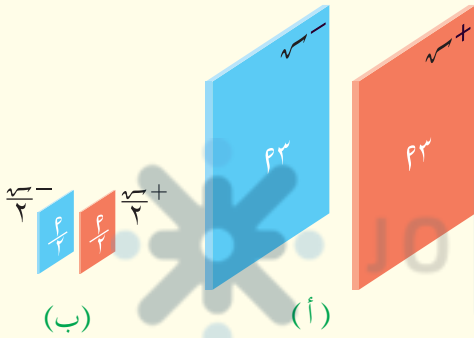
٣ لبقاء الجسيم متزنًا يجب الحفاظ على المجال الكهربائي مقدارًا واتجاهًا $(م = \frac{\sigma}{\epsilon_0})$ ، وبما أن $(\sigma = \frac{ق}{م})$ فإنه عندما تقل مساحة الصفيحتين إلى النصف يجب أن تقل الشحنة الكهربائية إلى النصف لكي تبقى (σ) ثابتة.



الشكل (١-١٦): سؤال (١).

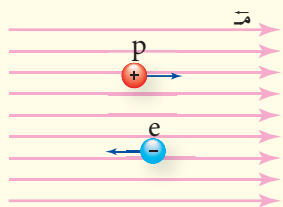
١ اتزن جسيم (أ) شحنته $(-e)$ وكتلته (ك) في مجال كهربائي منتظم كما هو مبين في الشكل (١-١٦)، ادرس الشكل، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

- أ حدد نوع الشحنة الكهربائية على الصفيحتين.
- ب إذا أدخل جسيم (ب) شحنته $(-e)$ وكتلته $(2ك)$ في المجال الكهربائي نفسه، فهل يتزن؟ فسر إجابتك.
- ج إذا زادت الشحنة الكهربائية على الصفيحتين فهل يبقى الجسيم (أ) محافظاً على اتزانه؟ فسر ذلك.



الشكل (١-١٧): سؤال (٢).

٢ معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل (١-١٧) حدد في أي الحالتين يكون مقدار المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين أكبر؟ فسر إجابتك.



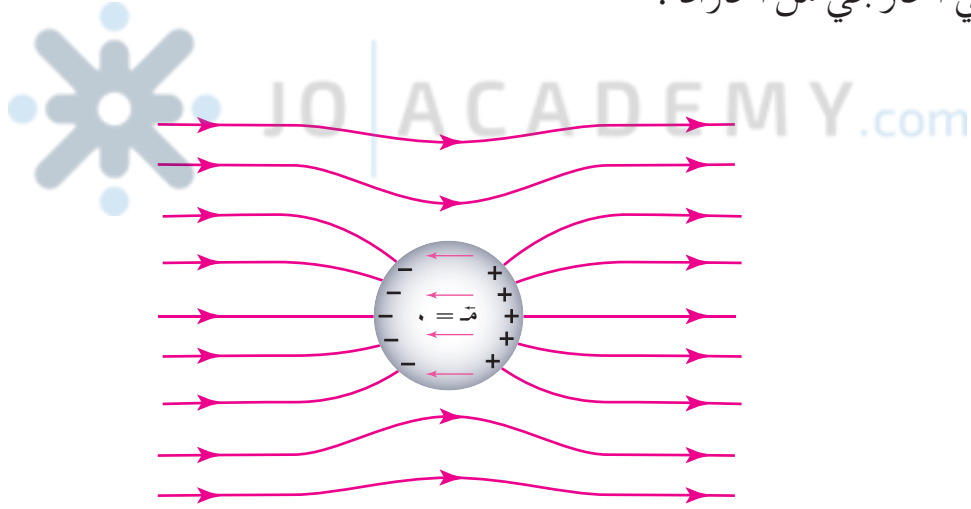
الشكل (١-١٨): سؤال (٣).

٣ يبين الشكل (١-١٨) مجالاً كهربائياً منتظماً يتحرك فيه إلكترون وبروتون، إذا كانت كتلة الإلكترون تعادل $(\frac{1}{1840})$ من كتلة البروتون تقريباً، فأجب عن الأسئلة الآتية:

- أ أيهما أكبر مقداراً القوة الكهربائية المؤثرة في البروتون أم المؤثرة في الإلكترون؟
- ب أيهما أكبر مقداراً تسارع البروتون أم تسارع الإلكترون؟ فسر إجابتك.

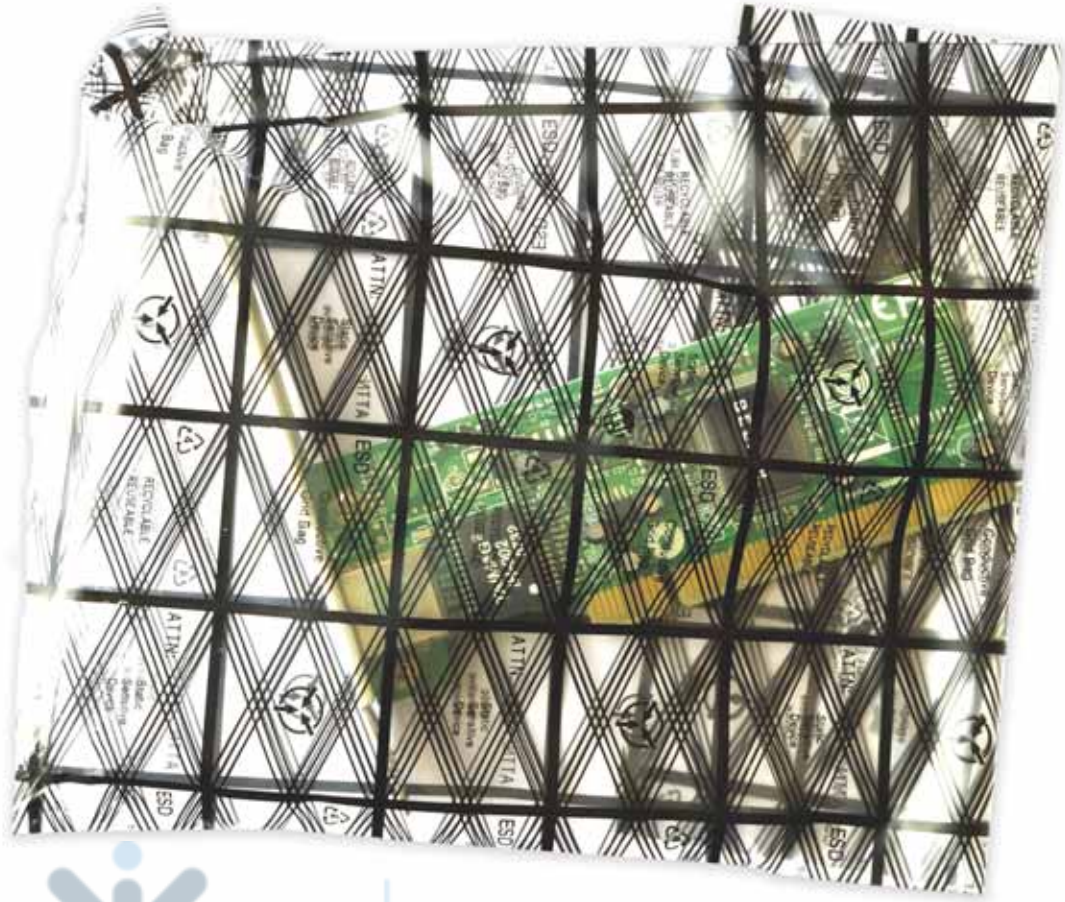
نعتمد في حياتنا على الكهرباء بشكل أساسي، وحيثما وجدت شحنات كهربائية توجد مجالات كهربائية. وقد تسبب هذه المجالات الكهربائية ضررًا للأجهزة الإلكترونية الحساسة، فكيف نحمي جهازًا ما من مجال كهربائي خارجي؟

تحتوي الموصلات على إلكترونات حرة، وعندما يوضع موصل في مجال كهربائي خارجي تتأثر هذه الإلكترونات بقوة كهربائية تدفعها للحركة بعكس اتجاه المجال الكهربائي المؤثر، فيشحن الموصل بالحث، وتتوزع الشحنات على السطح الخارجي للموصل، كما هو مبين في الشكل (١-١٩)، فينشأ داخل الموصل مجال كهربائي مساوٍ للمجال الكهربائي الخارجي، ومعاكس له في الاتجاه، فيكون المجال الكهربائي المحصل داخل الموصل صفرًا، وبذلك يمنع الموصل المجال الكهربائي الخارجي من اختراقه.



الشكل (١-١٩): المجال الكهربائي داخل الموصل.

وبناءً على ما سبق، فإن الموصلات تستخدم لتغليف الأجهزة الإلكترونية، وتشكل درعًا واقياً لحمايتها من المجالات الكهربائية الخارجية، ويبين الشكل (١-٢٠) أكياساً مصنوعة من مادة موصلة لحماية الأجهزة الإلكترونية.



الشكل (٢٠-١): أكياس مصنوعة من مادة موصلة لحماية الأجهزة الإلكترونية.

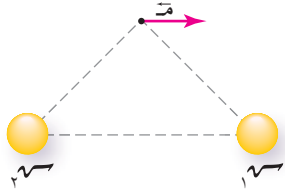
مراجعة (٤-١)



١ عند وضع هاتف داخل إناء فلزي كما في الشكل (٢١-١)، يلاحظ أنه لا يمكن الاتصال مع الهاتف في هذه الحالة. كيف تفسر ذلك؟ (يمكنك أن تجرب بنفسك)

الشكل (٢١-١): سؤال (١).

٢ أيهما أكثر أماناً البقاء داخل سيارة خلال العاصفة المصحوبة بالبرق، أم الخروج منها؟ فسر إجابتك.



الشكل (٢٢-١): سؤال (١) فقرة (١).

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ بين الشكل (٢٢-١) اتجاه المجال الكهربائي المحصل عند

نقطة تبعد عن الشحنتين (r_1 , r_2) المسافة نفسها. إذا

علمت أن الشحنتين متساويتان في المقدار فإن:

أ r_1 موجبة، r_2 موجبة. ب r_1 موجبة، r_2 سالبة.

ج r_1 سالبة، r_2 سالبة. د r_1 سالبة، r_2 موجبة.

٢ بين الشكل (٢٣-١) شحنة نقطية (r) عند النقطة (أ) تولد حولها مجالاً كهربائياً. عندما وضعت

شحنة ($-r$) عند النقطة (ب) تأثرت بقوة كهربائية باتجاه المحور السيني الموجب. يكون (اتجاه

المجال الكهربائي عند النقطة (ب)، ونوع الشحنة الكهربائية (r) على الترتيب:



الشكل (٢٣-١): سؤال (١) فقرة (٢).

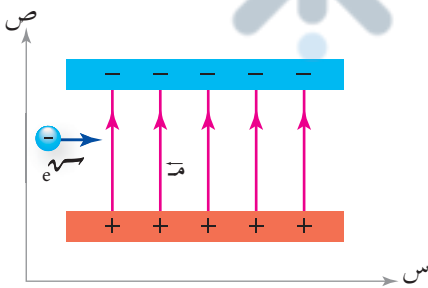
أ (+س، سالبة) ب (+س، موجبة)

ج (-س، سالبة) د (-س، موجبة)

٣ عندما يدخل إلكترون متحركً بالاتجاه السيني الموجب إلى

منطقة مجال كهربائي منتظم، كما بين الشكل (٢٤-١)، فإن

هذا الإلكترون يكتسب تسارعاً بالاتجاه:



الشكل (٢٤-١): سؤال (١) فقرة (٣).

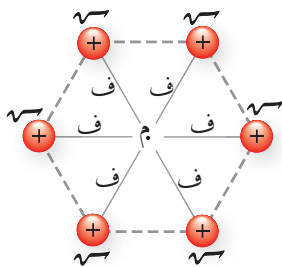
أ الصادي الموجب ب الصادي السالب

ج السيني الموجب د السيني السالب.

٤ وزعت شحنات نقطية مقدار كل منها ($+r$) على رؤوس مضلع

سداسي كما في الشكل (٢٥-١). إذا أزيلت شحنة نقطية واحدة

فإن مقدار المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (م) يساوي:



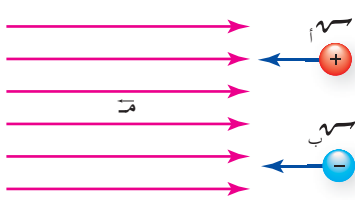
الشكل (٢٥-١): سؤال (١) فقرة (٤).

أ صفرًا ب $5 \times \left(\frac{r}{f_2}\right)$

ج $6 \times \left(\frac{r}{f_2}\right)$ د $\left(\frac{r}{f_2}\right)$

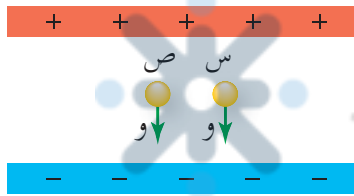
٥ ينشأ مجال كهربائي منتظم في الحيز بين صفيحتين موصلتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين متساويتين في المقدار ومختلفتين في النوع. فإذا أصبحت مساحة الصفيحتين ضعفي ما كانت عليه وقلت الشحنة الكهربائية إلى النصف فإن المجال الكهربائي:

- أ) يقل إلى النصف
ب) يتضاعف مرتين
ج) يقل إلى الربع
د) يتضاعف أربع مرات.



٢ عند دخول الجسيمات المشحونة إلى مجال كهربائي فإنها تتأثر بقوة كهربائية، ويبين الشكل (١-٢٦) اتجاه الحركة لجسيمين (أ) موجب الشحنة و(ب) سالب الشحنة قبل دخولهما إلى مجال كهربائي منتظم. وضح لكل جسيم:

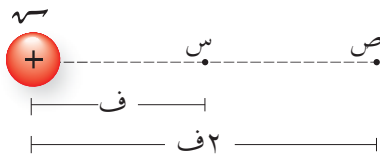
- أ) اتجاه القوة الكهربائية المؤثرة فيه في أثناء حركته في المجال الكهربائي.
ب) أثر القوة الكهربائية في مقدار سرعة الجسيم.



الشكل (١-٢٧): سؤال (٣).

٣ جسيمان (س)، و(ص) مشحونان ومتساويان في الوزن، ووضعا ساكنين في مجال كهربائي منتظم كما يبين الشكل (١-٢٧)، ولو حظ أن الجسيم (س) بقي ساكناً، بينما تحرك الجسيم (ص) باتجاه محور الصادات الموجب. أجب عما يأتي:

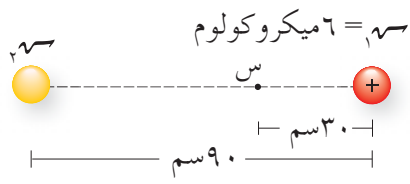
- أ) ما نوع شحنة كل من الجسيمين؟
ب) كيف تفسر اختلاف الحالة الحركية للجسيمين (س) و(ص) بالرغم من أنهما متساويان في الوزن؟



الشكل (١-٢٨): سؤال (٤).

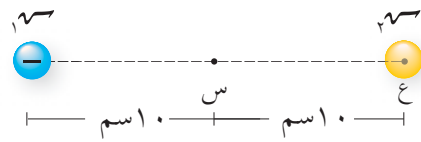
٤ نقطتان (س، ص) تقعان في المجال الكهربائي لشحنة نقطية موجبة، كما يبين الشكل (١-٢٨)، وضعت شحنة مقدارها (1×10^{-6}) كولوم عند النقطة (س) فتأثرت بقوة كهربائية مقدارها (8×10^{-3}) نيوتن. جد:

- أ) المجال الكهربائي عند النقطة (س) مقداراً واتجهاً.
ب) القوة الكهربائية المؤثرة في شحنة نقطية مقدارها (-1×10^{-6}) كولوم توضع عند النقطة (ص)، مقداراً واتجهاً.



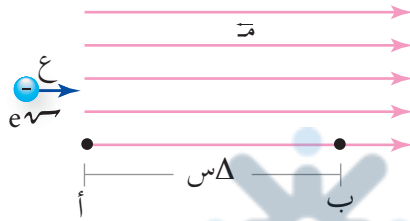
الشكل (٢٩-١): سؤال (٥).

٥ شحنتان نقطيتان (q_1 , q_2) موضوعتان في الهواء، والبعد بينهما (٩٠) سم، إذا علمت أن المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (س) يساوي صفراً، ومعتمداً على البيانات المثبتة في الشكل (٢٩-١) فجد مقدار الشحنة (q_2) ونوعها.



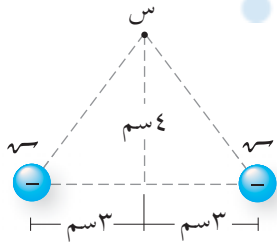
الشكل (٣٠-١): سؤال (٦).

٦ وضعت شحنة ($q_1 = 2 \times 10^{-10}$ كولوم على بعد (١٠) سم من النقطة (س) كما في الشكل (٣٠-١). احسب مقدار الشحنة الكهربائية الواجب وضعها عند النقطة (ع)، وحدد نوعها، ليكون مقدار المجال الكهربائي المحصل عند النقطة (س) مساوياً (54×10^0 نيوتن/كولوم ويكون اتجاهه نحو النقطة (ع)).



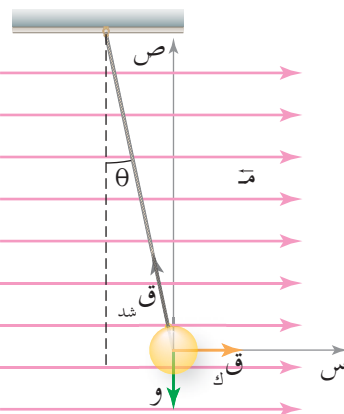
الشكل (٣١-١): سؤال (٧).

٧ إلكترون يتحرك باتجاه المحور السيني الموجب بسرعة ($\frac{1}{3} \times 10^8$ م/ث، أدخل هذا الإلكترون مجالاً كهربائياً منتظماً مقداره (1×10^3 نيوتن/كولوم، وبالاتجاه الممين في الشكل (٣١-١). إذا بدأ الإلكترون الحركة تحت تأثير المجال الكهربائي من النقطة (أ) وتوقف عند النقطة (ب) فاحسب الإزاحة التي قطعها.



الشكل (٣٢-١): سؤال (٨).

٨ شحنتان نقطيتان متماثلتان ($q_1 = 5 \times 10^{-10}$ كولوم، موضوعتان في الهواء. معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل (٣٢-١)، احسب المجال الكهربائي عند النقطة (س) مقداراً واتجاهاً.



الشكل (٣٣-١): سؤال (٩).

٩ كرة صغيرة مشحونة شحنتها (q)، ووزنها (و) عُلقت بخيط داخل مجال كهربائي منتظم، فاتزنت كما هو مبين في الشكل (٣٣-١)، أثبت أن مقدار المجال الكهربائي يعطى بالعلاقة:

$$m = \frac{W \tan \theta}{q}$$

الجهود الكهربائية

Electric Potential

عند دراسة علم الكهرباء السكونية لا بد من تناول مفهومين مترابطين: المجال الكهربائي والجهود الكهربائية، وقد تناولنا في الفصل الأول المجال الكهربائي، وفي هذا الفصل سندرس الجهود الكهربائية، وهو من المفاهيم الأساسية في علم الكهرباء، ويرتبط الجهود الكهربائي بأحد أشكال الطاقة وهو طاقة الوضع. فما المقصود بالجهود الكهربائي؟ وما العلاقة بين الجهود الكهربائي والمجال الكهربائي؟ وكيف نحسب فرق الجهود الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي؟

هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

الفصل الثاني

في هذا الفصل

(١-٢)

الجهود الكهربائي.

(٢-٢)

الجهود الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية.

(٣-٢)

طاقة الوضع الكهربائي لنظام يتألف من شحنتين نقطيتين.

(٤-٢)

فرق الجهود الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.

(٥-٢)

سطوح تساوي الجهود.

(٦-٢)

الجهود الكهربائي لموصل مشحون.

يحدث البرق عندما يصل فرق الجهود الكهربائي بين الغيوم إلى أكثر من مليون فولت.



ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- * توضح المقصود بالجهد الكهربائي، ووحدة قياسه، وتعبّر عنه رياضيًا.
- * تستنتج العوامل التي يعتمد عليها الجهد الكهربائي عند نقطة في مجال كهربائي.
- * تتوصل إلى قانون فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين بالاعتماد على مبرهنة الشغل والطاقة الحركية.
- * تستنتج العلاقة بين فرق الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي المنتظم.
- * تطبق العلاقات والقوانين الخاصة بالجهد الكهربائي في حل مسائل حسابية.
- * تعرف سطح تساوي الجهد، وتذكر خصائصه.
- * تصف سطح تساوي الجهد لموصلات مختلفة مشحونة.
- * تصف الجهد الكهربائي لموصل مشحون.

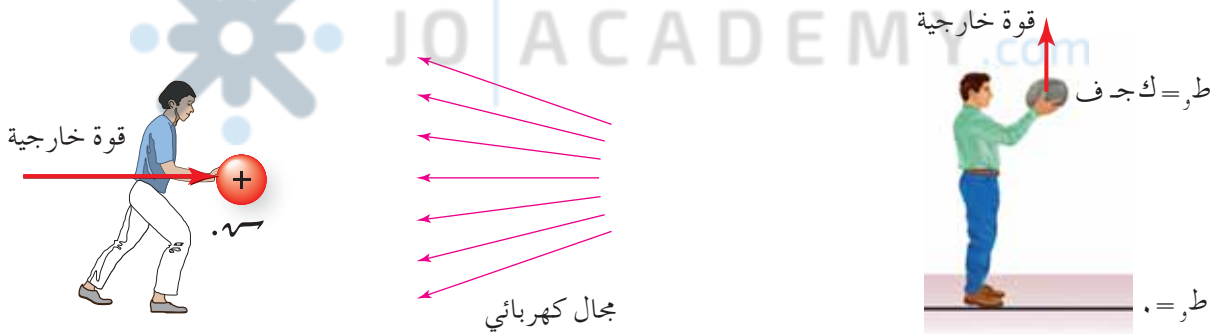


JO | ACADEMY.com



تحدث الأرض في الحيز المحيط بها مجالاً يسمى مجال الجاذبية الأرضية، وتشكل الأرض مع أي جسم يقع ضمن مجالها نظاماً، يُعرف بنظام (الجسم - الأرض)، يظهر فيه شكل من أشكال الطاقة يسمى طاقة الوضع، وهي طاقة ترتبط بقوى المجال عمومًا. وبالمثل، إذا وضعت شحنة كهربائية في مجال كهربائي خارجي فإن الشحنة والمجال يشكلان نظاماً، يسمى نظام (الشحنة الكهربائية - المجال الكهربائي)، وتخزن في النظام طاقة تسمى طاقة وضع كهربائية، فكيف تنشأ هذه الطاقة؟ وعلى ماذا يعتمد مقدارها؟

في مجال الجاذبية الأرضية، لكي نحسب طاقة الوضع لجسم عند موقع ما، نحتاج إلى موقع مرجعي تكون طاقة الوضع عنده صفرًا. ففي الشكل (٢-١/أ)، يمكن القول إن الجسم يخزن طاقة وضع نتيجة وجوده على ارتفاع ما عن سطح الأرض؛ على فرض أن سطح الأرض يمثل الموقع المرجعي.



(ب): طاقة الوضع الكهربائية في المجال الكهربائي.

(أ): طاقة الوضع في مجال الجاذبية الأرضية.

الشكل (١-٢): طاقة الوضع.

في المجال الكهربائي اصطلح على أن اللانهاية (∞) هي النقطة المرجعية التي تكون طاقة الوضع عندها صفرًا؛ ($\phi_\infty = 0$). ولبناء النظام المبين في الشكل (٢-١/ب)، نفترض أن الشحنة الكهربائية (q) في اللانهاية، ولنقلها إلى نقطة ضمن المجال الكهربائي بسرعة ثابتة تؤثر فيها بقوة خارجية تساوي القوة الكهربائية في المقدار وتعاكسها في الاتجاه، وعندئذ تبذل القوة الخارجية شغلًا يخزن في الشحنة الكهربائية على شكل طاقة وضع كهربائية (ϕ)، حيث تبقى طاقتها الحركية ثابتة ($\Delta\phi = 0$).

ويمثل مقدار طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة موضوعة عند نقطة في مجال كهربائي **الجهد الكهربائي** عند تلك النقطة، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ج = \frac{ط}{س} \dots\dots\dots (٢-١)$$

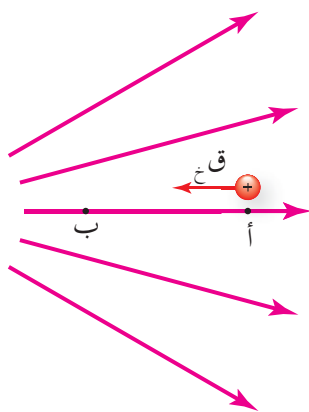
والجهد الكهربائي كمية قياسية، يقاس في النظام العالمي للوحدات بوحدة (جول/ كولوم) وتعرف بالفولت. فعندما نقول إن الجهد الكهربائي عند نقطة (١) فولت فهذا يعني أنه إذا وضعت شحنة كهربائية مقدارها (١) كولوم عند تلك النقطة، فإنها ستخزن طاقة وضع كهربائية مقدارها (١) جول. ويتخذ الجهد الكهربائي عند نقطة ما قيمة محددة، ولا يعتمد على (س). فإذا تغيرت (س) فإن طاقة الوضع (ط) تتغير بحيث تبقى النسبة $(\frac{ط}{س})$ ثابتة.

أما إذا تغيرت طاقة الوضع الكهربائية للشحنة عند انتقالها من نقطة إلى أخرى ضمن المجال الكهربائي فهذا يعني أنه يوجد فرق في الجهد الكهربائي بين النقطتين.

ويعرف **فرق الجهد الكهربائي** بين نقطتين بأنه التغير في طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة عند انتقالها بين هاتين النقطتين في مجال كهربائي، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\Delta ج = \frac{\Delta ط}{س} \dots\dots\dots (٢-٢)$$

حيث $\Delta ج = ج_{نهائية} - ج_{ابتدائية}$ ، و $ج_{نهائية}$: جهد النقطة النهائية التي نُقلت إليها الشحنة، و $ج_{ابتدائية}$: جهد النقطة الابتدائية التي نُقلت منها الشحنة.



فإذا أثرت قوة خارجية في شحنة (س)، ونقلتها بسرعة ثابتة من نقطة (أ) إلى نقطة (ب) ضمن مجال كهربائي كما في الشكل (٢-٢)، فإن الشغل الذي تبذله القوة الخارجية (ش) يظهر على شكل تغير في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة، أي أن:

$$ش = \Delta ط$$

وبالرجوع إلى العلاقة (٢-٢) فإن:

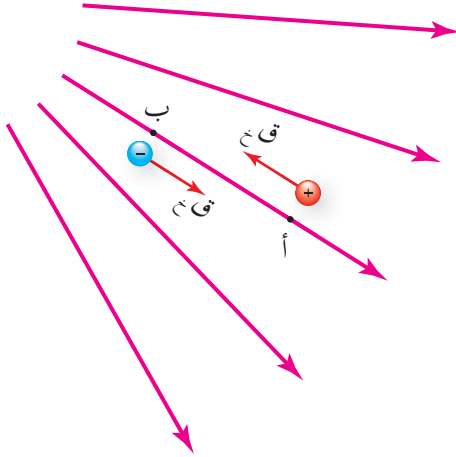
$$ج_{نهائية} - ج_{ابتدائية} = \frac{\Delta ط}{س} = \frac{ش}{س}$$

الشكل (٢-٢): حركة شحنة في مجال كهربائي بسرعة ثابتة بتأثير قوة خارجية.

وعليه يمكن التعبير عن شغل القوة الخارجية بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{شغل} = \text{ش. نهائية} - \text{ش. ابتدائية} \dots\dots\dots (3-2)$$

مثال (١-٢)



شحنة نقطية $(+2 \times 10^{-9})$ كولوم نقلت من النقطة (أ) إلى النقطة (ب) في مجال كهربائي بسرعة ثابتة كما يبين الشكل (٣-٢)، إذا بذلت القوة الخارجية شغلاً (14×10^{-9}) جول فاحسب:

١ فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين ب وأ (جـ-جـ) (جـ-جـ)

٢ الشغل الذي تبذله قوة خارجية لنقل شحنة (-2×10^{-9}) كولوم من (ب) إلى (أ) بسرعة ثابتة.

الشكل (٣-٢): مثال (١-٢).

الحل:

١ لحساب فرق الجهد الكهربائي (جـ-جـ) (جـ-جـ) نطبق العلاقة (٣-٢)، وبما أن الشحنة انتقلت من النقطة (أ) إلى النقطة (ب)، فإن:

$$\text{ش. أ} \leftarrow \text{ب} = \text{ش. (جـ-جـ)} - \text{ش. (جـ-جـ)}$$

$$14 \times 10^{-9} = (-2 \times 10^{-9}) \times (\text{جـ-جـ})$$

$$\text{جـ-جـ} = 7 \text{ فولت.}$$

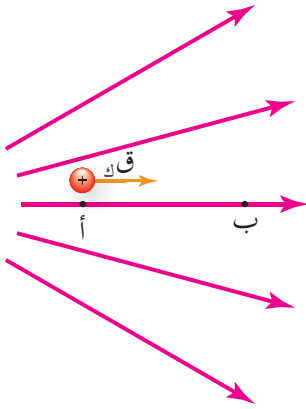
ويمكن التعبير عن فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين بالرمز (جـ-جـ) ، أي أن $\text{جـ-جـ} = 7$ فولت.

٢ لحساب الشغل اللازم لنقل شحنة كهربائية من النقطة (ب) إلى النقطة (أ):

$$\text{ش. ب} \leftarrow \text{أ} = \text{ش. (جـ-جـ)} - \text{ش. (جـ-جـ)} = -7 \times (-2 \times 10^{-9}) = 14 \times 10^{-9} \text{ جول}$$

$$\text{حيث } (\text{جـ-جـ}) = -(\text{جـ-جـ}).$$

لاحظ أننا تحدثنا عن حركة الشحنة تحت تأثير القوة الخارجية، ماذا يحدث إذا تركت الشحنة حرة؟



افترض أن شحنة موجبة (س.) وضعت عند النقطة (أ) في مجال كهربائي كما في الشكل (٢-٤)، وتركت حرة لتتحرك تحت تأثير القوة الكهربائية فقط، فإنها ستنتقل إلى النقطة (ب).

إن نظام (الشحنة الكهربائية - المجال الكهربائي) نظام محافظ، أي أن الطاقة الكلية الميكانيكية للنظام محفوظة:

الشكل (٢-٤): حركة شحنة في مجال كهربائي بتأثير قوة كهربائية فقط.

$$\Delta ط_م = \Delta ط_و + \Delta ط_ح = \text{صفر}$$

$$\Delta ط_ح = - \Delta ط_و$$

تؤدي حركة الشحنة الحرة الموجبة تحت تأثير القوة الكهربائية فقط إلى نقصان طاقة الوضع الكهربائية المخزنة فيها، ويقابل ذلك زيادة مساوية في الطاقة الحركية، فالقوة الكهربائية تبذل شغلاً (ش_ك) على الشحنة تحول طاقة الوضع الكهربائية المخزنة فيها إلى طاقة حركية أي أن:

$$\text{ش}_ك = - \Delta ط_و = \Delta ط_ح$$

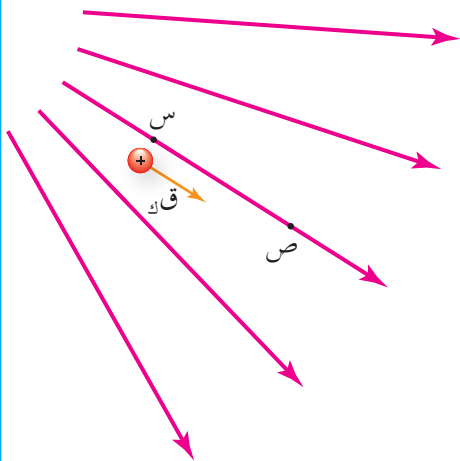
ويحدث الأمر نفسه عندما تتحرك شحنة سالبة في المجال الكهربائي من النقطة (ب) إلى النقطة (أ) تحت تأثير القوة الكهربائية فقط، فحركة الشحنة الحرة (موجبة أو سالبة) باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة فيها يؤدي إلى نقصان طاقة الوضع الكهربائية المخزنة فيها، ويقابل ذلك زيادة مساوية في طاقتها الحركية.

وبالرجوع إلى العلاقة (٢-٢) فإن:

$$\text{ج. نهائية} - \text{ج. ابتدائية} = \frac{\Delta ط_و}{\text{س.}} = \frac{- \text{ش}_ك}{\text{س.}}$$

وعليه يمكن التعبير عن شغل القوة الكهربائية بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{ش}_ك = - \text{س.} (\text{ج. نهائية} - \text{ج. ابتدائية}) \dots\dots\dots (٢-٤)$$



يبين الشكل (٢-٥) بروتوناً يتحرك في مجال كهربائي تحت تأثير القوة الكهربائية فقط من النقطة (س) إلى النقطة (ص)، فإذا بذلت القوة الكهربائية عليه شغلاً $(8 \times 10^{-19} \text{ جول})$ فاحسب فرق الجهد $(ج_ص)$.

الحل:

لحساب فرق الجهد بين النقطتين (س، ص) نطبق العلاقة (٢-٤)، وبما أن البروتون انتقل من النقطة (س) إلى النقطة (ص)، فإن:

$$ش_{س \rightarrow ص} = - (ج_ص - ج_س)$$

$$8 \times 10^{-19} = - (ج_ص - 1,6 \times 10^{-19} \times ج_ص)$$

$$\frac{8 \times 10^{-19}}{1,6 \times 10^{-19} \times ج_ص} = (ج_ص)$$

$$(ج_ص) = -5 \text{ فولت. والإشارة السالبة تعني أن جهد النقطة (ص) أقل من جهد النقطة (س).}$$

الشكل (٢-٥): مثال (٢-٢).

مراجعة (٢-١)



١) ماذا نعني بقولنا إن فرق الجهد بين نقطتين يساوي (١٢) فولت.

٢) نقطتان (د)، (هـ) ضمن مجال كهربائي. انظر الشكل (٢-٦)،

إذا كان $(ج_د = 4)$ فولت و $(ج_هـ = 8)$ فولت فاحسب:

الشكل (٢-٦): سؤال (٢).

أ) شغل القوة الكهربائية المبذول لنقل إلكترون من النقطة (د) إلى النقطة (هـ).

ب) شغل القوة الخارجية المبذول لنقل بروتون من اللانهاية إلى النقطة (د) بسرعة ثابتة.

ج) مقدار التغير في طاقة الوضع الكهربائية للإلكترون والبروتون في الفرعين السابقين.

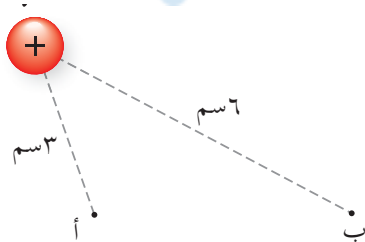
يكون للجهد الكهربائي عند نقطة ما في مجال كهربائي قيمة محددة، فإذا كان مصدر المجال الكهربائي شحنة نقطية، فما العوامل التي يعتمد عليها الجهد الكهربائي عند نقطة في مجال هذه الشحنة؟ وجد تجريبيًا أن الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنة نقطية (q)، موضوعة في الهواء، عند نقطة على بعد (r) من الشحنة يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (٥-٢)$$

ومن هذه العلاقة نلاحظ أن الجهد الكهربائي يعتمد على مقدار الشحنة المولدة للمجال الكهربائي (q) ونوعها، وبعد النقطة عن الشحنة المولدة للمجال الكهربائي (r)، والسماحية الكهربائية للهواء. وقد يكون هذا الجهد الكهربائي موجبًا أو سالبًا تبعًا لنوع الشحنة (q) المولدة للمجال الكهربائي.

مثال (٣-٢)

يبين الشكل (٧-٢) شحنة نقطية ($q = +3$) نانوكولوم، ونقطتان (أ)، (ب) تبعدان عن الشحنة مسافة (٣) سم و (٦) سم على الترتيب. جد:



١ فرق الجهد (V_{AB})

٢ فرق الجهد (V_{BA}) إذا كانت ($q = -3$) نانوكولوم؟

الحل:

١ لحساب الجهد عند نقطة نطبق العلاقة:

$$V_A = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_A}$$

$$V_A = \frac{9 \times 10^9 \times 3}{3^2} = 3 \times 10^9 \text{ فولت}$$

$$= 3 \times 10^9 \text{ فولت}$$

$$V_B = \frac{9 \times 10^9 \times 3}{6^2} = 0.75 \times 10^9 \text{ فولت}$$

$$= 0.75 \times 10^9 \text{ فولت}$$

الشكل (٧-٢): مثال (٣-٢).

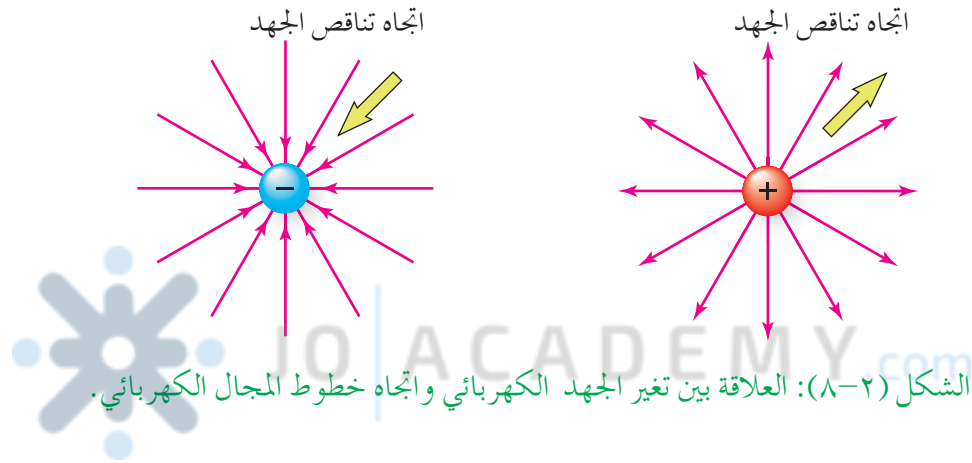
$V_B = V_A - V_C = 900 - 450 = 450$ فولت. (أي أن $V_B < V_C$).

٢ إذا كانت الشحنة المولدة للمجال سالبة فإن الجهد الكهربائي عند كل من النقطتين سالب:

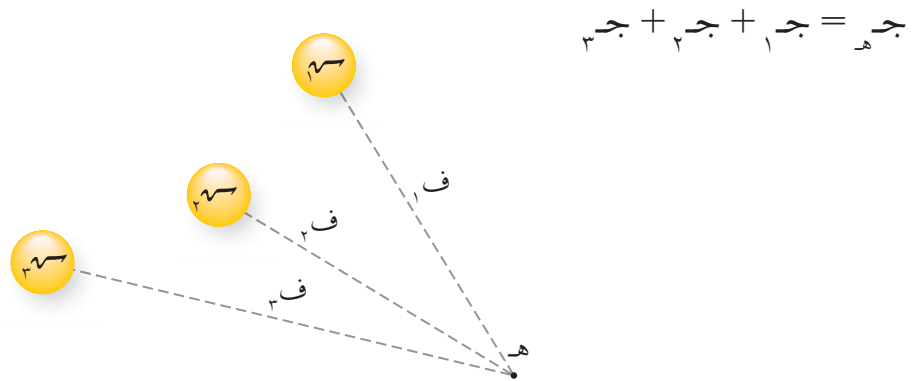
$V_B = 900 - 450 = 450$ فولت، $V_C = 450 - 900 = -450$ فولت.

$V_B = 900 - 450 = 450$ فولت. (أي أن $V_B > V_C$).

لاحظ أن إشارة الجهد تساعدنا على ترتيب النقاط من الأقل جهداً إلى الأعلى جهداً، إن اتجاه المجال الكهربائي يكون دائماً باتجاه تناقص الجهد الكهربائي. انظر الشكل (٢-٨).



ماذا يحدث لجهد النقطة إذا وقعت في مجال شحنات نقطية عدة؟
بما أن الجهد الكهربائي كمية قياسية فإن الجهد الكهربائي عند نقطة مثل (هـ) في الشكل (٢-٩)؛
يساوي المجموع الجبري للجهود الناشئة عن كل هذه الشحنات، أي أن:

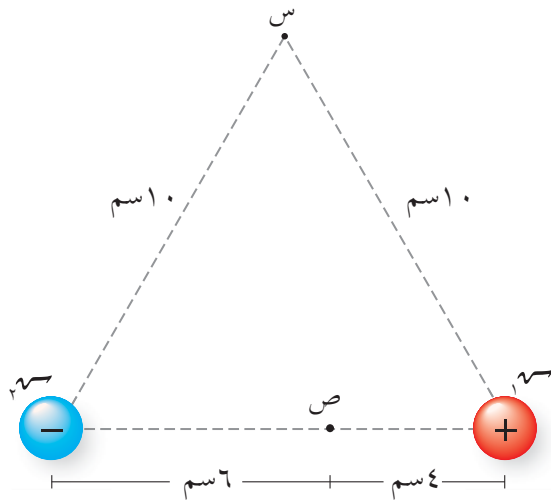


الشكل (٢-٩): الجهد الكهربائي الناشئ عن شحنات نقطية عدة.

وهذا يعني أنه يمكن حساب الجهد عند نقطة تقع في مجال شحنات نقطية عدة من العلاقة:

$$ج = أ \left(\frac{١٧}{ف_١} + \frac{٢٧}{ف_٢} + \frac{٣٧}{ف_٣} + \dots \right) \dots \dots \dots (٢-٦)$$

مثال (٢-٤)



يبين الشكل (٢-١٠) شحنتين نقطيتين موضوعتين في الهواء ($١٧ = ٢٧$ ، $٤ = ٤$) ميكروكولوم. معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل احسب جهد كل من النقطتين (س)، (ص).

الحل:

$$ج_ص = ج_١ + ج_٢$$

$$ج_ص = أ \left(\frac{٢٧}{ف_١} + \frac{١٧}{ف_٢} \right)$$

الشكل (٢-١٠): مثال (٢-٤).

$$ج_ص = ٩ \times ١٠ \left(\frac{٤ - ١ \times ١٠}{٢ - ١ \times ١٠} + \frac{٤ \times ١٠}{٢ - ١ \times ١٠} \right) = \text{صفر}$$

وهذا يعني أن طاقة الوضع الكهربائية لوحدة الشحنات عند النقطة (س) تساوي صفراً؛ فلا يلزم بذل شغل لنقل شحنة من اللانهاية (∞) إلى النقطة (س).

$$ج_ص = ج_١ + ج_٢$$

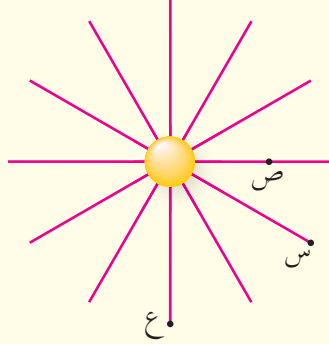
$$ج_ص = أ \left(\frac{٢٧}{ف_١} + \frac{١٧}{ف_٢} \right)$$

$$= ٩ \times ١٠ \left(\frac{٤ - ١ \times ١٠}{٢ - ١ \times ٦} + \frac{٤ \times ١٠}{٢ - ١ \times ٤} \right)$$

$$ج_ص = ٩ \times ١٠ \times ١٠ \times \left(\frac{٢}{٣} - ١ \right)$$

$$ج_ص = ٣ \times ١٠ \text{ فولت.}$$

١ بين الشكل (١١-٢) ثلاث نقاط (س، ص، ع) تقع ضمن المجال الكهربائي لشحنة نقطية، بُعد النقطة (س) عن الشحنة يساوي بُعد النقطة (ع). و (ج_{س ص} = ٣ فولت). أجب عما يأتي:



الشكل (١١-٢): سؤال (١).

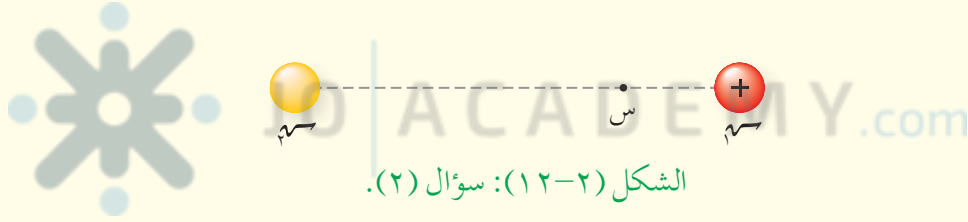
أ أي النقطتين (س، ص) يكون الجهد عندها أعلى؟

ب ما نوع الشحنة المولدة للمجال الكهربائي؟

ج حدد اتجاه المجال الكهربائي.

د قارن بين (ج_{س ص}) و (ج_{ص ع}).

٢ بين الشكل (١٢-٢) نقطة (س) تقع على الخط الواصل بين شحنتين نقطيتين، إذا كانت (س_١) موجبة و (ج_س = صفر). فأجب عما يأتي:



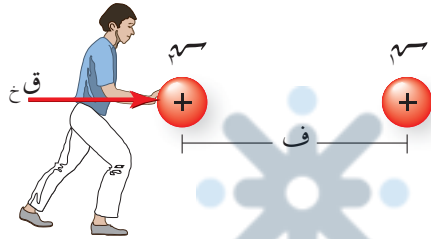
الشكل (١٢-٢): سؤال (٢).

أ ما نوع الشحنة (س_٢)؟

ب أيهما أكبر مقداراً (س_١) أم (س_٢)؟

عندما توضع شحنة نقطية في مجال كهربائي خارجي فإنهما يشكلان نظامًا، وتعلمت أن تحسب طاقة الوضع الكهربائية للشحنة ضمن هذا النظام، ويمكننا حساب طاقة الوضع الكهربائية لأي نظام يتألف من توزيع من الشحنات، وستقتصر دراستنا على حساب طاقة الوضع الكهربائية لنظام مكون من شحنتين نقطيتين فقط. ولتشكيل نظام مكون من شحنتين موجبتين (q_1 , q_2) بعيدتين جدًا عن بعضهما؛ فإنهما تنقلان من اللانهاية إلى منطقة يكون البعد بينهما (ف).

إن نقل الشحنة الأولى (q_1) لا يتطلب بذل شغل لأنها منقولة إلى منطقة لا يوجد فيها مجال كهربائي، أما نقل الشحنة الثانية (q_2) من اللانهاية إلى نقطة على بعد (ف) من الشحنة (q_1) بسرعة ثابتة فيتطلب التأثير بقوة خارجية تبذل شغلًا كما في الشكل (٢-١٣)؛ لأنها ستدخل مجالًا كهربائيًا، ويحسب هذا الشغل من العلاقة (٢-٤):



الشكل (٢-١٣): بناء نظام من شحنتين نقطيتين موجبتين.

$$ش\text{خ} = (ج\text{نهائية} - ج\text{ابتدائية})$$

وبما أن الشحنة (q_1) نقلت من اللانهاية حيث ($ج = \infty$) إلى نقطة في المجال الكهربائي للشحنة (q_1)، فإن:

$$ش\text{خ} \leftarrow \infty = (ج\text{النقطة} - ج\text{النقطة}) = ج\text{النقطة}$$

حيث (ج): جهد نقطة في مجال الشحنة (q_1)، ويحسب من العلاقة (٢-٥):

$$ج = \frac{1}{f}$$

لذا فإن:

$$ش\text{خ} = \frac{1}{f} \cdot ج$$

ويمثل الشغل في هذه الحالة طاقة الوضع الكهربائية المنقولة إلى النظام، ويمكننا القول إن طاقة الوضع الكهربائية لنظام يتألف من شحنتين موضوعتين في الهواء وتفصل بينهما مسافة (ف) يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

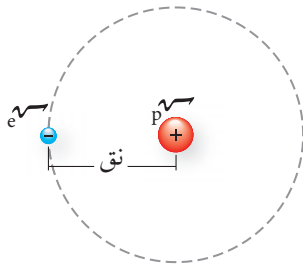
$$ط = \frac{1}{f} \cdot ج \dots \dots \dots (٢-٧)$$

إذا كانت الشحنتان متشابهتين في النوع فإن طاقة الوضع للنظام تكون موجبة؛ وذلك لأن

الشحنتين كانتا بعيدتين جدًّا، وتقريبهما على بعد (ف) من بعضهما بسرعة ثابتة يتطلب التأثير بقوة خارجية في إحداهما فتبذل شغلًا للتغلب على قوة التنافر الكهربائية، وهذا الشغل يظهر على شكل زيادة في طاقة الوضع الكهربائية المخزنة في النظام.

أما إذا كانت الشحنتان مختلفتين في النوع فإن طاقة الوضع الكهربائية للنظام تكون سالبة؛ وذلك لأن الشحنتين كانتا بعيدتين جدًّا، وتقريبهما على بعد (ف) من بعضهما بسرعة ثابتة يتطلب التأثير بقوة خارجية في إحداهما بعكس اتجاه قوة التجاذب الكهربائية، فتبذل القوة الخارجية شغلًا يسحب طاقة من النظام، فتصبح طاقة الوضع الكهربائية للنظام سالبة.

مثال (٥-٢)



يفصل بين الإلكترون والبروتون في ذرة الهيدروجين مسافة (١٠ × ١٠^{-١١} م تقريبًا. انظر الشكل (٢-١٤)). احسب طاقة الوضع الكهربائية لذرة الهيدروجين.

الحل:

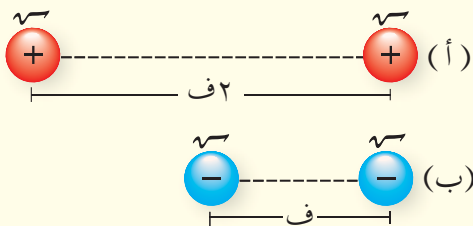
الشكل (٢-١٤): مثال (٥-٢).

نطبق العلاقة: $ط = \frac{1}{2} \frac{q_1 q_2}{f}$ وبما أن شحنة الإلكترون تساوي شحنة البروتون، فإنه يمكن التعبير عن طاقة الوضع بما يأتي:

$$ط = \frac{1}{2} \frac{e^2}{f} = \frac{1}{2} \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{10^{-10} \times 5.29} = -4.36 \times 10^{-18} \text{ جول}$$

مراجعة (٣-٢)

١ نظام يتألف من شحنتين نقطيتين سالبتين طاقة وضعه الكهربائية موجبة، فما تفسير ذلك؟



٢ معتمدًا على البيانات المثبتة في الشكل (٢-١٥) والذي يبين نظامين للشحنات (أ، ب)، قارن بين مقدار طاقة الوضع الكهربائية المخزنة في كل نظام.

الشكل (٢-١٥): سؤال (٢).

تناولنا في ما سبق كيفية حساب الجهد الكهربائي الناشئ عن الشحنات النقطية. ماذا يحدث إذا أصبح مصدر المجال الكهربائي صفيحتين متوازيتين مشحونتين بشحنتين، إحداهما موجبة والأخرى سالبة؟ سنحصل عندئذ على مجال كهربائي منتظم بإهمال تأثير الأطراف، فكيف يمكن حساب فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم؟

يبين الشكل (٢-١٦) شحنة موجبة وضعت ضمن مجال كهربائي منتظم (م)، فتحررت بفعل القوة الكهربائية (ق_ك)، وقطعت إزاحة (ف) من النقطة (أ) إلى النقطة (ب)؛ فإن القوة الكهربائية تبذل شغلاً يمكن أن نعبر عنه بالعلاقة:

$$ش_{ك\ أ\ ب} = ق_{ك} \cdot ف_{أ\ ب}$$

وبتعويض (ق_ك = م · ن) فإن:

$$ش_{ك\ أ\ ب} = ش_{م\ أ\ ب} \cdot ن \cdot ف_{أ\ ب}$$

$$ش_{م\ أ\ ب} = ش_{م\ أ\ ب} \cdot ن \cdot ف_{أ\ ب} \cdot جتا \theta$$

الشكل (٢-١٦): فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.

ومن العلاقة (٢-٤) يمكن أن نعبر عن شغل القوة الكهربائية كما يأتي:

$$ش_{ك\ أ\ ب} = ش_{م\ أ\ ب} \cdot ن \cdot (ج\ ب - ج\ أ)$$

أي أن:

$$ش_{م\ أ\ ب} \cdot ن = ش_{م\ أ\ ب} \cdot ن \cdot (ج\ ب - ج\ أ) \cdot جتا \theta$$

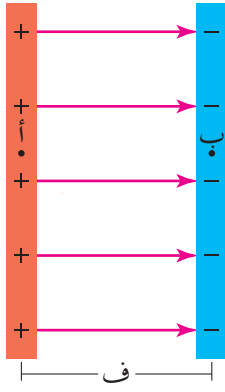
وباختصار (ن) من الطرفين: (ج\ ب - ج\ أ) = م · ف_{أ\ ب} جتا θ

أي أن:

$$ج\ أ\ ب = م \cdot ف_{أ\ ب} \cdot جتا \theta \quad \text{..... (٢-٨)}$$

تستخدم هذه العلاقة لحساب فرق الجهد بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم.

حيث (م): مقدار المجال الكهربائي المنتظم، و(ف_{أ\ ب}): الإزاحة من (أ) إلى (ب)، و(θ): الزاوية المحصورة بين اتجاهي المجال الكهربائي والإزاحة؛ (0 ≤ θ ≤ ١٨٠).



الشكل (٢-١٧): فرق الجهد بين صفيحتين متوازيتين.

وبتطبيق العلاقة (٢-٨) يمكننا حساب فرق الجهد بين صفيحتين مشحونتين كما في الشكل (٢-١٧)، فإذا كان البعد بين الصفيحتين (ف)، وكانت (أ) نقطة تقع على الصفيحة الموجبة و(ب) نقطة تقع على الصفيحة السالبة، فإن (ج_{أب}) في هذه الحالة يساوي فرق الجهد بين الصفيحتين، ويرمز له بالرمز (ج). أي أن:

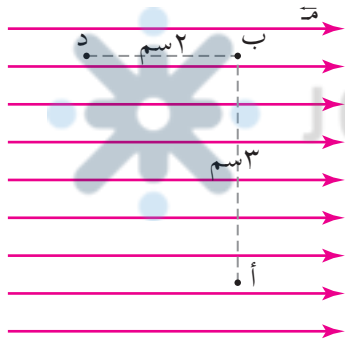
$$ج_{أب} = م ف_{أب} \cos \theta$$

$$ج = م ف \cos \theta$$

$$ج = م ف \dots (٢-٩)$$

وبالاعتماد على هذه العلاقة يمكن القول إن المجال الكهربائي (م = $\frac{ج}{ف}$) مقياس للتغير في الجهد مع تغير الموقع.

مثال (٢-٦)



الشكل (٢-١٨): مثال (٢-٦).

يبين الشكل (٢-١٨) ثلاث نقاط (أ، ب، د) ضمن مجال كهربائي منتظم مقداره (٣١٠) نيوتن/كولوم. معتمداً على الشكل، احسب: (ج_د)، (ج_{أب}).

الحل:

١) لحساب (ج_د) نطبق العلاقة:

$$ج_{د} = م ف_{د} \cos \theta$$

وبين الشكل (٢-١٩/أ)، اتجاه الإزاحة من (ب) إلى (د)، والزاوية بين اتجاهي الإزاحة والمجال الكهربائي المنتظم ($\theta = ١٨٠^\circ$).

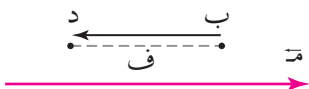
$$ج_{د} = ٣١٠ \times ٢ \times ١٠^{-٢} \times \cos ١٨٠$$

$$= -٢٠ \text{ فولت.}$$

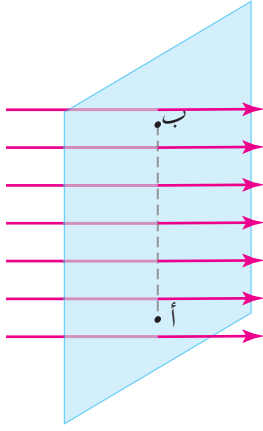
$$٢) ج_{أب} = م ف_{أب} \cos \theta.$$

$$ج_{أب} = ٣١٠ \times ٣ \times ١٠^{-٢} \times \cos ٩٠ = ٠$$

$$ج_{أ} - ج_{ب} = ٠ \text{ أي أن } ج_{أ} = ج_{ب}.$$



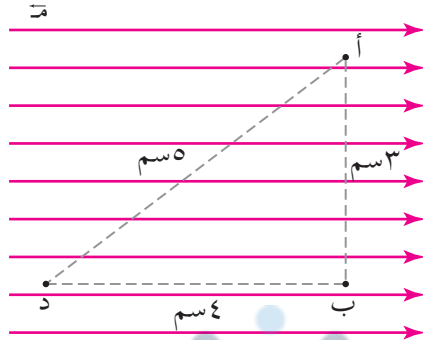
الشكل (٢-١٩/أ): مثال (٢-٦).



والنقاط جميعها الواقعة على الخط الواصل بين النقطتين (أ) و(ب) متساوية في الجهد، ويسمى السطح الذي تقع عليه هذه النقاط سطح تساوي جهد. لاحظ الشكل (٢-١٩/ب)، وسنبحث في سطوح تساوي الجهد لاحقاً.

الشكل (٢-١٩/ب): مثال (٢-٦).

مثال (٧-٢)



الشكل (٢-٢٠/أ): مثال (٧-٢).

يبين الشكل (٢-٢٠/أ) ثلاث نقاط (أ، ب، د) في مجال كهربائي منتظم مقداره (2×10^2) نيوتن/كولوم. معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل احسب (ج_د) في حالتين:
١ عبر المسار (أ ← د).

٢ عبر المسار (أ ← ب ← د).

الحل:

١ لحساب فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين (أ، د) عبر المسار أ ← د، نحتاج إلى تحديد

الزاوية (θ)، لاحظ الشكل (٢-٢٠/ب). حيث $\cos \theta = \frac{4}{5}$ جتا هـ =

$$\text{ج}_{\text{أد}} = \text{م ف}_{\text{أد}} \cos \theta$$

$$= -2 \times 10^2 \times 5 \times \frac{4}{5} = -800 \text{ فولت.}$$

$$\text{ج}_{\text{أد}} = -8 \text{ فولت.}$$

٢ لحساب فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين (أ، د) عبر المسار أ ← ب ← د:

$$\text{ج}_{\text{أد}} = \text{ج}_{\text{أب}} + \text{ج}_{\text{ب د}}$$

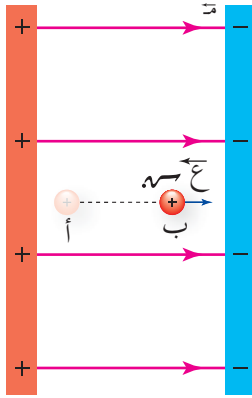
$$\text{ج}_{\text{أد}} = \text{م ف}_{\text{أب}} \cos \theta + \text{م ف}_{\text{ب د}} \cos \theta$$

$$= 2 \times 10^2 \times 3 \times \frac{4}{5} + 0 \times 2 \times 10^2 \times 4 \times \frac{4}{5} = 480 \text{ فولت.}$$

$$\text{ج}_{\text{أد}} = -8 \text{ فولت.}$$

نستنتج مما سبق أن فرق الجهد الكهربائي بين نقطتين في مجال كهربائي منتظم ثابت ولا يعتمد على المسار، وهذا يعود إلى أن القوة الكهربائية قوة محافظة، وشغلها لا يعتمد على المسار.

مثال (٨-٢)



يتحرك بروتون شحنته (e) وكتلته (m) من السكون من النقطة (أ) عند الصفيحة الموجبة إلى النقطة (ب) عند الصفيحة السالبة في الحيز بين صفيحتين كما في الشكل (٢-٢١). إذا كان فرق الجهد (ج) بين النقطتين (أ، ب)، فأتيت أن سرعة البروتون بعد قطعه الإزاحة بين الصفيحتين تعطى بالعلاقة الآتية:

الشكل (٢-٢١): مثال (٨-٢).

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

الحل:

يتحرك البروتون تحت تأثير القوة الكهربائية، ويحسب (W) من العلاقة:

$$W = -e(V_B - V_A)$$

وبما أن النظام محافظ فإن: $W = \Delta U = U_B - U_A$

ولأن البروتون تحرك من السكون فإن: $W = -e(V_B - V_A) = \frac{1}{2}mv^2$

وبتعويض ($U = \frac{1}{2}mv^2$) وإعادة ترتيب الحدود:

$$-e(V_B - V_A) = \frac{1}{2}mv^2$$

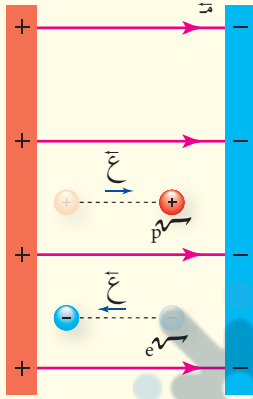
$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

بتطبيق العلاقة التي توصلنا إليها في المثال السابق يمكن حساب سرعة الجسيمات الذرية المتحركة عبر فرق جهد كهربائي عالٍ، حيث تتحرك هذه الجسيمات بسرعة كبيرة يصعب قياسها عملياً.

مراجعة (٢-٤)

١ يقاس المجال الكهربائي بوحدة (نيوتن/كولوم) وتبين المعادلة ($m = \frac{h}{mv}$) أن وحدة قياس المجال الكهربائي (فولت/م). أثبت أن الـ وحدتين متكافئتان.



٢ تحرك إلكترون وبروتون من السكون داخل مجال كهربائي منتظم باتجاهين متعاكسين كما هو مبين في الشكل (٢-٢٢)، فقطع كل منهما الإزاحة نفسها. إذا علمت أن كتلة الإلكترون تعادل $\frac{1}{1840}$ من كتلة البروتون تقريباً، فـ قارن بين كل مما يأتي في نهاية الإزاحة:

أ سرعة الإلكترون وسرعة البروتون.

ب الطاقة الحركية لكل منهما.

الشكل (٢-٢٢): سؤال (٢).

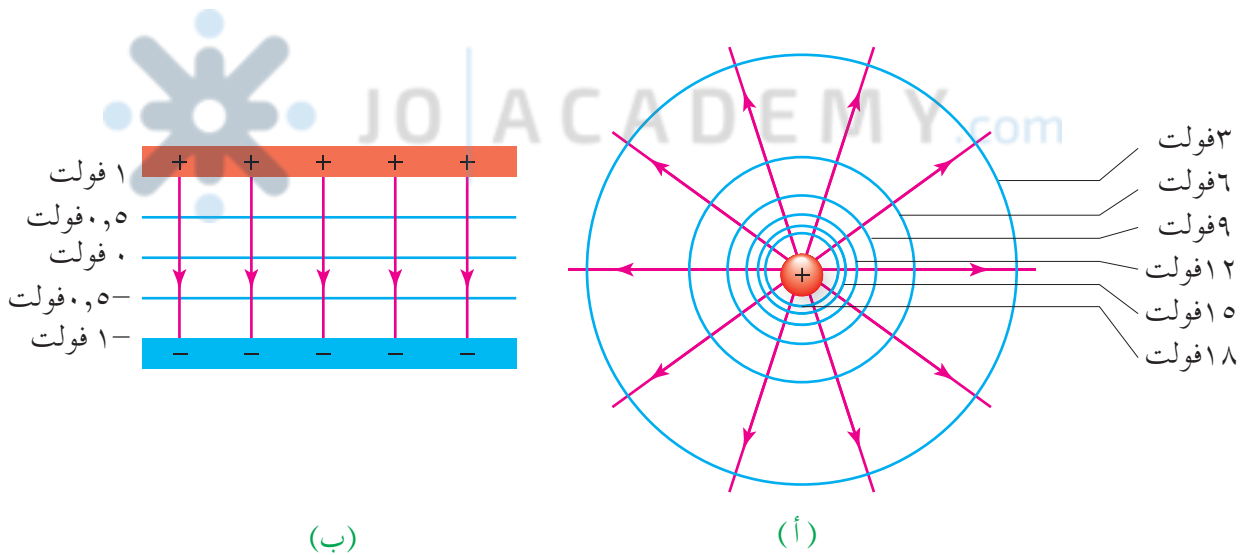
يسمى السطح الذي يكون الجهد عند نقاطه جميعها متساوياً ويساوي قيمة ثابتة **سطح تساوي الجهد**. وتسهم سطوح تساوي الجهد في فهم توزيع قيم الجهد وتصورها حول شحنة كهربائية أو توزيع من الشحنات.

سطوح تساوي الجهد

نشاط (٢-١)

الهدف: وصف سطوح تساوي الجهد.

يبين الشكل (٢-٢) سطوح تساوي الجهد، لشحنة نقطية كما في الشكل (٢-٢٣ / أ)، وسطوح تساوي الجهد في الحيز بين صفيحتين متوازيتين كما في الشكل (٢-٢٣ / ب). ادرس الشكل وأجب عن الأسئلة الآتية:



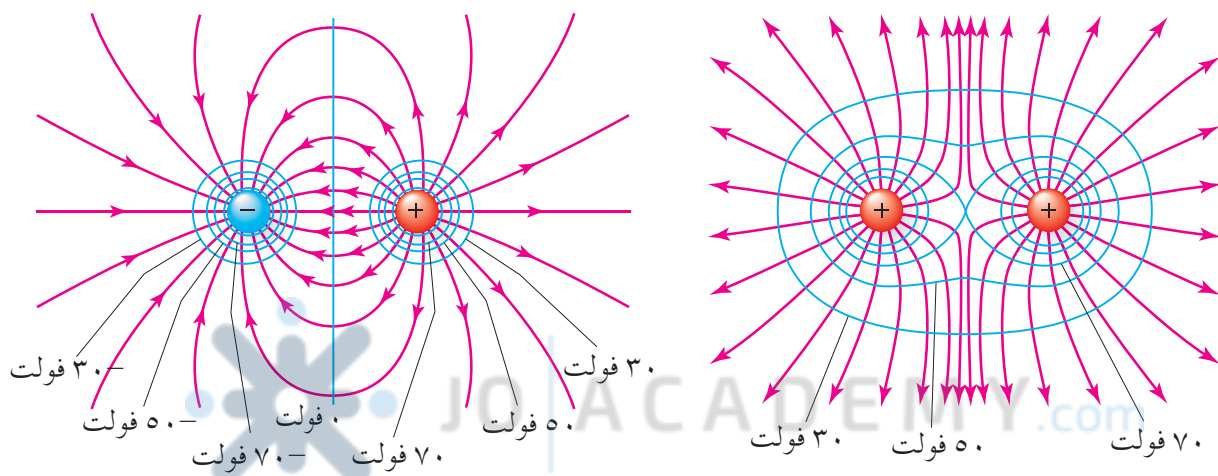
الشكل (٢-٢): سطوح تساوي الجهد.

١ صف سطوح تساوي الجهد في الشكلين.

٢ في أي منطقة تتقارب سطوح تساوي الجهد في الشكل (٢-٢٣ / أ)، أبعداً عن الشحنة أم بالقرب منها؟ ما علاقة ذلك بمقدار المجال الكهربائي؟

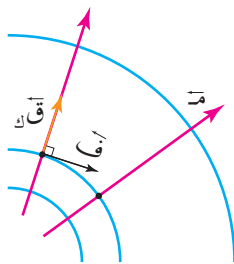
٣ ما الزاوية التي تصنعها سطوح تساوي الجهد مع خطوط المجال الكهربائي؟

لا شك في أنك لاحظت أن سطوح تساوي الجهد للشحنة النقطية تبدو كروية الشكل، وتكون أكثر تقاربًا بالقرب من الشحنة؛ لأن المجال الكهربائي للشحنة النقطية مجال غير منتظم، يقل كلما ابتعدنا عن الشحنة وحيثما تقاربت سطوح تساوي الجهد دل ذلك على قيمة كبيرة للمجال الكهربائي. أما سطوح تساوي الجهد في الحيز بين الصفيحتين فتظهر متوازية والمسافات بينها متساوية لتدل على أن المجال الكهربائي منتظم. ويمكن رسم سطوح تساوي الجهد لأي توزيع من الشحنات الكهربائية، انظر الشكل (٢-٢٤).



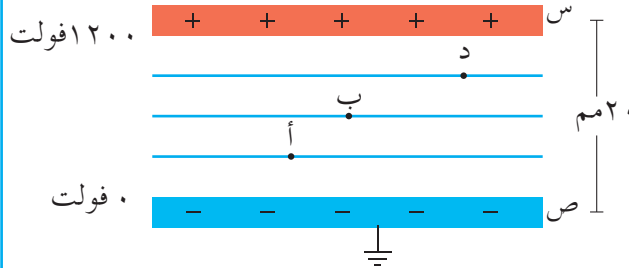
الشكل (٢-٢٤): سطوح تساوي الجهد لتوزيع من الشحنات الكهربائية.

وبما أنه لا يوجد فرق في الجهد الكهربائي بين أي نقطتين واقعتين على سطح تساوي الجهد فإنه لا يلزم بذل شغل لنقل شحنة على سطح تساوي الجهد. وعليه تكون سطوح تساوي الجهد دائماً عمودية على خطوط المجال الكهربائي، انظر الشكل (٢-٢٥)؛ ويمكن إثبات ذلك من العلاقة: $\text{ش} = q \cdot \cos \theta$. بما أن $\text{ش} = 0$ ، فإن $\cos \theta = 0$ ، ويكون ذلك صحيحاً عندما $(\theta = 90^\circ)$ ؛ أي عندما يتعامد اتجاه الإزاحة مع اتجاه القوة الكهربائية التي تكون باتجاه المجال الكهربائي.



الشكل (٢-٢٥): سطوح تساوي الجهد عمودية على خطوط المجال.

صفيحتان موصلتان متوازيتان شحنت الصفيحة (س) بشحنة موجبة، ووصلت الصفيحة (ص) بالأرض فشحنت بالحث بشحنة سالبة، ويبين الشكل (٢-٢٦) سطوح تساوي الجهد في الحيز بين الصفيحتين. احسب:



١ المجال الكهربائي بين الصفيحتين مقداراً واتجاهاً.

٢ الجهد الكهربائي عند النقاط (أ، ب، د).

الشكل (٢-٢٦): مثال (٢-٩).

الحل:

١ لحساب المجال الكهربائي بين الصفيحتين نطبق العلاقة: (ج = م · ف)، وبما أن الصفيحة (ص) تتصل بالأرض، فإن جهدها يساوي صفراً. ويكون فرق الجهد بين الصفيحتين:

$$ج = ١٢٠٠ - ٠ = ١٢٠٠ \text{ فولت.}$$

$$م = \frac{ج}{ف} = \frac{١٢٠٠}{٣-١٠ \times ٢٠} = ١٠ \times ٦ \text{ فولت/م}$$

ويكون اتجاه المجال الكهربائي نحو المحور الصادي السالب؛ أي من الصفيحة الموجبة إلى الصفيحة السالبة.

٢ بما أن المجال الكهربائي بين الصفيحتين منتظم فالمسافات بين سطوح تساوي الجهد متساوية؛ وعليه فإن:

$$ف_{أص} = \frac{ف}{٤} \Leftarrow ف_{أص} = \frac{٢٠}{٤} \Leftarrow ف_{أص} = ٥ \text{ مم}$$

$$ج_{أص} = م \times ف_{أص}$$

$$ج_{أص} = ٠ - ٣-١٠ \times ٥ \times ١٠ \times ٦ = ٣٠٠ \text{ فولت.}$$

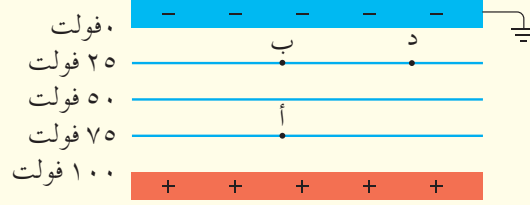
وبالمثل نتوصل إلى أن:

$$ج_{ب} = ٦٠٠ \text{ فولت.}$$

$$ج_{د} = ٩٠٠ \text{ فولت.}$$

١ بين الشكل (٢-٢٧) سطوح تساوي الجهد في الحيز بين صفيحتين موصلتين متوازيتين.

احسب:

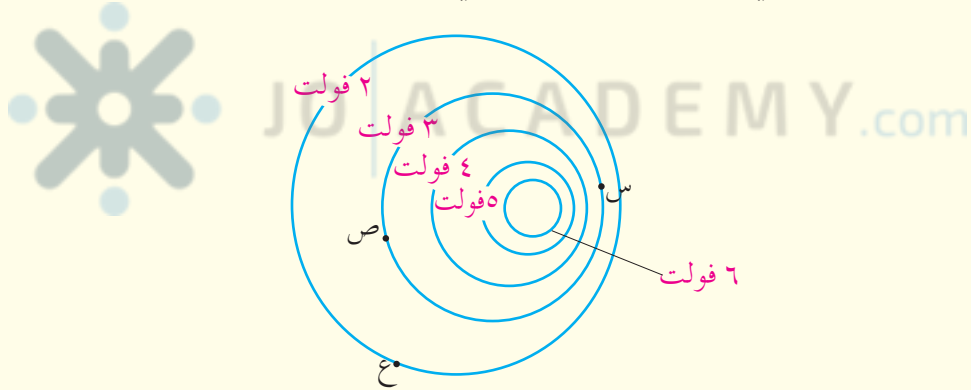


الشكل (٢-٢٧): سؤال (١).

أ فرق الجهد (ج.ب).

ب شغل القوة الكهربائية المبذول عند نقل شحنة (٢) نانوكولوم من (ب) إلى (د).

٢ بين الشكل (٢-٢٨) بعض سطوح تساوي الجهد لتوزيع من الشحنات الكهربائية. معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل أجب عما يأتي:



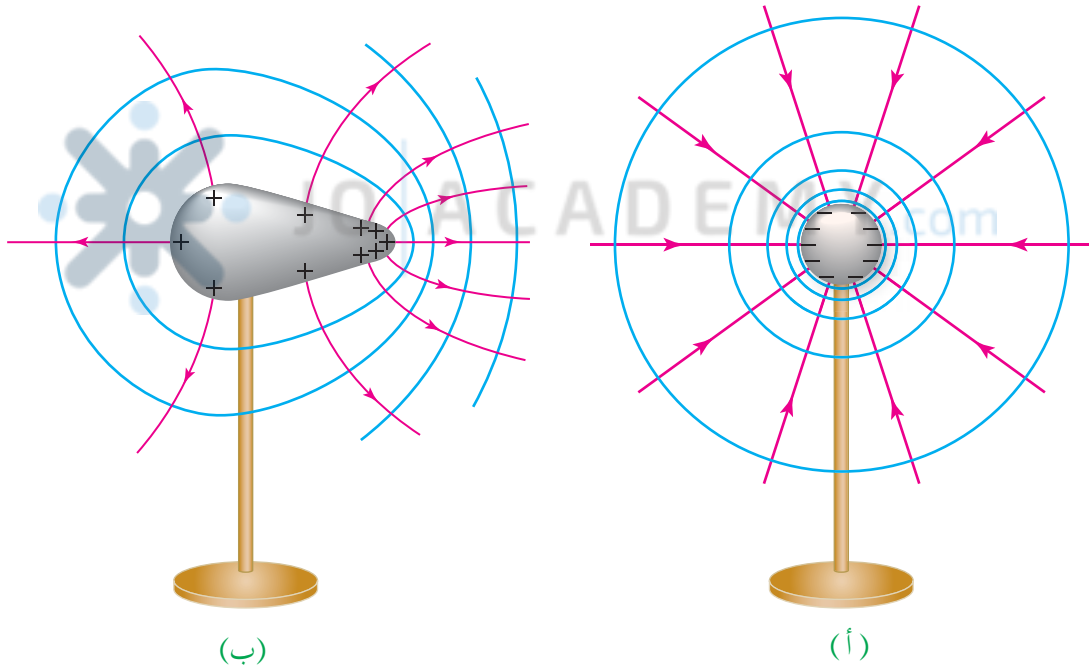
الشكل (٢-٢٨): سؤال (٢).

أ هل الجهد عند النقطة (س) يساوي الجهد عند النقطة (ص)؟ فسر إجابتك.

ب قارن بين مقدار المجال الكهربائي عند النقطتين (س) و (ص) مفسراً إجابتك.

ج احسب شغل القوة الخارجية اللازم لنقل بروتون من النقطة (ع) إلى النقطة (ص) بسرعة ثابتة.

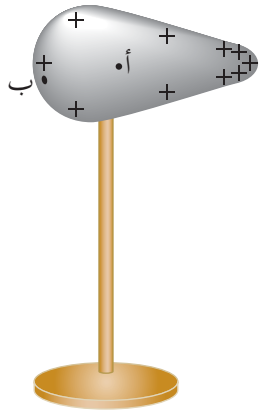
عند شحن موصل (كرة مثلاً) فإن الشحنات تتنافر وتتباعدها، ويسمح لها الموصل بالانتقال لتستقر على سطحه الخارجي فقط، حيث تكون متباعدة أكثر ما يمكن. وللموصلات المشحونة مجال كهربائي في الحيز المحيط بها يعتمد على شكل الموصل، ويبين الشكل (٢-٢٩) خطوط المجال الكهربائي وسطوح تساوي الجهد لموصلين مختلفين. إن الشحنات تتوزع على سطح الموصل الكروي بانتظام؛ إذ إن سطحه منتظم، لاحظ الشكل (٢-٢٩/أ)، بينما يكون توزيع الشحنات غير منتظم على سطح الموصل المبيّن في الشكل (٢-٢٩/ب)؛ إذ تتباعدها الشحنات عن بعضها قدر المتاح، وقد وجد تجريبياً أن الكثافة السطحية للشحنة تكون أكبر عند الرؤوس المدببة مقارنة بالمناطق الأخرى الأقل تحدباً على الموصل نفسه.



الشكل (٢-٢٩): خطوط المجال الكهربائي وسطوح تساوي الجهد للموصلات المشحونة.

وبما أن الشحنات على سطح الموصل مستقرة وساكنة، فإنها تكون في حالة اتزان، أي أن القوة المحصلة المؤثرة في كل شحنة تكون صفراً، وبذلك يكون فرق الجهد الكهربائي بين أي نقطتين صفراً، وجميع النقاط الواقعة على سطح الموصل متساوية في الجهد؛ لذا يعد سطح الموصل المشحون سطح تساوي جهد.

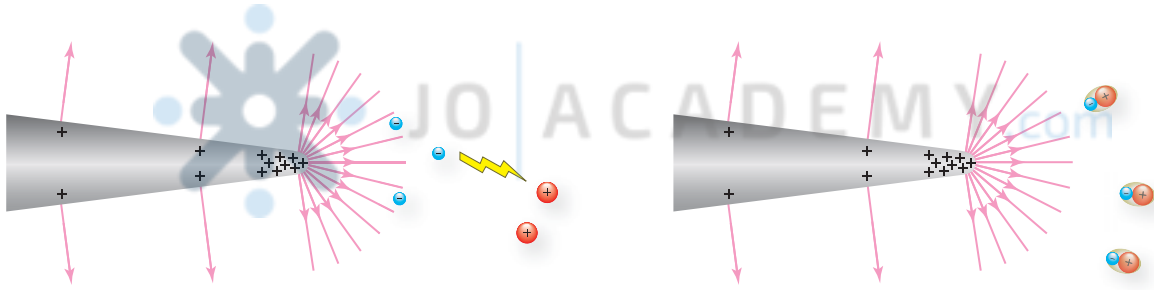
ماذا عن الجهد داخل الموصل؟ هل يوجد فرق في الجهد بين داخل الموصل وسطحه؟



أثبت العالم غاوس أن الشحنات تستقر على السطح الخارجي للموصل؛ ما يجعل المجال الكهربائي داخله صفراً، وإذا كان المجال الكهربائي في منطقة ما صفراً ($\phi = 0$)، فإنه لا يلزم بذل شغل لنقل شحنة بين نقطتين ضمن تلك المنطقة، ففي الشكل (٢-٣٠) إذا كانت (أ) نقطة داخل الموصل و(ب) نقطة على سطحه فإن ($\phi_{\text{أ}} = \phi_{\text{ب}}$)؛ لذلك يكون فرق الجهد بين النقطتين صفراً. وهذا يعني أن الجهد عند أي نقطة داخل الموصل ثابت، ويساوي قيمة جهد سطح الموصل.

الشكل (٢-٣٠): الجهد داخل الموصل يساوي الجهد على سطحه.

وتحدث ظاهرة بالقرب من الموصلات ذات الجهد الكهربائي العالي أو بالقرب من الرؤوس المدببة؛ إذ يتولد حول الرأس المدبب مجال كهربائي قوي يعمل على تأيين جزيئات الهواء في تلك المنطقة، لاحظ الشكل (٢-٣١)، فيصبح الهواء موصلاً، ويحدث تفريغ كهربائي للشحنات في الهواء؛ أي ينشأ تيار كهربائي، فتظهر شرارة تشبه البرق.



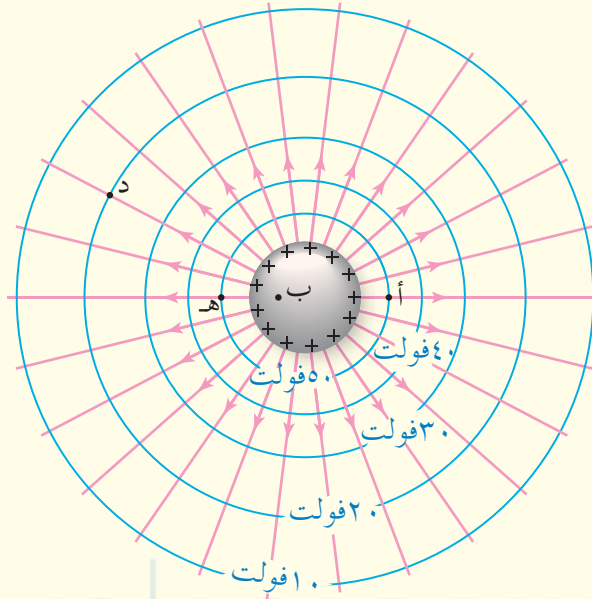
الشكل (٢-٣١): تأين جزيئات الهواء بالقرب من الرأس المدبب لموصل.

ويبين الشكل (٢-٣٢) التفريغ الكهربائي بالقرب من الرأس المدبب لسلك فلزي.



الشكل (٢-٣٢): التفريغ الكهربائي بالقرب من رأس مدبب.

١ معتمداً على الشكل (٢-٣٣) الذي يبين سطوح تساوي الجهد وخطوط المجال الكهربائي لموصل كروي مشحون أجب عما يأتي:

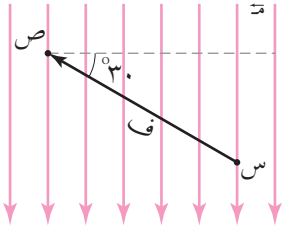


الشكل (٢-٣٣): سؤال (١).

- أ رتب النقاط (أ، ب، ج، د) تصاعدياً وفق قيم المجال الكهربائي عندها.
- ب رتب النقاط (أ، ب، ج، د) تصاعدياً وفق قيم الجهد عندها.
- ج هل تتغير طاقة الوضع الكهربائية للإلكترون عند انتقاله من النقطة (ب) داخل الموصل إلى سطح الموصل؟ فسر إجابتك.
- ٢ لماذا يجب الحذر من الرؤوس المدببة عند التعامل مع أجسام فلزية ذات جهد كهربائي عالٍ؟

أسئلة الفصل الثاني

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:



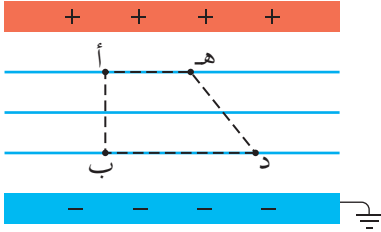
١ تقع النقطتان (س، ص) في مجال كهربائي منتظم مقداره (م)،
والبعد بينهما (ف) كما في الشكل (٢-٣٤). وعليه فإن (جس ص):

أ) م ف جتا ١٨٠ ب) م ف جتا ١٢٠

ج) م ف جتا ٣٠ د) م ف جتا ٦٠

الشكل (٢-٣٤): سؤال (١) فقرة (١).

٢ بين الشكل (٢-٣٥) صفيحتين موصلتين متوازيتين، (أ، ب، د، هـ) أربع نقاط تقع في المجال الكهربائي بين الصفيحتين. تزداد طاقة الوضع الكهربائية لشحنة نقطية موجبة عند انتقالها من:



أ) النقطة (د) إلى النقطة (هـ)

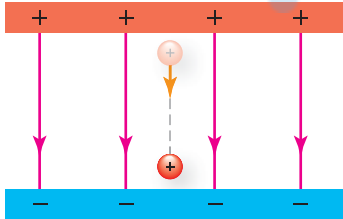
ب) النقطة (د) إلى النقطة (ب)

ج) النقطة (أ) إلى النقطة (ب)

د) النقطة (أ) إلى النقطة (هـ)

الشكل (٢-٣٥): سؤال (١) فقرة (٢).

٣ عندما تتحرك شحنة موجبة حرة في مجال كهربائي منتظم كما في الشكل (٢-٣٦) فإن القوة الكهربائية تبذل عليها شغلًا:



أ) موجبًا، فتزداد طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

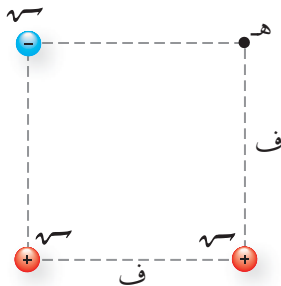
ب) سالبًا، فتقل طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

ج) موجبًا، فتقل طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

د) سالبًا، فتزداد طاقة الوضع الكهربائية للنظام.

الشكل (٢-٣٦): سؤال (١) فقرة (٣).

٤ عند وضع ثلاث شحنات نقطية متساوية في المقدار عند رؤوس مربع، كما يبين الشكل (٢-٣٧).

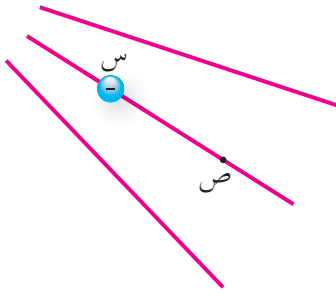


فإن الجهد الكهربائي عند النقطة (هـ) يساوي:

أ) $2 \left(\frac{q}{F} \right)$ ب) $3 \left(\frac{q}{F} \right)$

ج) $2 \left(\frac{q}{\sqrt{2}F} \right)$ د) $2 \left(\frac{q}{\sqrt{2}F} \right)$

الشكل (٢-٣٧): سؤال (١) فقرة (٤).



٢ بين الشكل (٢-٣٨) نقطتين (س، ص) في مجال كهربائي، وضعت شحنة سالبة عند النقطة (س) فتحركت بتأثير القوة الكهربائية نحو النقطة (ص)، ادرس الشكل وأجب عما يأتي:

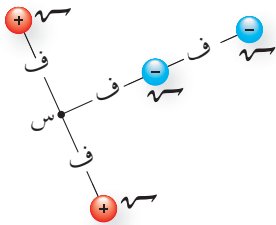
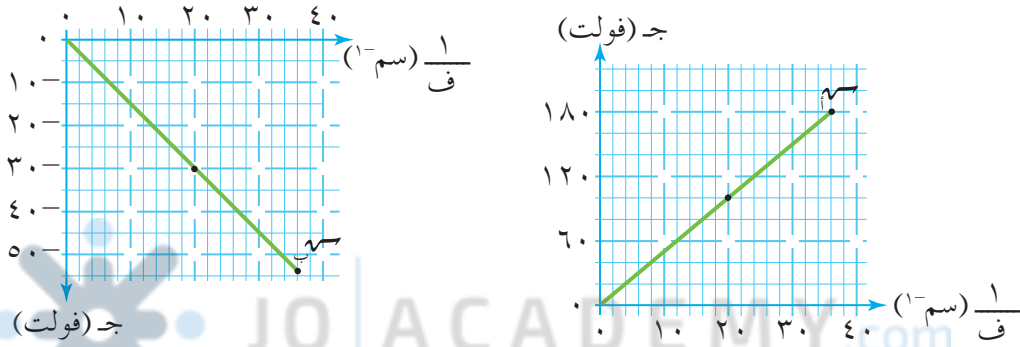
أ حدد اتجاه المجال الكهربائي.

ب هل تزداد طاقة الوضع الكهربائية للشحنة أم تقل؟

ج هل (ج_ص) موجب أم سالب؟

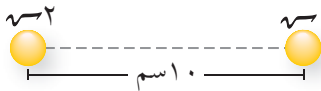
الشكل (٢-٣٨): سؤال (٢).

٣ بين الشكل (٢-٣٩) تمثيلًا بيانيًا للعلاقة بين الجهد الناشئ عن كل من شحنتين نقطيتين (سم، سب) ومقلوب البعد عن كل منهما، اعتمادًا على البيانات جد مقدار كل من الشحنتين ونوعهما.



٤ في الشكل (٢-٤٠) احسب الجهد الكهربائي عند النقطة (س)، علمًا بأن (سم = ٥) ميكروكولوم، و (ف = ٤) سم.

الشكل (٢-٤٠): سؤال (٤).



الشكل (٢-٤١): سؤال (٥).

٥ شحنتان نقطيتان متماثلتان في النوع موضوعتان في الهواء، والمسافة بينهما (١٠) سم، كما في الشكل (٢-٤١). إذا كانت طاقة الوضع الكهربائية المخزنة في النظام المكون منهما (٧٢ × ١٠^{-١}) جول. فاحسب:

أ مقدار كل من الشحنتين.

ب الشغل الذي تبذله القوة الكهربائية لنقل الشحنة (سم) من موقعها إلى اللانهاية؟

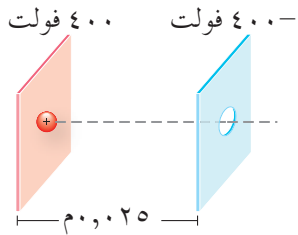
٦ يبين الشكل (٢-٤٢) بروتوناً أطلق من السكون في الحيز بين صفيحتين مشحونتين متوازيتين.

معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل احسب:

أ المجال الكهربائي في الحيز بين الصفيحتين مقداراً واتجاهاً.

ب القوة الكهربائية المؤثرة في البروتون مقداراً واتجاهاً.

ج سرعة البروتون لحظة خروجه من الثقب في الصفيحة السالبة.



الشكل (٢-٤٢): سؤال (٦).

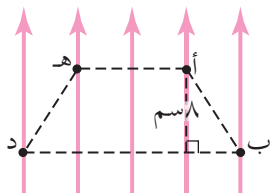
٧ يبين الشكل (٢-٤٣) أربع نقاط (أ، ب، د، هـ) تقع في مجال كهربائي منتظم مقداره (٠.٣١) فولت/م.

احسب:

أ) فرق الجهد (جهد).

ب شغل القوة الكهربائية عند نقل شحنة (1.0×10^{-6}) كولوم من

(ب) إلى (هـ) عبر المسار (ب ← أ ← هـ).



الشكل (٢-٤٣): سؤال (٧).

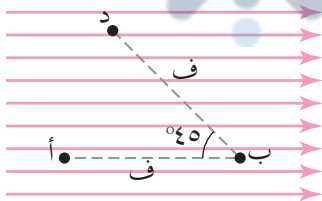
٨ بين الشكل (٢-٤٤) ثلاث نقاط (أ، ب، د) في مجال كهربائي منتظم مقداره (٦٠٠) فولت/م.

إذا كانت (ف=هـ) سم. فاحسب:

۱۔ جس اب۔

ب ج د

ج (جاء) عبر المسار (أ ← ب ← د).



الشكل (٢-٤٤): سؤال (٨).

المواسعة الكهربائية

Electric Capacitance

الفصل الثالث

في هذا الفصل

(١-٣)

المواسع الكهربائي.

(٢-٣)

الطاقة المخزنة في المواسع ذي الصفيحتين المتوازيين.

(٣-٣)

توصيل المواسعات.

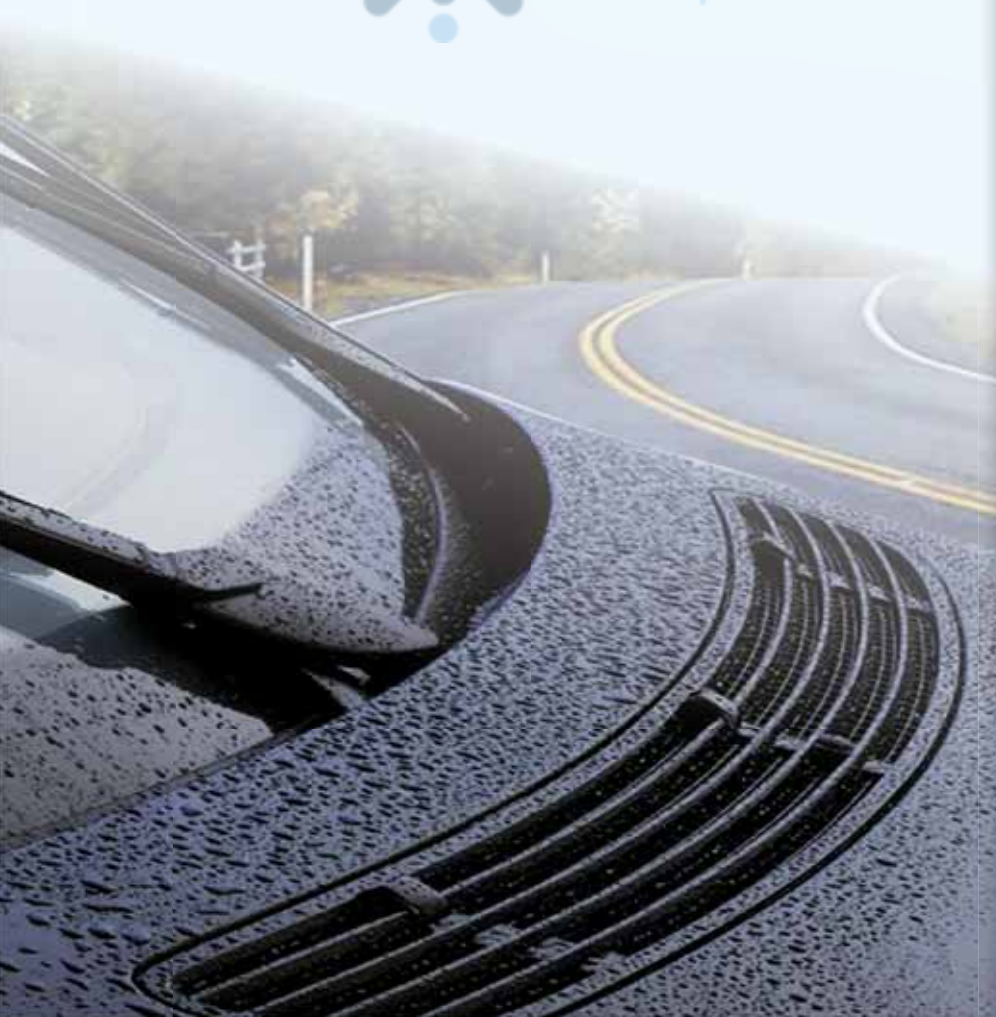
(٤-٣)

المواسعات في التطبيقات العملية.

تشكل الكهرباء جزءاً رئيساً من حياتنا، ولا تكاد تخلو لحظات حياتنا من استخدام الأجهزة الكهربائية بأشكالها المختلفة. تتكون الأجهزة الكهربائية من دارات كهربائية وإلكترونية متنوعة، وفي هذا الفصل سنتعرف أحد المكونات الرئيسة للدائرة وهو المواسع الكهربائي. فما المقصود بالمواسع؟ وما مبدأ عمله؟ وكيف يمكن استخدام مجموعة من المواسعات في دائرة كهربائية؟

هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

تستخدم المواسعات في الدارة الكهربائية لمساحات زجاج السيارة عند عملها وفق نظام توقيت؛ إذ يحدد المواسع المستخدم في دائرة المساحات الفترة الزمنية بين كل مسحتين متتاليتين.



ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- * توضح المقصود بالمواسعة الكهربائية، ووحدة قياسها، وتعبر عنها رياضياً.
- * تتوصل إلى العوامل المؤثرة في مواسعة مواسع ذي صفيحتين متوازيتين.
- * تتوصل إلى العلاقة الرياضية لحساب الطاقة المخزنة في مواسع كهربائي.
- * تتوصل إلى العلاقات الخاصة بالمواسعات وتوصيلها على التوالي والتوازي، لحساب الشحنة والجهد والمواسعة المكافئة.
- * تبحث في التطبيقات العملية التي تعتمد على المواسعات.



JO | ACADEMY.com



تحتاج بعض الدارات الكهربائية إلى تخزين الطاقة الكهربائية فيها؛ لذلك يوجد أداة تستخدم

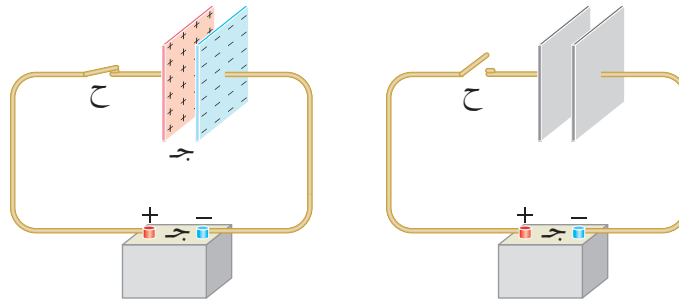


الشكل (١-٣): أشكال المواسع.

لتخزين الطاقة الكهربائية تسمى المواسع الكهربائي. يتكون المواسع من موصلين تفصل بينهما مادة عازلة مثل الهواء والبلاستيك والورق. وتوجد المواسعات بأشكال وحجوم مختلفة، لاحظ الشكل (١-٣)، فمنها المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين، والمواسع الأسطوانية. ويرمز عادة للمواسع في الدارات الكهربائية بخطين متوازيين (H-).

يتكون المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين بأبسط أشكاله، من صفيحتين موصلتين متوازيتين متساويتين في المساحة، تفصل بينهما طبقة من مادة عازلة.

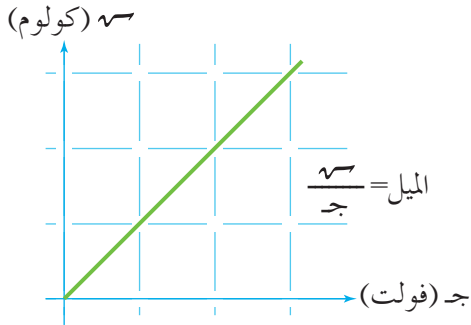
ويمكن شحن المواسع بوصل صفيحتيه مع بطارية، لاحظ الشكل (٢-٣) إذ تمثل البطارية مصدرًا للطاقة الكهربائية تعمل على شحن إحدى صفيحتي المواسع بشحنة موجبة، والأخرى بشحنة مساوية سالبة.



الشكل (٢-٣): شحن مواسع بواسطة بطارية.

تتطلب عملية الشحن زمنًا قصيرًا تنمو خلاله الشحنة على المواسع بعد غلق المفتاح (ح)، ويزداد جهد المواسع تدريجيًا مع الشحنة، وتنتهي عملية الشحن عندما يتساوى فرق الجهد بين صفيحتي المواسع مع فرق الجهد بين طرفي البطارية، وعندها تصل الشحنة على المواسع إلى قيمتها النهائية، وتكون كمية الشحنة على كل من الصفيحتين متساوية في المقدار.

وبين الشكل (٣-٣) التمثيل البياني للعلاقة الخطية بين جهد المواسع وشحنته.



ويمثل ميل الخط المستقيم كمية فيزيائية تسمى المواسعة الكهربائية، ويرمز لها بالرمز (س)، أي أن:

الشكل (٣-٣): منحنى (ج-ص).

$$س = \frac{Q}{V} \dots\dots\dots (٣-١)$$

حيث (ص): شحنة المواسع عند أي لحظة، ويعبر عنها بالقيمة المطلقة للشحنة على أي من صفيحتي المواسع، و (ج): فرق الجهد بين صفيحتي المواسع عند تلك اللحظة (جهد المواسع). وتعرف **المواسعة الكهربائية** بأنها النسبة بين كمية الشحنة المخزنة في المواسع وفرق الجهد بين طرفيه (صفيحتيه).

وتقاس المواسعة الكهربائية بوحدة (كولوم/فولت)، وتسمى الفاراد. ويمثل **الفاراد** مواسعة مواسع يخزن شحنة مقدارها (١) كولوم عندما يكون فرق الجهد بين صفيحتيه (١) فولت. وتعد المواسعة مقياساً لقدرة المواسع على تخزين الشحنات الكهربائية.

مثال (٣-١)

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، وصل مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها (١٢) فولت، فاكسب شحنة مقدارها (٦×١٠^{-١٠}) كولوم:

١ احسب مواسعة المواسع.

٢ إذا وصل المواسع مع بطارية ذات فرق جهد أكبر. ماذا يحدث لكل من شحنته ومواسعته؟ فسر إجابتك.

الحل:

١ تحسب المواسعة من العلاقة:

$$س = \frac{Q}{V} = \frac{٦ \times ١٠^{-١٠}}{١٢}$$

$$س = ٥,٥ \times ١٠^{-١٠} \text{ فاراد.}$$

$$= ٥,٥ \text{ ميكروفاراد}$$

٢ عند وصل المواسع مع بطارية ذات فرق جهد أكبر يزداد فرق الجهد بين صفيحتيه ليصبح مساوياً
فرق الجهد بين طرفي البطارية، ويتحقق ذلك باكتساب المواسع شحنة أكبر؛ أي أن التغير في
الجهد يقابله تغير في الشحنة، بحيث تبقى النسبة بينهما ثابتة والتي تمثل المواسعة (س).

مثال (٣-٢)

يبين الشكل (٣-٤) التمثيل البياني للعلاقة بين جهد مواسع ذي صفيحتين متوازيتين وشحنته.
مستعيناً بالشكل احسب:

١ مواسعة المواسع.

٢ شحنة المواسع النهائية إذا وصل مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها (٣٠) فولت.

الحل:

١ نجد المواسعة من ميل الخط المستقيم:

$$S = \frac{6^{-10} \times (0-3)}{(0-12)}$$

$$= 6^{-10} \times \frac{1}{4}$$

$$= 0,25 \times 6^{-10} \text{ فاراد.}$$

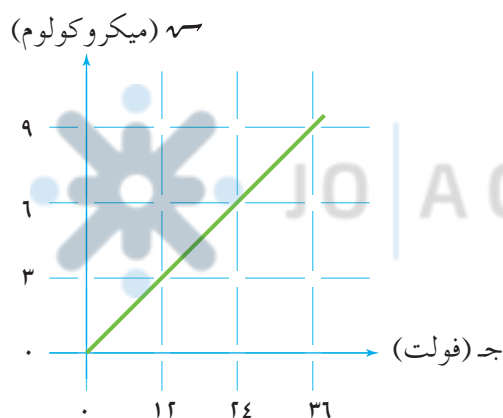
$$S = 0,25 \text{ ميكروفاراد.}$$

٢ بما أن المواسعة ثابتة، فإن:

$$S = 30 \times 6^{-10} \times 0,25 = 4,5 \times 6^{-10} \text{ كولوم}$$

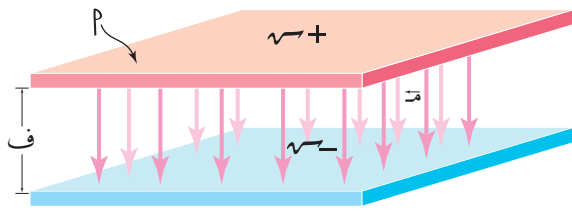
$$= 4,5 \text{ ميكروكولوم}$$

$$= 4,5 \text{ ميكروكولوم}$$



الشكل (٣-٤): مثال (٣-٢).

والسؤال الآن؛ ما هي العوامل التي تعتمد عليها مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين؟



يبين الشكل (٣-٥) مواسعاً مشحوناً مساحة كل من صفيحتيه (P)، والبعد بينهما (ف)، ويفصل بينهما الهواء، شحنة إحدى صفيحتيه (σ)، وشحنة الصفيحة الأخرى ($-\sigma$).

الشكل (٣-٥): المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين.

عند شحن المواسع فإن الشحنات تنتشر على سطحي صفيحتيه، فإذا زادت مساحة الصفيحتين فإن المواسع يصبح قادراً على استيعاب كمية أكبر من الشحنة. وبذلك نستنتج أن المواسع ذا المساحة الأكبر يخزن شحنة أكبر، فتزداد مواسعته بثبات كل من؛ الجهد الكهربائي (ج) والبعد بين الصفيحتين (ف).

وينشأ في الحيز بين صفيحتي المواسع بعد شحنهما مجال كهربائي كما في الشكل (٣-٥)، فإذا كان البعد بين الصفيحتين صغيراً جداً مقارنة بأبعاد الصفيحتين فإن المجال الكهربائي بين الصفيحتين يعد مجالاً منتظماً يعطى مقداره بالعلاقة ($\sigma = \frac{Q}{A}$)، ويكون فرق الجهد بين الصفيحتين ($V = \frac{Q}{C}$).

فإذا تغير البعد بين الصفيحتين من (ف) إلى ($\frac{f}{2}$) مع بقاء البطارية نفسها (ثبات الجهد) فإن العلاقة ($V = \frac{Q}{C}$) تشير إلى أن مقدار المجال الكهربائي بين صفيحتي المواسع يجب أن يصبح ضعفي ما كان عليه، وعليه فإن الشحنة على صفيحتيه يجب أن تصبح ضعفي ما كانت عليه، وبذلك نستنتج أن المواسع يصبح قادراً على تخزين شحنة أكبر إذا قل البعد بين صفيحتيه، فتزداد مواسعته مع ثبات الجهد الكهربائي (ج).

وعليه يمكن التعبير عن المواسعة على النحو الآتي: $C = \frac{Q}{V} = \frac{\sigma \cdot A}{\frac{Q}{C}} = \frac{\sigma \cdot A \cdot C}{Q}$

وبتعويض ($\sigma = \frac{Q}{A}$)، نجد أن: $C = \frac{\sigma \cdot A \cdot C}{Q} = \frac{Q \cdot A \cdot C}{Q \cdot A} = C$

وبتعويض ($\sigma = \frac{Q}{A}$)، فإن: $C = \frac{\sigma \cdot A \cdot C}{Q} = \frac{Q \cdot A \cdot C}{Q \cdot A} = C$

وبذلك فإن مواسعة المواسع ذي الصفيحتين المتوازيتين تعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (٣-٢)$$

ويتضح من العلاقة السابقة أن مواسعة المواسع تعتمد على أبعاده الهندسية، وعلى السماحية الكهربائية للوسط الفاصل بين صفيحتيه، وستقتصر دراستنا على المواسع الذي تكون المادة العازلة بين صفيحتيه الهواء أو الفراغ.

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين المسافة بينهما (٨,٨٥) مم، ومساحة كل منهما (٢ × ١٠^{-٤}) م^٢ وصل مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها (٢٠) فولت حتى شحن تمامًا، ثم فصل عن البطارية. ١ احسب كلاً من مواسعة المواسع وشحنته.

٢ إذا قل البعد بين صفيحتي المواسع إلى النصف، فكيف يتغير كل من مواسعته وشحنته و فرق الجهد بين طرفيه.

الحل:

١ ■ مواسعة المواسع:

$$\epsilon_s = \frac{P_{\text{ع}}}{F} = \frac{8,85 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^{-4}}{8,85 \times 10^{-3}} \text{ س}$$

$$\epsilon_s = 2 \times 10^{-13} \text{ فاراد}$$

■ شحنة المواسع:

$$\epsilon_s = \text{س ج} = 2 \times 10^{-13} \times 20 = 4 \times 10^{-12} \text{ كولوم}$$

٢ عندما يقل البعد بين الصفيحتين إلى النصف، والمواسع مفصول عن البطارية:

■ تصبح المواسعة ضعفي ما كانت عليه وفق العلاقة: $\epsilon_s = \frac{P_{\text{ع}}}{F}$ ، أي أن:

$$\epsilon_s = 4 \times 10^{-13} \text{ فاراد}$$

■ تبقى شحنة المواسع ثابتة لأنه غير موصول مع البطارية، أي أن:

$$\epsilon_s = 4 \times 10^{-12} \text{ كولوم}$$

■ يحسب جهد المواسع من العلاقة:

$$\epsilon_s = \frac{Q}{C}$$

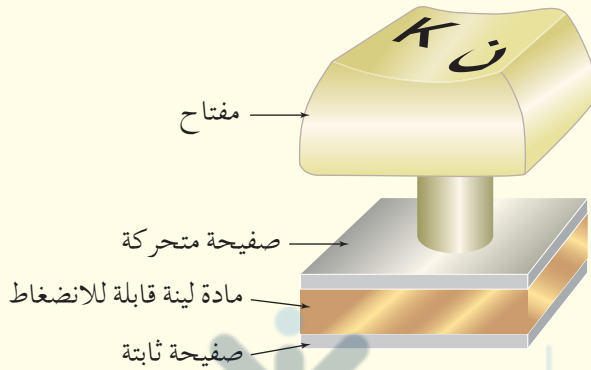
$$\epsilon_s = \frac{4 \times 10^{-12}}{4 \times 10^{-13}} = 10 \text{ فولت}$$

نستنتج أنه إذا زادت المواسعة إلى ضعفي ما كانت عليه مع بقاء الشحنة ثابتة، فإن فرق الجهد يقل إلى النصف.

١ ماذا نعني بقولنا إن مواسعة مواسع تساوي (٣) ميكرو فاراد؟

٢ وصل مواسعان مختلفان مع مصدري فرق جهد متماثلين، جهد كل منهما (ج)، فاكتسب المواسع الأول شحنة (٣)، واكتسب المواسع الثاني شحنة (٣). ما النسبة بين مواسعة المواسعين؟

٣ مواسع ذو صفيحتين متوازيتين يتصل مع بطارية. إذا أصبح البعد بين صفيحتيه ثلاثة أضعاف ما كان عليه مع بقاءه متصلاً بالبطارية، فكيف يتغير كل من: مواسعته، وشحنته، وفرق الجهد والمجال الكهربائي بين طرفيه.



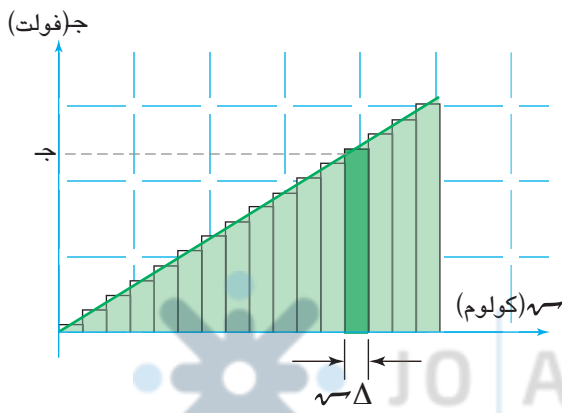
الشكل (٣-٦): سؤال (٤).

٤ تستخدم المواسعات في لوحة مفاتيح الحاسوب، كما يبين الشكل (٣-٦)، وتتكون الطبقة العازلة بين صفيحتي المواسع من مادة لينة قابلة للانضغاط. وضح ماذا يحدث لمواسعة المواسع عند الضغط على المفتاح.

٥ مواسع ذو صفيحتين متوازيتين، وصل مع مصدر فرق جهد (١٥٠) فولت، فكانت الكثافة السطحية للشحنة على صفيحتيه (٣٠) نانو كولوم/سم^٢، احسب البعد بين صفيحتيه.

إن تخزين شحنة في المواسع يعني تخزين طاقة كهربائية فيه، فما مصدر الطاقة التي يخزنها؟ وكيف نحسبها؟

عندما يتصل المواسع مع البطارية فإنهما يشكلان نظاماً معزولاً، تبذل فيه البطارية شغلاً لنقل الشحنات إلى صفيحتي المواسع. وقد درست أن الشحنة على المواسع تزداد خطياً مع جهده، والشكل (٣-٧) يبين ذلك، لاحظ أنه عند إضافة كمية من الشحنة (Δq) للمواسع عند متوسط



الشكل (٣-٧): الطاقة المخزنة في المواسع .

جهده مقداره (ج)، فإن مساحة المستطيل المظلل (جـ Δq) في الشكل تمثل جزءاً من الشغل الكلي الذي بذلته البطارية في شحن المواسع، فإذا حسبنا المساحة الكلية تحت المنحنى نكون قد حسبنا الشغل الكلي الذي بذلته البطارية لشحن المواسع. وهذا الشغل يخزن في المجال الكهربائي بين صفيحتي المواسع بصورة طاقة وضع كهربائية، حيث: الطاقة المخزنة في المواسع = مساحة المثلث

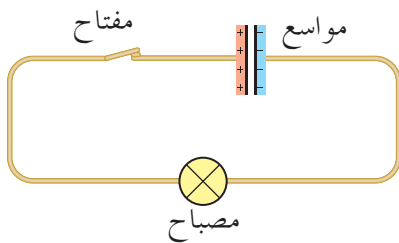
$$ط = \frac{1}{2} q V \quad \text{جـ (٣-٣)}$$

وبما أن $(q = CV)$ ، فإن:

$$ط = \frac{1}{2} C V^2 \quad \text{س جـ (٣-٤)}$$

كما يمكن التوصل إلى أن:

$$ط = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \quad \text{س (٣-٥)}$$



الشكل (٣-٨): تفريغ المواسع.

وتتحول الطاقة المخزنة في المواسع إلى شكل آخر من الطاقة عند وصل طرفي المواسع بجهاز كهربائي مثل مصباح كهربائي، فعند إغلاق المفتاح في الدارة المبينة في الشكل (٣-٨) تتحرك الشحنات من الصفيحة الموجبة إلى الصفيحة

السالبة عبر المصباح، ويمر في الدارة تيار كهربائي يبدأ بقيمة معينة، ثم يتناقص إلى أن يؤول إلى الصفر؛ فيضيء المصباح مدة وجيزة، وتسمى هذه العملية تفريغ المواسع.

مثال (٣-٤)

مواسع ذو صفيحتين متوازيتين مساحة كل من صفيحتيه (٢٥) سم^٢، والبعد بينهما (٨,٨٥) مم، شحن حتى أصبح جهده (١٠٠) فولت:

١ احسب الطاقة المخزنة في المواسع.

٢ إذا أصبح البعد بين الصفيحتين (١٧,٧) مم، مع بقاء المواسع متصلاً مع البطارية نفسها. فاحسب الطاقة المخزنة في المواسع.

الحل:

١ نحسب المواسعة من العلاقة:

$$س = \frac{٢.٤}{ف}$$

$$= \frac{٨,٨٥ \times ١٠^{-١٢} \times ٢٥ \times ١٠^{-١٢}}{٨,٨٥ \times ١٠^{-٣}} \Leftarrow س = ٢,٥ \times ١٠^{-١٢} \text{ فاراد.}$$

لحساب الطاقة نطبق العلاقة:

$$ط = \frac{١}{٢} س ج^٢$$

$$= \frac{١}{٢} \times ٢,٥ \times ١٠^{-١٢} \times (١٠٠)^٢ \Leftarrow ط = ١,٢٥ \times ١٠^{-٨} \text{ جول.}$$

٢ عندما يزداد البعد بين الصفيحتين تقل المواسعة وفق العلاقة: $(س = \frac{٢.٤}{ف})$

ولأن (ف) أصبحت ضعفي ما كانت عليه فإن المواسعة تقل إلى النصف؛ أي أن: $س = ١,٢٥ \times ١٠^{-١٢} \text{ فاراد.}$

وبما أن المواسع يتصل مع البطارية، فإن جهده يبقى ثابتاً ويساوي جهد البطارية.

ولحساب الطاقة:

$$ط = \frac{١}{٢} س ج^٢$$

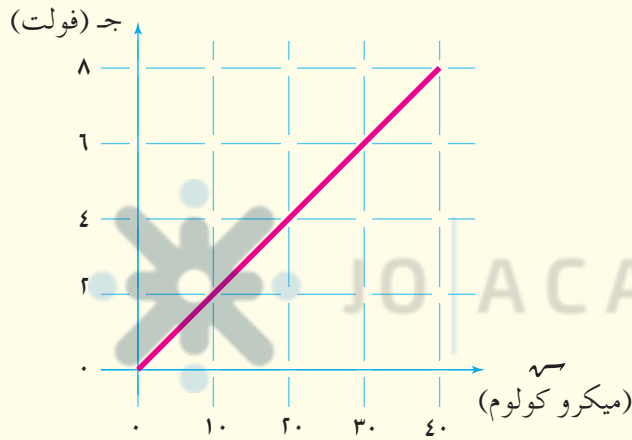
$$= \frac{١}{٢} \times ١,٢٥ \times ١٠^{-١٢} \times (١٠٠)^٢ \Leftarrow ط = ٦,٢٥ \times ١٠^{-٩} \text{ جول.}$$

عندما تقل المواسعة مع بقاء جهد المواسع ثابتاً يحدث تفريغ لجزء من شحنة المواسع إلى البطارية؛ لذلك تقل الطاقة المخزنة فيه.

مراجعة (٣-٢)

١. مواسعان مواسعة الأول (٢) ميكروفاراد وجهدده (٢٠) فولت، والثاني مواسعته (٤) ميكروفاراد وجهدده (١٠) فولت. أي المواسعين يخزن طاقة أكبر؟

٢. مواسع تُشحن ثم فصل عن البطارية، ثم أصبح البعد بين صفيحتيه ضعفي ما كان عليه، فماذا يحدث للطاقة المخزنة فيه؟ فسر إجابتك.



٣. مواسع كهربائي ذو صفيحتين متوازيتين، وصل مع مصدر فرق جهد (٨) فولت، وبيّن الشكل (٩-٣) العلاقة بين جهد المواسع وشحنته في أثناء عملية الشحن. احسب:

الشكل (٩-٣): سؤال (٣).

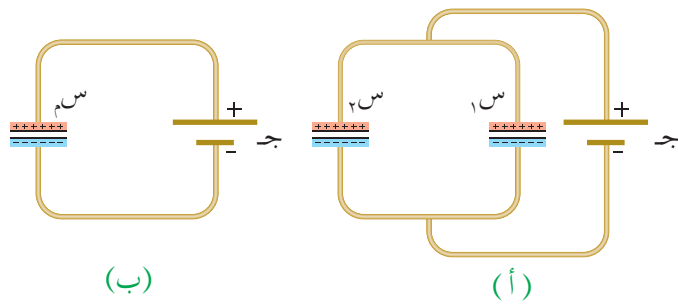
أ. مواسعة المواسع.

ب. الطاقة المخزنة في المواسع عندما يكون فرق الجهد بين صفيحتيه (٢) فولت.

ج. الطاقة المخزنة في المواسع عند رفع جهدده إلى (١٢) فولت.

تصنع المواسعات بحيث تكون لها مواسعة محددة، وتعمل على جهد معين، وقد يلزم في تطبيق عملي ما قيمة محددة للمواسعة ليست متوافرة؛ عندئذ يمكن الحصول على هذه القيمة بتوصيل مجموعة من المواسعات بطرائق عدة، منها التوصيل على التوازي، والتوصيل على التوالي، أو الجمع بينهما.

■ (١-٣-٣) التوصيل على التوازي (Parallel Combination)



(ب)

(أ)

الشكل (١٠-٣): التوصيل على التوازي.

يسمى توصيل المواسعات بالطريقة المبينة في الشكل (١٠-٣/أ) توصيلاً على التوازي، والتوصيل بهذه الطريقة يجعل كل مواسع موصول بصفيحتيه مباشرة مع البطارية.

وبما أن كلاً من المواسعين يتصل بصورة مباشرة مع البطارية؛ فإن كل مواسع يشحن مباشرة منها، إلى أن يتساوى جهد كل مواسع مع جهد البطارية، وعندها يكون المواسعان قد اكتسبا شحنتين (q_1) ، (q_2) ؛ لذا في التوصيل على التوازي تكون المواسعات متساوية في الجهد بينما الشحنة الكلية تكون مساوية مجموع شحنة المواسعات.

فإذا أردنا استبدال مواسع واحد بمواسعين له تأثيرهما معاً، لاحظ الشكل (١٠-٣/ب) فإن المواسع المكافئ (C_m) يكون جهده مساوياً لجهد البطارية، وشحنته تساوي مجموع شحنتي المواسعين؛ أي أن:

$$C_m = \frac{q_{\text{الكلية}}}{V}$$

$$C_m = C_1 + C_2 \quad \text{وحيث إن: } C_{\text{الكلية}} = C_1 + C_2$$

$$C_m = C_1 + C_2 \quad \text{فإن: } C_m = C_1 + C_2$$

$$\text{وباختصار (ج) تصبح العلاقة: } C_m = C_1 + C_2$$

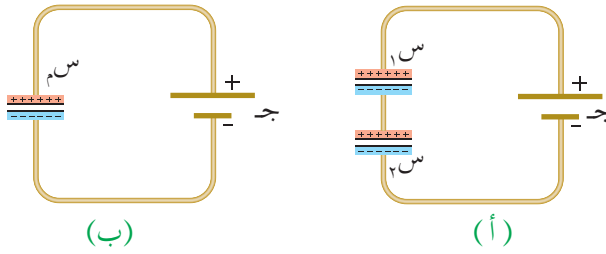
وهذا يعني أنه عند وصل مجموعة من المواسعات على التوازي فإن المواسعة المكافئة لها تساوي

المجموع الجبري لتلك المواسعات؛ أي أن:

$$س_م = س_١ + س_٢ + س_٣ + \dots + س_n \quad (٦-٣)$$

■ (٢-٣-٣) التوصيل على التوالي (Series Combination)

يسمى توصيل المواسعات بالطريقة المبينة في الشكل (٣-١١ أ) توصيلاً على التوالي. والتوصيل بهذه الطريقة يجعل صفيحة المواسع الأول المتصلة بالقطب الموجب للبطارية تكتسب شحنة موجبة



الشكل (٣-١١): التوصيل على التوالي.

(+ φ)، فتشحن الصفيحة المقابلة لها بالحث بشحنة سالبة (- φ)؛ أما المواسع الثاني فتكتسب صفيحته المتصلة بالقطب السالب للبطارية شحنة سالبة (- φ) وتشحن الصفيحة المقابلة لها بالحث بشحنة موجبة (+ φ).

وفي حالة التوصيل على التوالي تكون المواسعات متساوية في الشحنة، بينما الجهد الكلي (جهد البطارية) يكون مساوياً لمجموع جهد المواسعات.

فإذا أردنا استبدال مواسع واحد بمواسعين له تأثيرهما معاً، لاحظ الشكل (٣-١١ ب) فإن المواسع المكافئ (س_م) تكون شحنته مساوية الشحنة الكلية المستمدة من البطارية والتي تساوي شحنة أي من المواسعين، وجهده يساوي مجموع جهدي المواسعين؛ أي أن:

$$س_م = \frac{\varphi}{ج}$$

$$وحيث إن: ج = ج_١ + ج_٢$$

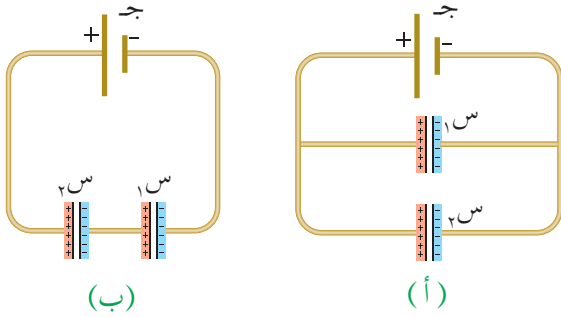
$$فإن: \frac{\varphi}{س_م} + \frac{\varphi}{س_١} = \frac{\varphi}{س_٢}$$

$$وباختصار (φ)، تصبح العلاقة: $\frac{1}{س_٢} + \frac{1}{س_١} = \frac{1}{س_م}$$$

وهذا يعني أنه عند وصل مجموعة من المواسعات على التوالي تكون المواسعة المكافئة لها:

$$س_م = \frac{1}{\frac{1}{س_١} + \frac{1}{س_٢} + \frac{1}{س_٣} + \dots + \frac{1}{س_n}} \quad (٧-٣)$$

مواضعان (س_١ = ٣، س_٢ = ٦) ميكروفاراد وصلا بطريقتين مع مصدر فرق جهد (٣٠) فولت؛ الطريقة الأولى على التوازي كما في الشكل (٣-١٢/أ)، والطريقة الثانية على التوالي كما في الشكل (٣-١٢/ب). احسب لكل طريقة:



الشكل (٣-١٢): مثال (٣-٥).
(أ) (ب)

١ المواصلة المكافئة.

٢ الشحنة وفرق الجهد لكل مواضع.

الحل:

■ التوصيل على التوازي:

١ المواصلة المكافئة: س_م = س_١ + س_٢

$$س_م = ٣ + ٦ = ٩ \text{ ميكروفاراد.}$$

لاحظ أن المواضع المكافئ موصلة أكبر من مواصلة كل من (س_١) و (س_٢).

٢ عند توصيل المواضع على التوازي، فإن (ج_١ = ج_٢ = ج = ٣٠ فولت)

$$\text{شحنة المواضع الأول: } ق_١ = س_١ \cdot ج = ٣ \times ١٠^{-١٠} \times ٣٠ = ٩٠ \times ١٠^{-١٠} \text{ كولوم}$$

$$\text{شحنة المواضع الثاني: } ق_٢ = س_٢ \cdot ج = ٦ \times ١٠^{-١٠} \times ٣٠ = ١٨٠ \times ١٠^{-١٠} \text{ كولوم.}$$

■ التوصيل على التوالي:

١ المواصلة المكافئة: $\frac{1}{س_م} = \frac{1}{س_١} + \frac{1}{س_٢}$

$$\frac{1}{س_م} = \frac{1}{٣} + \frac{1}{٦} = \frac{1}{٢} \text{، } س_م = ٢ \text{ ميكروفاراد.}$$

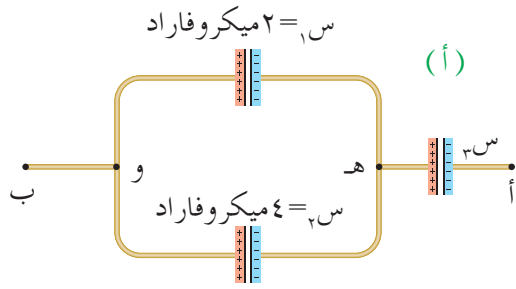
لاحظ أن مواصلة المواضع المكافئ أقل من مواصلة كل من (س_١) و (س_٢).

٢ عند توصيل المواضع على التوالي، فإن (ق_١ = ق_٢ = ق_{الكلية})

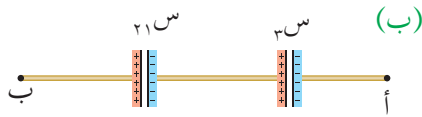
$$\text{لحساب الشحنة الكلية: } ق_{\text{الكلية}} = س_م \cdot ج = ٢ \times ١٠^{-١٠} \times ٣٠ = ٦٠ \times ١٠^{-١٠} \text{ كولوم}$$

$$\text{جهد المواضع الأول: } ج_١ = \frac{ق_١}{س_١} = \frac{٦٠ \times ١٠^{-١٠}}{٣} = ٢٠ \text{ فولت}$$

$$\text{جهد المواضع الثاني: } ج_٢ = \frac{ق_٢}{س_٢} = \frac{٦٠ \times ١٠^{-١٠}}{٦} = ١٠ \text{ فولت.}$$



يمثل الشكل (٣-١٣/أ) جزءاً من دائرة كهربائية يحتوي على ثلاثة مواسعات، إذا علمت أن جهد $8 =$ فولت، وأن جهد $20 =$ فولت. فاحسب:



الشكل (٣-١٣): مثال (٦-٣).

١ الشحنة على كل من المواسعين (س_١، س_٢).

٢ مواسعة المواسع (س_٣).

الحل:

١ فرق الجهد بين النقطتين (هـ، و) يساوي فرق جهد المواسع الأول ويساوي فرق جهد

المواسع الثاني (ج_١ = ج_٢ = ٨ فولت)

لحساب الشحنة على كل مواسع: س_١ = س_٢ = ٨ × ١٠^{-٦} × ٢ = ١٦ × ١٠^{-٦} كولوم

س_٢ = س_٣ = ٨ × ١٠^{-٦} × ٤ = ٣٢ × ١٠^{-٦} كولوم

٢ المواسعان (س_١، س_٢) يتصلان على التوازي، ويمكن استبدال مواسع مكافئ بهما مواسعته (س_٣).

وبما أن المواسع (س_٣) يتصل مع (س_١) على التوالي كما يبين الشكل (٣-١٣/ب) فإن:

$$س_٣ = س_١ + س_٢ = ١٦ \times ١٠^{-٦} + ٣٢ \times ١٠^{-٦}$$

$$س_٣ = ١٦ \times ١٠^{-٦} + ٣٢ \times ١٠^{-٦} = ٤٨ \times ١٠^{-٦} \text{ كولوم}$$

$$ج_٣ = ج_١ + ج_٢ = ٨ + ٨$$

$$ج_٣ = ٨ + ٨ = ١٦ \text{ فولت}$$

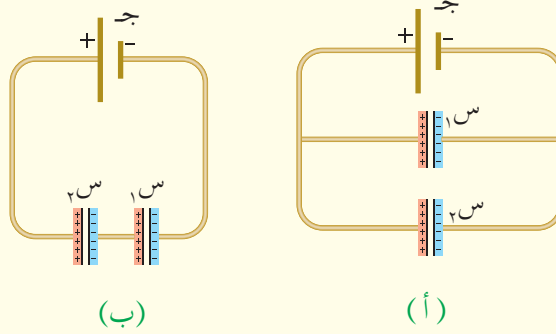
ولحساب المواسعة (س_٣) نطبق العلاقة:

$$س_٣ = \frac{ج_٣}{س_٣}$$

$$= \frac{٤٨ \times ١٠^{-٦}}{١٦}$$

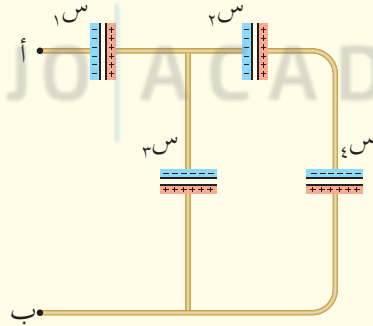
$$= ٤ \times ١٠^{-٦} \text{ فاراد}$$

١٢ معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل (٣-١٤)، في أي من الحالتين (أ، ب) يكون مقدار الطاقة المخزنة في المواسعة المكافئة أكبر؟ فسر إجابتك.



الشكل (٣-١٤): سؤال (١).

١٣ احسب المواسعة المكافئة لمجموعة المواسعات المبينة في الشكل (٣-١٥) علماً بأنها متساوية في المواسعة، ومواسعة كل منها (٢) ميكروفاراد.



الشكل (٣-١٥): سؤال (٢).



الشكل (٣-١٦): تصميم أحد
المواسعات.

تستخدم المواسعات في الكثير من التطبيقات العملية، وتصمم بأشكال مختلفة، فمثلاً يبين الشكل (٣-١٦) مواسعاً يتكون من شريطين موصلين ملفوفين على شكل أسطوانة يفصل بينهما شريط من مادة عازلة.

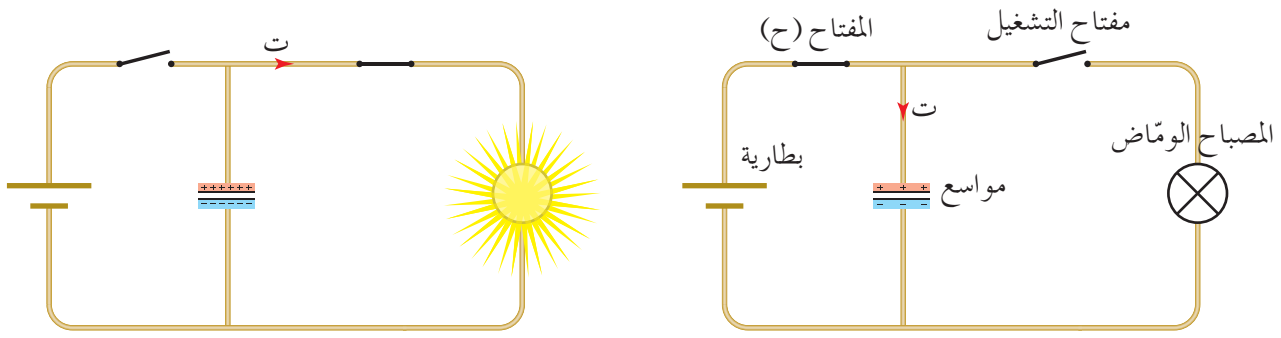
إن تصميم المواسع بهذه الطريقة يمكننا من الحصول على مواسع صغير الحجم مساحة صفيحتيه كبيرة، وتفصل بينهما مسافة صغيرة؛ ما يعني زيادة قدرة المواسع على تخزين الشحنة. إلا أن المواسع له حد أعلى في تخزين الشحنة، فإذا زادت على هذا الحد يزداد الجهد، ويحدث تفريغ كهربائي عبر المادة العازلة الفاصلة بين الصفيحتين؛ ما يؤدي إلى تلف المواسع، لذلك يكتب على كل مواسع الحد الأعلى للجهد المسموح توصيل المواسع به (maximum working voltage)،



الشكل (٣-١٧): أكبر فرق جهد يمكن
توصيله بين طرفي أحد المواسعات.

تأمل الشكل (٣-١٧) تجد أن المواسع كتب عليه (٢٥) فولت، وهذا يعني أنه يوجد حدٌ أقصى للشحنة أو للطاقة التي يمكن تخزينها في المواسع.

ومن التطبيقات العملية للمواسعات دائرة المصباح الومّاض في آلة التصوير الفوتوغرافي (Flash Camera)، ويبين الشكل (٣-١٨) مخططاً بسيطاً يوضح مبدأ عمل المصباح الومّاض، فعند توصيل البطارية مع المواسع بإغلاق المفتاح (ح) تبدأ عملية الشحن، وعند الضغط على مفتاح التشغيل تُغلق دائرة (المواسع - المصباح) ويفتح المفتاح (ح)، فيحدث تفريغ لشحنة المواسع في المصباح، أي تتحرر الطاقة المخزنة في المواسع، وتتحول إلى طاقة ضوئية في المصباح في فترة زمنية وجيزة.



الشكل (٣-١٨): استخدام المواسع في دائرة المصباح الوماض في آلة التصوير الفوتوغرافي.

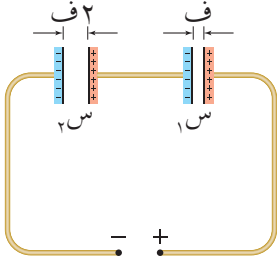
مراجعة (٣-٤)

- ١ فسر ما يأتي: يوجد حد أقصى للطاقة التي يمكن تخزينها في المواسع.
- ٢ يحتاج مهندس إلى مواسع مواسعته (٢٠) ميكروفاراد، يعمل على فرق جهد (٦) كيلوفولت. ولديه مجموعة من المواسعات المتماثلة كتب على كل منها (٢٠٠ ميكروفاراد، ٦٠٠ فولت)، لكي يحصل على المواسعة المطلوبة وصل عددًا من هذه المواسعات معًا، فهل وصلها على التوالي أم على التوازي؟ وما عدد المواسعات التي استخدمها؟ فسر إجابتك.

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ مواسع ذو صفحتين متوازيتين مشحون، والطاقة المخزنة فيه (ط)، إذا زاد فرق الجهد بين صفيحتيه إلى ثلاثة أضعاف ما كان عليه، فإن الطاقة المخزنة فيه تصبح:

- أ $\frac{1}{3}$ ط ب 3 ط ج 9 ط د $\frac{1}{9}$ ط



الشكل (٣-١٩): سؤال (١) فقرة (٢).

٢ مواسعان متساويان في المساحة، البعد بين صفيحتي المواسع الثاني ضعفي البعد بين صفيحتي المواسع الأول، وصلا مع بطارية على التوالي. انظر الشكل (٣-١٩)، إذا كان المجال الكهربائي بين صفيحتي المواسع الأول (م) فإن المجال بين صفيحتي المواسع الثاني:

- أ $\frac{1}{2}$ م ب $\frac{2}{1}$ م ج 2 م د 4 م

شحن مواسع بواسطة بطارية، ثم فصل عنها فكانت الطاقة المخزنة فيه (ط)، إذا زاد البعد بين صفيحتيه إلى ضعفي ما كان عليه، ومستعيناً بهذه المعلومات أجب عن الفقرتين (٣، ٤).

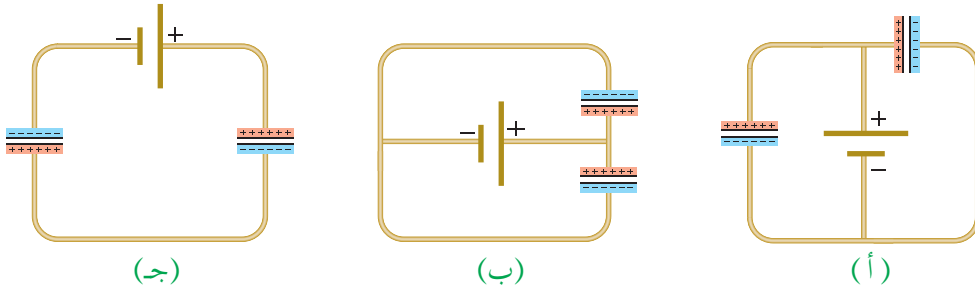
٣ إن الكمية الفيزيائية التي تبقى ثابتة للمواسع هي:

- أ الجهد الكهربائي ب المساحة ج الشحنة د الطاقة

٤ إن الطاقة المخزنة في المواسع تصبح:

- أ $\frac{1}{2}$ ط ب 2 ط ج 4 ط د 8 ط

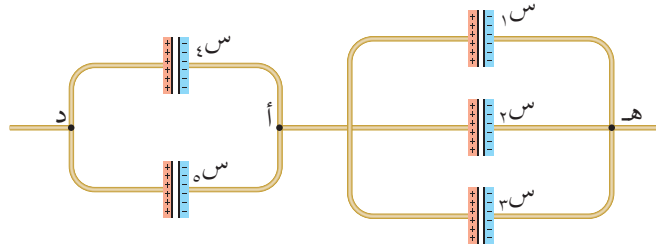
٢ يبين الشكل (٣-٢٠) ثلاث حالات لمواسعين موصولين مع بطارية، حدد طريقة توصيل المواسعين في كل حالة مع بيان السبب.



الشكل (٣-٢٠): سؤال (٢).

٣ يبين الشكل (٣-٢١) مجموعة من المواسعات بين النقطتين (هـ، د)، إذا علمت أن المواسعات متساوية في المواسعة، ومواسعة كل منها (٣) ميكروفاراد و ($C_3 = 6$) فولت، احسب:
 أ الشحنة الكلية لمجموعة المواسعات.

ب جهد .

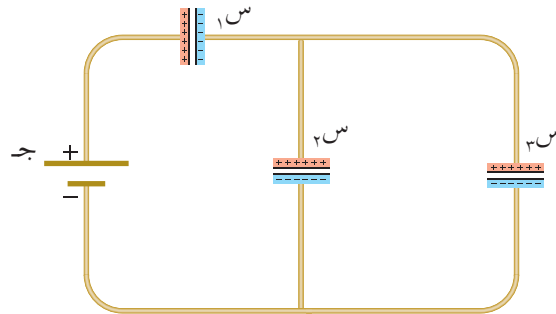


الشكل (٣-٢١): سؤال (٣).

٤ مواسعان ($C_1 = 25$ ، $C_2 = 5$) ميكروفاراد وصلا على التوازي مع مصدر جهد (١٠٠) فولت، فكانت الطاقة المختزنة في المجموعة (ط). إذا أردنا أن يختزن المواسعان الطاقة نفسها عند توصيلهما على التوالي، فما فرق جهد المصدر الذي يحقق ذلك؟

٥ مواسعان يتصلان على التوالي مع مصدر فرق جهد. مساحة صفيحتي المواسع الثاني ضعفا مساحة صفيحتي المواسع الأول، والبعد بين صفيحتي كل من المواسعين متساو. إذا كانت الطاقة المختزنة في المواسع الأول ($U_1 = 6 \times 10^{-3}$) جول فاحسب مقدار الطاقة المختزنة في المواسع الثاني.

٦ في الشكل (٣-٢٢) إذا كانت مواسعة المواسعات الثلاثة ($C_1 = 3$ ، $C_2 = 5$ ، $C_3 = 5$) فولت.



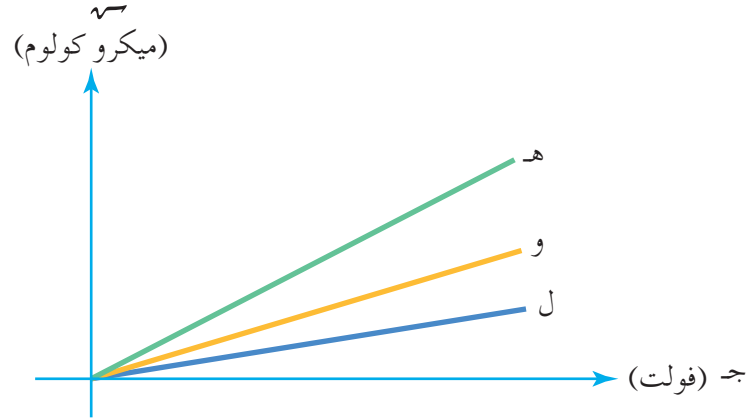
الشكل (٣-٢٢): سؤال (٦).

أ جد المواسعة المكافئة للمجموعة بدلالة (C).

ب رتب هذه المواسعات وفقاً لشحنتها تنازلياً.

٧ بين الجدول الآتي الأبعاد الهندسية لثلاثة مواسعات، والشكل (٣-٢٣) يمثل منحنى (الجهـد-الشحنة) لهذه المواسعات. حدد لكل مواسع المنحنى الذي يناسبه.

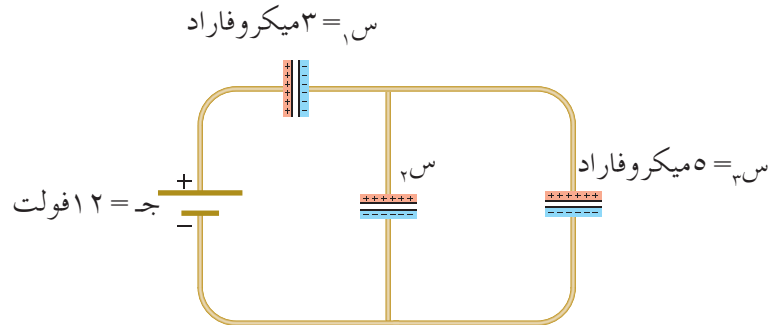
المواسع	مساحة الصفيحة الواحدة	البعد بين الصفيحتين	رمز المنحنى
١	٢	ف	
٢	٢٢	ف	
٣	٢	٢ف	



الشكل (٣-٢٣): سؤال (٧).

٨ مواسع شحنته (ق)، ومساحة كل من صفيحتيه (٢) والبعد بينهما (ف). أثبت أن فرق الجهد بين الصفيحتين (جـ) يعطى بالعلاقة: $\frac{ق}{٢٤} = جـ$

٩ في الشكل (٣-٢٤) إذا كانت الطاقة المخزنة في المواسعات الثلاثة (٤٤ × ١٠^{-٦}) جول، وفرق الجهد بين طرفي البطارية (١٢) فولت فاحسب:

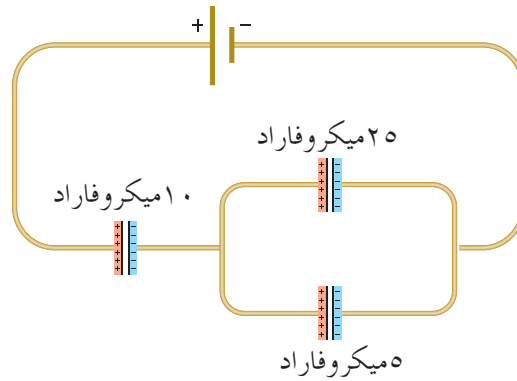


الشكل (٣-٢٤): سؤال (٩).

أ الطاقة المخزنة في المواسع الأول.

ب مواسعة المواسع الثاني.

١٠ معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل (٣-٢٥)، وإذا كانت الشحنة المخزنة في المواسع (٥ ميكروفاراد) تساوي (٣٠) ميكروكولوم. أجب عما يأتي:



الشكل (٣-٢٥): سؤال (١٠).

أ) املأ الفراغات في الجدول بما يناسبه.

س (ميكروفاراد)	ϵ (ميكروكولوم)	جـ (فولت)	ط (ميكروجول)
٥	٣٠		
١٠			
٢٥			

ب) مستعيناً بالبيانات الواردة في الجدول السابق بعد إكماله. احسب:

- فرق جهد المصدر.
- المواسعة المكافئة لمجموعة المواسعات.
- الشحنة الكلية في الدارة.
- الطاقة المخزنة في مجموعة المواسعات.

التيار الكهربائي ودارات التيار المباشر

Electric Current and Direct Current Circuits

يُعد التيار الكهربائي من الموضوعات المهمة التي تدرس في أيامنا هذه، لما له من تطبيقات حياتية واسعة. وقد بدأ علم الكهرباء المتحركة (التيار الكهربائي) يشهد تقدماً في أواخر القرن التاسع عشر، الأمر الذي أدى إلى تطور كبير في مجال صناعة مصادر للطاقة الكهربائية (البطاريات والمولدات...) تزودنا بالتيار الكهربائي، وبدأ استخدامهما في مجالات كثيرة منها المواصلات والتدفئة والإضاءة والاتصالات والصناعة. فما المقصود بالتيار الكهربائي والقوة الدافعة الكهربائية؟ وما القوانين التي تحكم الدارات الكهربائية؟

هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

الفصل الرابع

في هذا الفصل

(١-٤)

التيار الكهربائي.

(٢-٤)

المقاومة الكهربائية وقانون أوم.

(٣-٤)

توصيل المقاومات الكهربائية.

(٤-٤)

القوة الدافعة الكهربائية.

(٥-٤)

القدرة الكهربائية.

(٦-٤)

معادلة الدارة الكهربائية البسيطة.

(٧-٤)

الدارات الكهربائية وقاعدتا كيرشوف.

تضاء مدينة عمان بالمصابيح ليلاً، وتوصل المصابيح في الدارات الكهربائية على التوازي مع مصدر لفرق الجهد الكهربائي، فيمر التيار الكهربائي عبر هذه المصابيح ناقلًا الطاقة الكهربائية لها، لتحويلها إلى طاقة ضوئية وحرارية.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- * توضح المقصود بالمفاهيم: التيار الكهربائي، السرعة الانسيابية، القوة الدافعة الكهربائية، القدرة الكهربائية، وتذكر وحدات قياسها، وتعبر عن العلاقات بينها رياضياً.
- * تميز بين المقاومات الأومية وغير الأومية، وتطبق قانون أوم لحل المسائل المتعلقة بالمقاومات.
- * تستنتج العوامل التي تعتمد عليها المقاومة الكهربائية لموصل.
- * تميز بين مفهومي المقاومة الكهربائية والمقاومية الكهربائية.
- * تربط بين مقاومة الموصل والعوامل التي تعتمد عليها بعلاقة رياضية.
- * تتوصل إلى معادلة الدارة الكهربائية البسيطة بتتبع تغيرات الجهد فيها.
- * تحلل رسوماً بيانية متعلقة بتغيرات الجهد خلال دارة كهربائية بسيطة.
- * توظف معرفتك بقانوني حفظ الشحنة والطاقة للتوصل إلى قاعدتي كيرشوف.
- * تتحقق عملياً من قاعدتي كيرشوف.
- * تطبق القوانين والعلاقات الخاصة بالدارات الكهربائية في حل مسائل حسابية (عروة، عروتان).



تعمل الأجهزة الكهربائية عند مرور تيار كهربائي فيها، ينشأ عن حركة الشحنات الكهربائية باتجاه واحد عبر وسط يسمح للشحنات الكهربائية بالانتقال عبره، وسواء كانت الشحنات المتحركة موجبة أو سالبة فإنها تسمى ناقلات الشحنة. وفي هذا الدرس سنتناول الموصلات التي تكون ناقلات الشحنة فيها هي الإلكترونات الحرة، مثل النحاس والفضة والفلزات جميعها. إذ تحتوي هذه الموصلات على إلكترونات حرة في حالة حركة عشوائية بسرعات مختلفة مقداراً واتجاهاً، إلا أن معدل هذه السرعات صفر؛ لأن متوسط عدد الإلكترونات الحرة التي تعبر أي مقطع من الموصل باتجاه ما يساوي متوسط عدد الإلكترونات التي تعبره بالاتجاه المعاكس، وهكذا لا ينتج تيار كهربائي عن الحركة العشوائية.

أما إذا وصل طرفا الموصل مع بطارية فسوف ينشأ بين طرفيه فرق في الجهد الكهربائي يؤدي إلى توليد مجال كهربائي داخل الموصل. وكما درست سابقاً فإن أي شحنة تتأثر بقوة كهربائية إذا وقعت في مجال كهربائي، لذا ستتأثر الإلكترونات الحرة في الموصل بقوة كهربائية تؤدي إلى اندفاعها في اتجاه واحد. وحركة الشحنات الكهربائية في اتجاه واحد تُشكل تياراً كهربائياً. ويُعرف **التيار الكهربائي** عبر أي موصل أنه كمية الشحنة التي تعبر مقطع الموصل في وحدة الزمن.

ويُعبّر رياضياً عن متوسط التيار الكهربائي (Average Electric Current) بالعلاقة الرياضية الآتية:

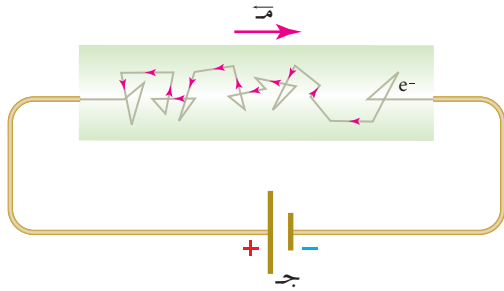
$$\bar{I} = \frac{q_{\Delta}}{\Delta t} \quad (١-٤)$$

حيث ($\bar{I}$): متوسط التيار الكهربائي، و(q_{Δ}) كمية الشحنة التي تعبر مقطع الموصل في الفترة الزمنية Δt .

ويقاس التيار الكهربائي في النظام العالمي للوحدات بوحدة (كولوم/ثانية) وتُسمى أمبير، ويعرف **الأمبير** بأنه التيار الكهربائي المار في موصل عندما يعبر مقطع هذا الموصل شحنة مقدارها (١) كولوم في ثانية واحدة.

وقد اصطلح أن يكون اتجاه التيار الكهربائي في الموصل باتجاه حركة الشحنات الموجبة، وبالعكس اتجاه حركة الإلكترونات.

في أثناء حركتها داخل الموصل تصطدم الإلكترونات الحرة مع بعضها بعضاً ومع ذرات الموصل فتفقد جزءاً من طاقتها الحركية وتقل سرعتها، إلا أن وجود المجال الكهربائي يسرع الإلكترونات من جديد باتجاه القوة الكهربائية المؤثرة فيها، فتكمل الإلكترونات حركتها بعكس اتجاه المجال الكهربائي. ونتيجة لهذه التصادمات فإن الإلكترونات

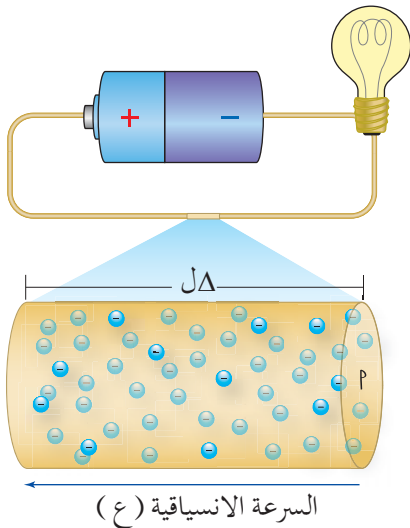


الشكل (١-٤): نموذج للمسار المتعرج لحركة أحد الإلكترونات.

تتحرك بسرعات متفاوتة وتسلك مسارات متعرجة، ويُبين الشكل (١-٤) نموذجاً للمسار المتعرج لحركة أحد الإلكترونات. ويسمى متوسط سرعة الإلكترونات الحرة داخل الموصل عندما تنساق بعكس اتجاه المجال الكهربائي المؤثر فيها **السرعة الانسيابية (Drift Velocity)**.

ولتوضيح العلاقة بين التيار الكهربائي الذي يمر في الموصل والسرعة الانسيابية للإلكترونات الحرة في هذا الموصل عند ثبات درجة الحرارة، سندرس حركة الإلكترونات في مقطع موصل طوله (ΔL) ومساحته (P) ، فيكون حجمه $(\Delta V = P \Delta L)$ كما في الشكل (٢-٤).

يرمز لعدد الإلكترونات الحرة في وحدة الحجم من الموصل بالرمز (n) وهو ثابت للمادة الواحدة عند ثبات درجة الحرارة، وبذلك فإن عدد الإلكترونات الحرة الكلي الذي يعبر هذا الحجم من الموصل (n) ؛ حيث $(n \Delta V = n P \Delta L)$ ، أي أن: $n = \frac{n P \Delta L}{\Delta L}$.



فتكون كمية الشحنة التي تعبر هذا الحجم من الموصل في فترة زمنية (Δt) : $Q = n e P \Delta L \Delta t$

وبتعويض (n) ، فإن كمية الشحنة تصبح: $Q = n e P \Delta L \Delta t$ وبقسمة طرفي العلاقة السابقة على الفترة الزمنية (Δt) نجد أن:

$$\frac{Q}{\Delta t} = I = n e P \Delta L$$

حيث $(\frac{Q}{\Delta t})$: السرعة الانسيابية للإلكترونات $(ع)$ ؛ فإن

التيار الكهربائي يُعطى بالعلاقة الرياضية:

الشكل (٢-٤): مقطع موصل يمر فيه تيار كهربائي.

$$I = n e P \Delta L \quad \text{..... (٢-٤)}$$

وبما أن عدد الإلكترونات الحرة في وحدة الحجم (ن) في الموصلات الفلزية كبير جداً؛ فإن السرعة الانسيابية للإلكترونات الحرة في الموصلات الفلزية تكون صغيرة لا تتعدى بضعة ملي مترات في الثانية؛ بسبب العدد الهائل من التصادمات بين الإلكترونات بعضها مع بعض ومع ذرات العنصر الناقل لها. حيث تفقد الإلكترونات جزءاً من طاقتها الحركية بفعل هذه التصادمات فتنتقل هذه الطاقة إلى ذرات الفلز ما يؤدي إلى زيادة اتساع اهتزازات ذرات الفلز وارتفاع درجة حرارة الموصل.

مثال (١-٤)

يمر تيار كهربائي مقداره (٤,٨) أمبير في موصل مساحة مقطعه (٠,٣) مم^٢، إذا علمت أن عدد الإلكترونات الحرة في وحدة الحجم من الموصل تساوي (١٠ × ٢٨١٠) إلكترون/م^٣ فاحسب:
١ السرعة الانسيابية للإلكترونات الحرة في هذا الموصل.

٢ عدد الإلكترونات التي تعبر مقطع الموصل في زمن مقداره (١٠) ثوان.

الحل:

$$١ \text{ ت } = \frac{Q}{t} = \frac{N \cdot e}{t}$$

$$= \frac{٤,٨}{\frac{١٠ \times ٢٨١٠ \times ٠,٣ \times ١٠^{-٦}}{١٠^{-٩}}}$$

$$ع = ١٠ \times ١٠^{-٣} \text{ م/ث} = ١ \text{ مم/ث}$$

$$٢ \text{ ت } = \frac{v \Delta}{z \Delta}$$

$$٤,٨ = \frac{v \Delta}{١٠} \Leftarrow v \Delta = ٤٨ \text{ كولوم}$$

$$v \Delta = N \cdot e$$

$$N = \frac{٤٨}{\frac{١٠ \times ٢٨١٠ \times ٠,٣ \times ١٠^{-٦}}{١٠^{-٩}}} = \frac{٤٨}{١٠^{-٩} \times ١٠ \times ٢٨١٠} \text{ إلكترون}$$

١ وضح المقصود بكل من: التيار الكهربائي، والأمبير، والسرعة الانسيابية.

٢ ماذا نعني بقولنا إن التيار الكهربائي الذي يمر في موصل يساوي (٦) أمبير؟

٣ فسر: السرعة الانسيابية للإلكترونات الحرة في الفلزات صغيرة لا تتعدى بضعة ملي مترات في الثانية الواحدة.

٤ وضح أثر التصادمات التي تحدث داخل الموصل في كل مما يأتي عند مرور تيار كهربائي فيه:

أ حركة الإلكترونات.

ب ذرات الموصل.

ج درجة حرارة الموصل.



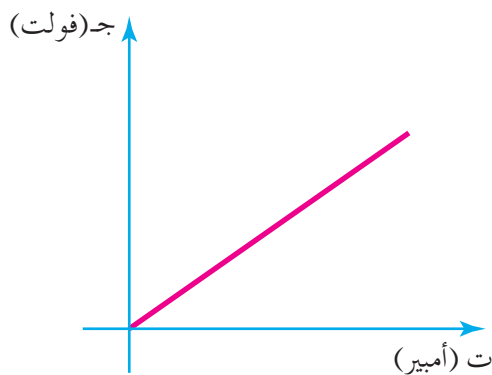
يختلف التيار الكهربائي الذي يمر في موصل تبعًا لاختلاف فرق الجهد بين طرفيه، إلا أن فرق الجهد ليس العامل الوحيد الذي يحدد قيمة التيار الكهربائي في الموصل. حيث تختلف المواد الموصلة في قابليتها لمرور التيار الكهربائي، فالإلكترونات في أثناء حركتها داخل الموصل تواجه تصادمات عدة مع بعضها بعضًا ومع ذرات الموصل؛ ما يعيق حركتها، ويُطلق على إعاقة حركة الإلكترونات الحرة في الموصل عند مرور تيار كهربائي فيه **المقاومة الكهربائية (Electric Resistance)**.

ويمكن حساب المقاومة الكهربائية لموصل (م) بإيجاد نسبة فرق الجهد بين طرفيه (Δ ج) إلى التيار الكهربائي الذي يمر فيه (Δ ت)، وفق العلاقة الآتية:

$$م = \frac{\Delta ج}{\Delta ت} \quad (٣-٤)$$

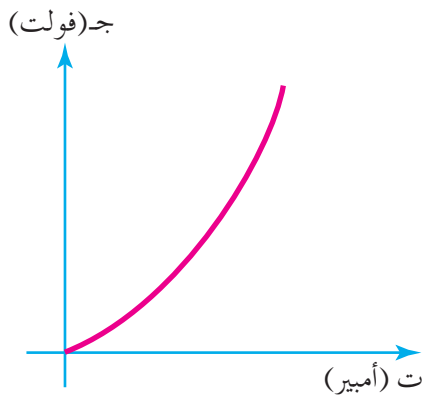
نجد من العلاقة (٣-٤) أن المقاومة تقاس بوحدة فولت/أمبير، ووفق النظام العالمي للوحدات تسمى هذه الوحدة أوم، ويُرمز لها بالرمز اللاتيني (Ω). ويُعرف **الأوم** بأنه مقاومة موصل يمر فيه تيار مقداره (١) أمبير، عندما يكون فرق الجهد بين طرفيه (١) فولت.

عند دراسة العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهربائي لمقاومات فلزية مختلفة، وجد العالم أوم تجريبيًا أن نسبة فرق الجهد بين طرفي كل مقاومة إلى التيار الكهربائي المار فيها تبقى ثابتة مع ثبات درجة حرارتها، وصاغ هذه النتيجة بقانون عُرف **بقانون أوم (Ohm's Law)** الذي ينص على



الشكل (٣-٤): العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهربائي في المقاومات الأومية.

«أن التيار الكهربائي المار في موصل فلزي يتناسب طرديًا مع فرق الجهد بين طرفيه عند ثبات درجة حرارته»، وتُسمى مقاومة الموصلات الفلزية التي ينطبق عليها قانون أوم **مقاومات أومية**، والشكل (٣-٤) يوضح العلاقة الخطية بين فرق الجهد والتيار الكهربائي في هذه المقاومات. لاحظ أن ميل المنحنى في الشكل ثابت، حيث: $الميل = \frac{\Delta ج}{\Delta ت} = م$ ، وعليه تكون المقاومة ثابتة.



الشكل (٤-٤): العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهربائي في المقاومات اللاأومية.

توجد مقاومات أخرى تكون نسبة فرق الجهد بين طرفيها إلى التيار الكهربائي المار فيها غير ثابتة، إذ يتغير التيار الكهربائي على نحو غير خطي بتغير فرق الجهد، وتُسمى هذه المقاومات مقاومات لا أومية، والشكل (٤-٤) يوضح أحد الأمثلة على العلاقة غير الخطية بين فرق الجهد والتيار الكهربائي لإحدى هذه المقاومات، إذ يكون الميل غير ثابت أي أن المقاومة متغيرة مثل مقاومة أشباه الموصلات. وستقتصر دراستنا على المقاومات الأومية.

وتستخدم المقاومات بشكل كبير في الأجهزة والدارات الكهربائية للتحكم في قيمة التيار



الشكل (٤-٥) المقاومات الكهربائية الكربونية.

الكهربائي المار فيها، ولحماية بعض الأجهزة من التلف، وأكثرها استخدامًا المقاومات الكهربائية الكربونية التي يبينها الشكل (٤-٥)، وتتميز هذه المقاومات بألوان معينة وترتيب معين يمكن من خلالها معرفة مقدار كل مقاومة؛ ليتم اختيار المناسب منها عند الاستخدام.

ومن المقاومات ما هو ثابت في المقدار ويرمز له في الدارة الكهربائية بالرمز $(\text{---}\text{---})$ ، ومنها ما يمكن تغيير مقداره في الدارة الكهربائية (ريوستات) ويرمز له بالرمز $(\text{---}\text{---})$.

ومن المقاومات المستخدمة في الدارات الكهربائية؛ المقاومات الفلزية، وتصنع من أسلاك تختلف في الطول ومساحة المقطع، ونوع المادة، وقد درست أن طول الموصل (ل) يؤثر في مقاومته الكهربائية؛ فكلما زاد طول الموصل زادت فرصة حدوث تصادمات الإلكترونات الحرة فيه مع بعضها بعضاً ومع ذرات الموصل، وعليه تزداد المقاومة الكهربائية؛ أي أن $(\alpha \propto L)$. بينما تقل مقاومة الموصل عند زيادة مساحة مقطعه (P)؛ إذ يقل معدل حدوث التصادمات؛ أي أن $(\alpha \propto \frac{1}{P})$ ، وتختلف المقاومة الكهربائية باختلاف نوع المادة التي يصنع منها الموصل. وبناء على ما سبق يمكن حساب المقاومة الكهربائية وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$\rho = \frac{R}{\frac{L}{A}} \quad (4-4)$$

حيث (ρ): المقاومة الكهربائية للمادة، وتعطى عادة عند درجة حرارة معينة للمادة؛ لأنها تتغير بتغير درجة الحرارة، وتقاس المقاومة بوحدة ($\Omega \cdot m$).

والمقاومة لمادة (Resistivity) تساوي عددياً مقاومة جزء من تلك المادة طوله (l) م ومساحة مقطعه (A) م² عند درجة حرارة محددة.

المقاومة الكهربائية

نشاط (4-1)

جدول (4-1): مقاومة بعض المواد عند درجة حرارة ٢٠°س

المادة	المقاومة ($\Omega \cdot m$)
الفضة	1.59×10^{-8}
النحاس	1.7×10^{-8}
الذهب	2.44×10^{-8}
الألمنيوم	2.82×10^{-8}
التنغستن	5.6×10^{-8}
الحديد	1.0×10^{-7}
البلاتين	1.1×10^{-7}
الزئبق	9.8×10^{-7}
النيكروم	1.0×10^{-6}
الكربون	3.5×10^{-5}
السيليكون	$0.1 - 60$
الجرمانيوم	0.46
الزجاج	$10^{10} - 10^{14}$
المطاط القاسي	10^{13}
الكوارتز	75×10^{16}

الهدف: تصنيف المواد وفق قيم المقاومة الكهربائية .
يبين الجدول (4-1) قيم مقاومة بعض المواد عند درجة حرارة الغرفة (٢٠°س)، ادرس الجدول ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

١ أي المواد الواردة في الجدول لها أكبر مقاومة كهربائية عند درجة حرارة ٢٠°س؟

٢ صنف المواد الواردة في الجدول إلى ثلاثة أنواع وفق قيم المقاومة، وأعط اسماً لكل نوع.

٣ فسر استخدام المطاط في صناعة مقابض أدوات صيانة الأجهزة الكهربائية.

تلاحظ من قيم المقاومة الكهربائية الواردة في الجدول (4-1)، أن المواد تصنف إلى ثلاثة أنواع وفق قيم المقاومة الكهربائية لكل منها؛ مواد موصلة ذات مقاومة كهربائية صغيرة جداً مثل: (الفضة والنحاس والحديد)، ومواد شبه موصلة ذات مقاومة متوسطة مثل: (الكربون والجرمانيوم والسيليكون)، ومواد عازلة ذات مقاومة عالية مثل: (الزجاج والمطاط والكوارتز)، وتلاحظ أن الموصلات الفلزية لها قيم مقاومة كهربائية أقل بكثير من مقاومة أشباه الموصلات

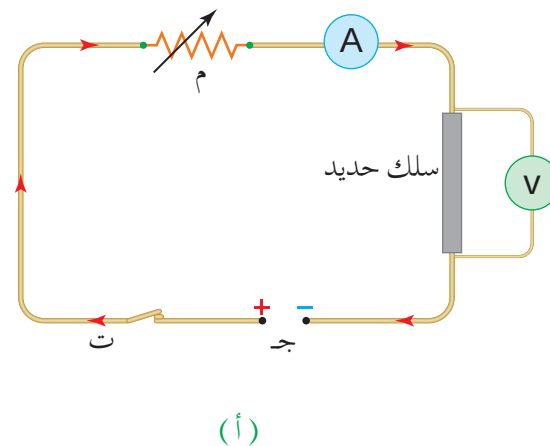
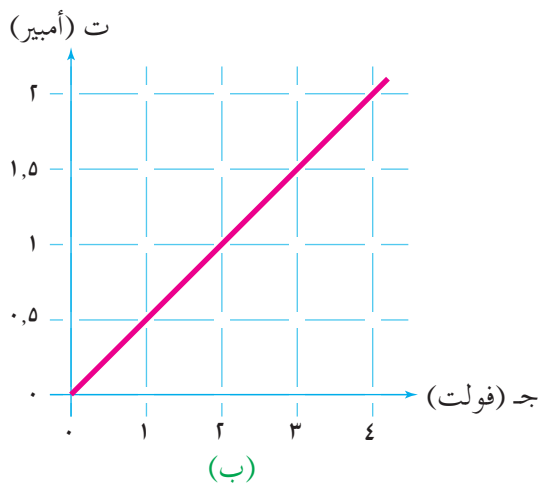
والمواد العازلة، أي أنها موصلة جيدة للكهرباء، ويفسر ارتفاع مقاومة المواد العازلة استخدام بعضها كالمطاط مثلاً في صناعة مقابض أدوات صيانة الأجهزة الكهربائية، مثل مقبض المفك.

وقد وُجد عملياً أن قيم المقاومة للموصلات الفلزية تزداد بزيادة درجة حرارتها؛ بسبب زيادة الطاقة الحركية للإلكترونات الحرة فيها؛ ما يؤدي إلى المزيد من التصادمات. وتقل المقاومة للموصلات بنقصان درجة حرارتها. وقد وجد تجريبياً أن المقاومة والمقاومة الكهربائية لبعض المواد تهبط بشكل مفاجئ إلى الصفر عند درجة حرارة منخفضة جداً، عندها تُصبح تلك المواد فائقة الموصلية (Super Conductors).

ومع تقدم علم المواد فائقة الموصلية، استخدمت هذه المواد في نقل الطاقة وتخزينها من غير ضياع يذكر، وفي إنتاج مجالات مغناطيسية قوية تُستخدم في أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي (Magnetic Resonance Imaging) MRI، وفي القطارات السريعة جداً. ولصعوبة تبريد الموصلات وارتفاع التكلفة المادية لتصبح فائقة الموصلية؛ فإن بحوث العلماء تنصب على إنتاج مواد فائقة الموصلية في درجات الحرارة العادية.

مثال (٤-٢)

في تجربة لقياس مقاومة سلك طويل من الحديد ملفوف على بكر، مساحة مقطعه (١) مم^٢، وصل طالب طرفي السلك في دائرة كهربائية كما في الشكل (٤-٦ أ)، ثم أخذ قراءات مختلفة لتيار الدارة وفرق الجهد بين طرفي السلك، ومثل العلاقة بينهما بيانياً كما في الشكل (٤-٦ ب)، إذا علمت أن درجة حرارته بقيت ثابتة. ومعتمداً على الشكل:



الشكل (٤-٦): مثال (٤-٢).

١) جد مقاومة السلك (م).

٢) إذا علمت أن $(\rho_{\text{الحديد}} = 10 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{م})$ ، جد الطول الكلي للسلك الذي استخدمه الطالب.

٣) إذا استخدم الطالب جزءاً من اللفة طوله $(L = 2 \text{ م})$ ، فجد مقاومة هذا الجزء (M) ومقاوميته.

الحل:

١) من الشكل (٤-٦/ب) الميل $\frac{\Delta t}{\Delta j} = \frac{1}{M}$

$$\Omega 2 = M \Leftarrow \frac{1}{2} = \frac{1-2}{2-4} = \frac{1}{M}$$

٢) $M = \frac{L \rho}{A}$

$$L = \frac{A \times M}{\rho} = \frac{2 \times 1 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-8}} = 20 \text{ م}$$

$$L = 20 \text{ م}$$

٣) بما أن المقاومة تعتمد فقط على درجة الحرارة ونوع مادة الموصل؛ فإنها تبقى ثابتة عند تغيير طول الموصل، وبما أن المقاومة تتناسب طردياً مع طول الموصل عند ثبات كل من (ρ, A) فإن:

$$\frac{L}{L'} = \frac{M}{M'}$$

$$M' = L' \times \frac{M}{L}$$

$$2 \times 2 = 20 \times M' \Leftarrow M' = 0.2 \Omega$$

١ ما المقصود بكل من: المقاومة الكهربائية، والأوم، والمقاومية الكهربائية؟

٢ ماذا نعني بقولنا إن:

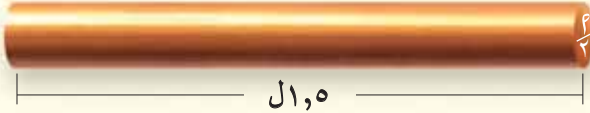
أ مقاومة موصل تساوي (٣) أوم؟

ب مقاومة النحاس تساوي (٧,١ × ١٠^{-٨}) م.Ω عند درجة حرارة (٢٠ °)س؟

٣ ما أثر زيادة كل من طول الموصل ومساحة مقطعه ودرجة حرارته في كل من:

أ مقاومة الموصل؟

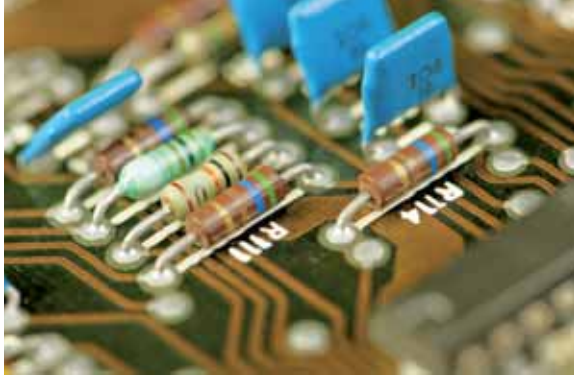
ب مقاومة مادة الموصل؟



٤ ثلاثة موصلات نحاسية تختلف عن بعضها بمساحة المقطع (P) والطول (L) كما يوضح الشكل (٤-٧)، رتب الموصلات تنازلياً وفق التيار المار في كل منها، عند وصل طرفي كل منها بمصدر فرق الجهد نفسه (ج).

الشكل (٤-٧): سؤال (٤).

تستخدم المقاومات الكهربائية في الأجهزة على نطاق واسع، فإذا تمكنت من فتح جهاز

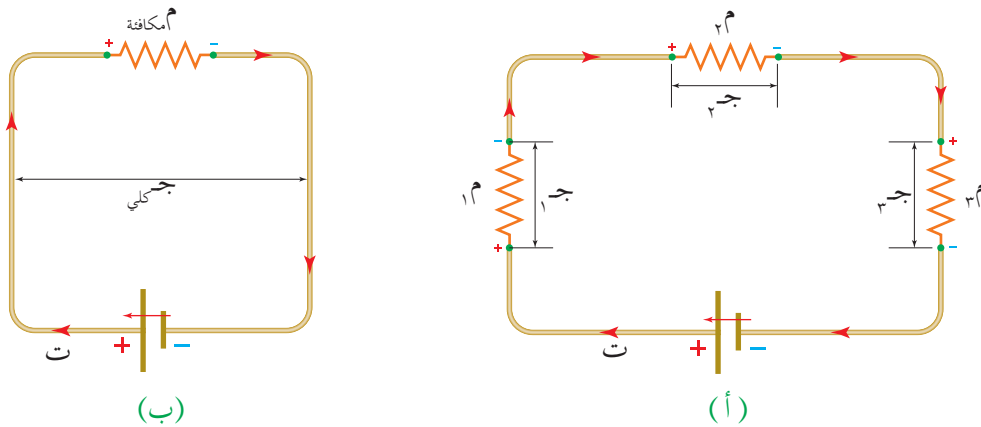


الشكل (٨-٤): توصيل المقاومات في الأجهزة الكهربائية.

كهربائي كجهاز التحكم عن بعد للتلفاز مثلاً، ستجد الكثير من المقاومات وُصِلت بطرائق مختلفة كما في الشكل (٨-٤)، منها التوصيل على التوالي والتوصيل على التوازي، أو الجمع بينهما للحصول على المقاومة المطلوبة. ويعود سبب الاختلاف في طريقة التوصيل إلى اختلاف الغاية من الاستخدام.

■ (١-٣-٤) التوصيل على التوالي (Series Combination)

توصل المقاومات بطريقة التوالي بحيث يمر التيار الكهربائي (ت) نفسه في المقاومات جميعها الواحدة تلو الأخرى كما في الشكل (٩-٤/أ)، بينما يتجزأ فرق جهد المصدر بنسبة طردية مع مقدار المقاومة، ويكون مجموع فروق الجهد للمقاومات جميعها مساوياً لفرق جهد المصدر (ج_{الكل} = ج_١ + ج_٢ + ج_٣).



الشكل (٩-٤): توصيل المقاومات على التوالي.

ويمكن استبدال مقاومة واحدة بهذه المقاومات تسمى المقاومة المكافئة (م_{المكافئة}) يكون لها الجهد الكلي نفسه، ويمر فيها التيار نفسه كما يبين الشكل (٩-٤/ب)، ولحساب المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة على التوالي، نستخدم العلاقة الآتية: ج_{الكل} = ج_١ + ج_٢ + ج_٣

وبما أن (ج = ت م) فإن: $T_m = T_{m1} + T_{m2} + T_{m3}$

وباختصار (ت) تصبح العلاقة: $T_m = T_{m1} + T_{m2} + T_{m3}$

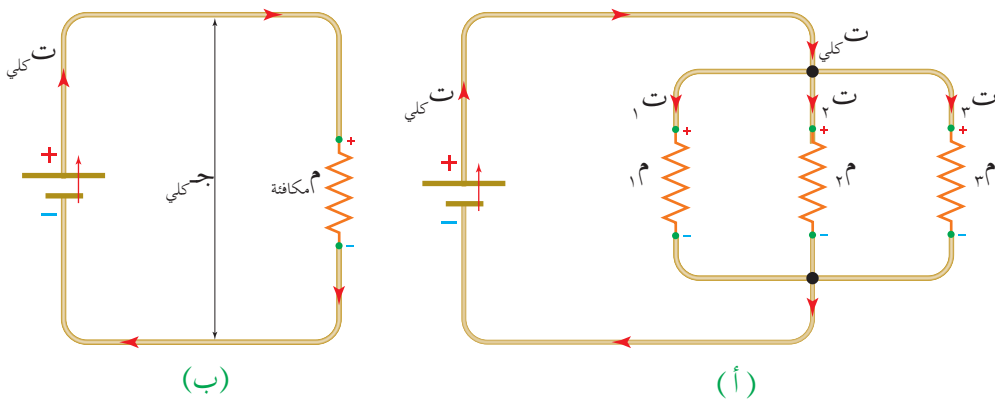
وهذا يعني أنه عند وصل مجموعة من المقاومات على التوالي تكون المقاومة المكافئة لها هي المجموع الجبري لتلك المقاومات؛ أي أن:

$$T_m = T_{m1} + T_{m2} + T_{m3} + \dots + T_{m5} \quad (4-5)$$

نجد من العلاقة (4-5) أن المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة معاً على التوالي تكون أكبر من أكبر مقاومة في المجموعة. وأهم خصائص التوصيل على التوالي؛ أنه إذا قطع سلك إحدى المقاومات، فإن مرور التيار الكهربائي يتوقف فيها جميعاً، ويعمل التوصيل على التوالي على تقليل التيار الكهربائي المار في الدارة وتجزئة الجهد. ومن أهم الأمثلة على توصيل الأجهزة على التوالي، توصيل جهاز الأميتر ذي المقاومة الصغيرة جداً على التوالي في دارة لقياس التيار الكهربائي من غير أن يؤثر في تيار الدارة بصورة ملموسة.

■ (4-3-2) التوصيل على التوازي (Parallel Combination)

توصل المقاومات بطريقة التوازي بحيث تشترك المقاومات في نقطتي البداية والنهاية، وتكون كل مقاومة في فرع كما في الشكل (4-10 أ)، ويكون فرق الجهد بين طرفي كل فرع مساوياً لفرق الجهد بين طرفي المصدر، ويتجزأ تيار الدارة (ت كلي) عند نقطة التفرع بين هذه المقاومات بنسبة عكسية مع مقدار المقاومة، ويكون مجموع تيارات الفروع مساوياً لتيار المصدر ($T_{\text{كلي}} = T_1 + T_2 + T_3$). ويمكن استبدال مقاومة واحدة بهذه المقاومات تسمى المقاومة المكافئة (T_m) يكون لها الجهد نفسه، ويمر فيها التيار الكلي نفسه كما يبين الشكل (4-10 ب)، ولحساب المقاومة



الشكل (4-10) توصيل المقاومات على التوازي.

المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة على التوازي، نستخدم العلاقة الآتية:

$$I_{\text{الكلية}} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$\frac{I_{\text{الكلية}}}{R_{\text{المكافئة}}} = \frac{I_1}{R_1} + \frac{I_2}{R_2} + \frac{I_3}{R_3}$$

وبما أن فرق الجهد بين طرفي الفروع متساوٍ ($I_1 = I_2 = I_3 = I_{\text{الكلية}}$) فإن العلاقة تصبح:

$$\frac{1}{R_{\text{المكافئة}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

وهذا يعني أنه عند وصل مجموعة من المقاومات على التوازي تكون المقاومة المكافئة لها:

$$\frac{1}{R_{\text{المكافئة}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (4-6)$$

تُعطي العلاقة (4-6) مقلوب المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات الموصولة معًا على التوازي، لذا تكون المقاومة المكافئة أصغر من أصغر مقاومة في المجموعة، ومن خصائص توصيل المقاومات على التوازي؛ أنه إذا قطع سلك إحدى المقاومات، يتوقف مرور التيار الكهربائي في تلك المقاومة فقط، أما باقي الدارة فإنها تبقى تعمل.

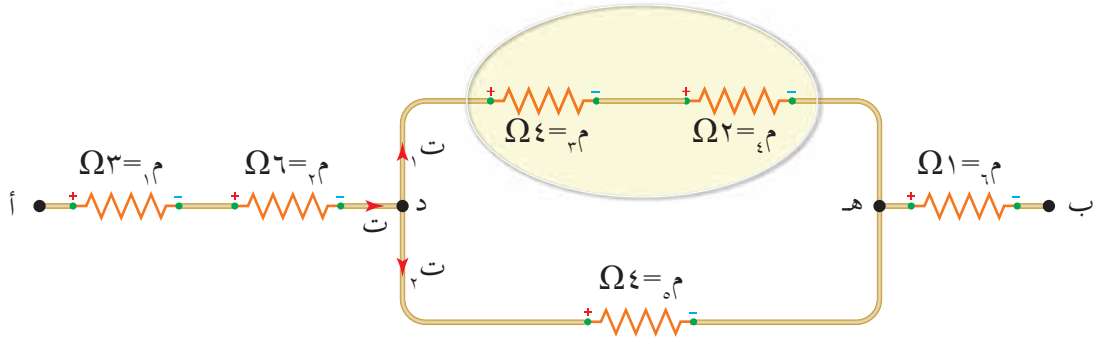
وتُتبع هذه الطريقة في التوصيل إذا أردنا تجزئة التيار الكهربائي المار في الدارة. ومن أهم تطبيقات توصيل المقاومات على التوازي، توصيل جهاز الفولتميتر الذي يمتاز بمقاومته الكبيرة جدًا في الدارة ليقاس فرق الجهد بين طرفي أي عنصر من غير أن يؤثر في التيار المار فيه. وتستخدم طريقة التوصيل على التوازي أيضًا في توصيل الأجهزة الكهربائية التي تعمل على فرق الجهد نفسه وفي توصيل مصابيح الإنارة.

مثال (4-3)

وُصلت مجموعة من المقاومات كما في الشكل (4-11 أ)، اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل أجب عن الأسئلة الآتية:

١ هل يمكننا القول إن المقاومة (R_3) موصولة على التوازي مع (R_2)؟ لماذا؟

٢ جد المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات بين النقطتين (أ، ب).



الشكل (٤-١١ أ): مثال (٤-٣).

الحل:

١ لا؛ لأن المقاومتين (م٣، م٤) ليس لهما فرق الجهد نفسه، فهما اشتركتا في نقطة البداية، ولم تشتركا في نقطة النهاية، فالمقاومة (م٣) متصلة مع (م٤) على التوالي من نقطة التفرع (د) إلى نقطة التفرع (هـ).

٢ لإيجاد المقاومة المكافئة يبسط الشكل، فنبدأ بالفروع، ومن الشكل المحاط يتبين أن المقاومتين (م٣، م٤) موصولتان على التوالي، وسنرمز لمكافئتهما بالرمز (م٧)؛ أي أن:

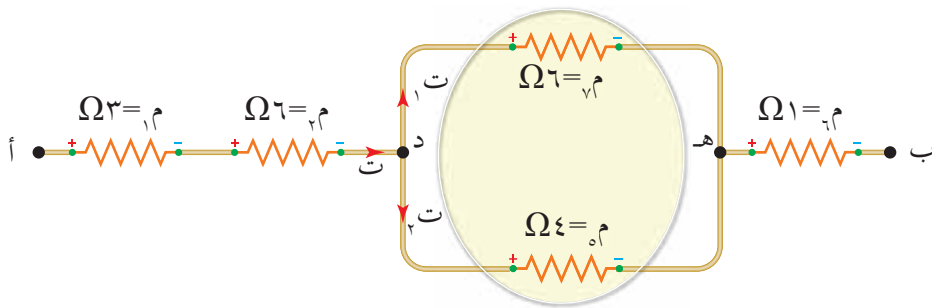
$$م٣ + م٤ = م٧$$

$$م٦ = ٢ + ٤ = م٧$$

أما (م٧، م٤) فموصولتان على التوازي ومكافئتهما (م٨) كما يبين الشكل (٤-١١ ب) (لاحظ أنه يمر فيهما تيار مختلف، حيث يتجزأ التيار الكهربائي عند نقطة التفرع (د)، ويعود ليجتمع عند النقطة (هـ)).

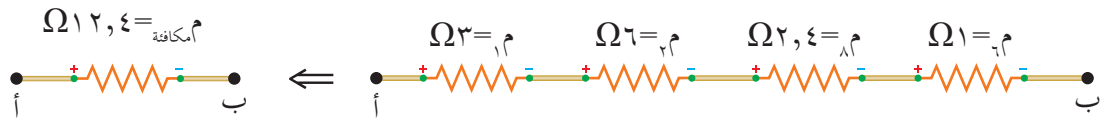
$$\frac{1}{م٤} + \frac{1}{م٧} = \frac{1}{م٨}$$

$$م٢,٤ = \frac{٢٤}{١٠} = م٨ \leftarrow \frac{1}{٤} + \frac{1}{٦} = \frac{1}{م٨}$$



الشكل (٤-١١ ب): مثال (٤-٣).

ومن الشكل (٤-١١/ج) نلاحظ أن المقاومات ($١م$ ، $٢م$ ، $٨م$ ، $٢م$) موصولة معًا على التوالي، ويمكن حساب المقاومة المكافئة بين النقطتين (أ، ب):

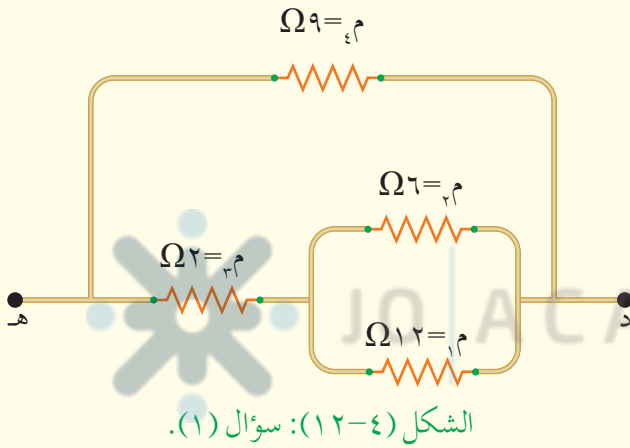


الشكل (٤-١١/ج): مثال (٤-٣).

$$١م + ٢م + ٨م + ٢م = \text{مكافئة}$$

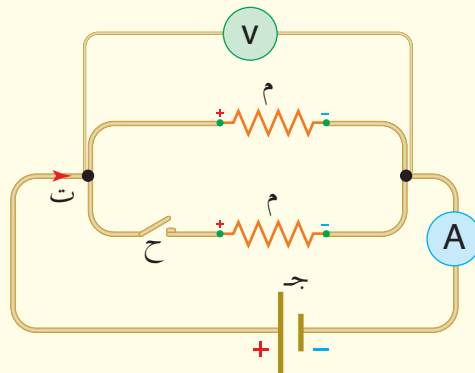
$$\Omega_{١٢,٤} = ١ + ٢ + ٨ + ٢ =$$

مراجعة (٤-٣)



الشكل (٤-١٢): سؤال (١).

١ احسب المقاومة المكافئة بين النقطتين (د، هـ) لمجموعة المقاومات في الشكل (٤-١٢).



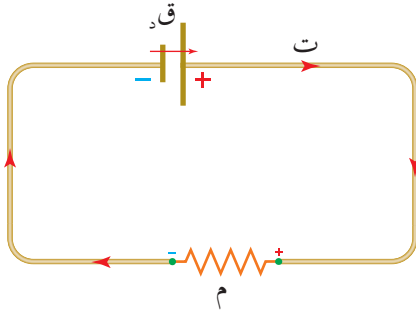
الشكل (٤-١٣): سؤال (٢).

٢ يبين الشكل (٤-١٣)، دائرة كهربائية. ماذا يحدث لقراءة كل من الأميتر والفولتميتر بعد إغلاق المفتاح؟

٣ فسر العبارات الآتية:

أ) توصيل المصابيح في المنازل على التوازي.

ب) يكون التيار الكهربائي الكلي لدائرة فيها ثلاث مقاومات موصولة معًا على التوالي أقل من التيار الكلي في الدائرة نفسها عند وصل المقاومات نفسها على التوازي.



الشكل (٤-١٤): اتجاه حركة الشحنات الموجبة.

عند دراستك أجزاء دائرة كهربائية مغلقة، تجد أن البطارية تؤدي مهمة أساسية في إدامة التيار الكهربائي فيها، فعند وصل جهاز كهربائي (مقاومة) مع بطارية كما في الشكل (٤-١٤) يمر في الدارة تيار كهربائي، ويبين الشكل اتجاه التيار الاصطلاحي الذي يعبر عن اتجاه حركة الشحنات الموجبة.

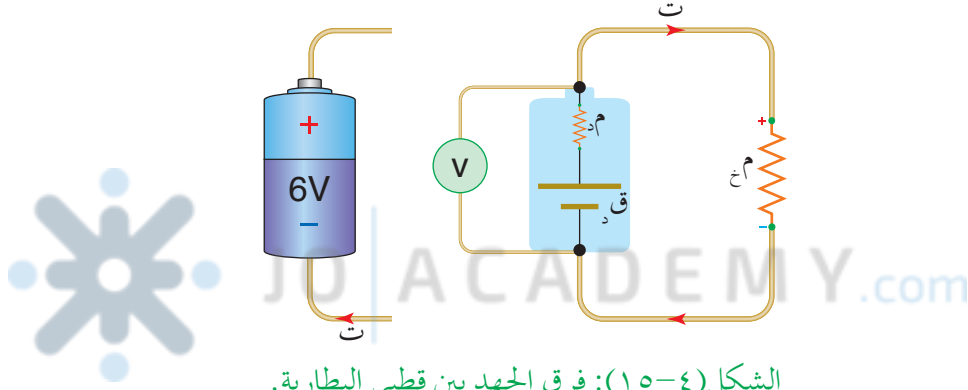
تُعدُّ البطارية مصدرًا يزود الدارة بالطاقة الكهربائية؛ إذ تعمل الطاقة المتحررة من التفاعلات الكيميائية داخل البطارية على جعل أحد قطبيها موجبًا والآخر سالبًا، فينشأ فرق في الجهد الكهربائي بين طرفيها ويتولد مجال كهربائي في الأسلاك يؤدي إلى دفع الشحنات الموجبة من القطب الموجب، عبر الأسلاك، مرورًا بالمقاومة، نحو القطب السالب للبطارية. ولكي تتابع الشحنات حركتها داخل البطارية من القطب السالب ذي الجهد المنخفض، إلى القطب الموجب ذي الجهد المرتفع؛ تبذل البطارية شغلًا على الشحنات فتنتقل إليها الطاقة المتحررة من التفاعلات، ليتم استهلاك هذه الطاقة عبر عناصر الدارة من مقاومات أو أجهزة، ومن ثم تعود الشحنات إلى القطب السالب للبطارية لتزويدها بالطاقة ودفعها نحو القطب الموجب من جديد. وتعمل البطارية على نقل كمية ثابتة من الشحنة، والمحافظة على قيمة ثابتة للتيار في الدارة، فالتيار لا يتلاشى أو يتوقف إلا عند فتح الدارة الكهربائية؛ حيث ينعدم المجال الكهربائي ويتوقف إمداد الشحنات بالطاقة، أو عندما تستهلك الطاقة المخزنة في البطارية، وهنا إما أن تستبدل البطارية أو أن يعاد شحنها كما في بطارية الهاتف النقال.

ويُعرف الشغل الذي تبذله البطارية لدفع وحدة الشحنات الموجبة من القطب السالب إلى القطب الموجب داخلها **بالقوة الدافعة الكهربائية (Electromotive Force)**، ويُرمز لها بالرمز (ق)، ويُعبر عنها بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ق = \frac{ش}{س} \dots\dots\dots (٤-٧)$$

حيث (ش): الشغل الذي تبذله البطارية، (س): كمية الشحنة المنقولة. والقوة الدافعة الكهربائية كمية قياسية تقاس في النظام العالمي للوحدات بوحدة فولت والتي تكافئ (جول/كولوم)، ويعبر عن اتجاه دفع البطارية للشحنات داخلها من قطبها السالب إلى قطبها الموجب بسهم فوق رمز البطارية في الدارات الكهربائية. (—|—).

وتستهلك معظم الطاقة التي تنتجها البطارية في المقاومات الخارجية (م_ج)، إلا أن جزءاً صغيراً من هذه الطاقة يستهلك داخل البطارية، لوجود مقاومة تعيق حركة الشحنات عند مرورها عبر البطارية، وتسمى هذه المقاومة الداخلية للبطارية ويرمز لها بالرمز (م_د). ولتوضيح أثر المقاومة الداخلية، افترض أن لديك بطارية كتب عليها (٦ فولت، ووصلت ضمن دائرة كما في الشكل (٤-١٥)، ووصل طرفا البطارية بفولتميتر، فماذا يقرأ الفولتميتر؟



الشكل (٤-١٥): فرق الجهد بين قطبي البطارية.

يمثل الرقم المكتوب على البطارية في الشكل القوة الدافعة الكهربائية لها، وعندما تكون الدائرة مغلقة نجد أن قراءة الفولتميتر التي تمثل فرق الجهد بين قطبي البطارية تكون أقل من قيمة القوة الدافعة الكهربائية للبطارية بمقدار (ت م)؛ بسبب استهلاك جزء من الطاقة التي تنتجها البطارية في المقاومة الداخلية للبطارية، ويمكن التعبير عن فرق الجهد بين قطبي البطارية (ج) بالعلاقة الآتية:

$$ج = ق - ت م \dots\dots\dots (٤-٨)$$

حيث (ت م): جهد المقاومة الداخلية (ج م) وهو الهبوط في جهد البطارية. ونستنتج من العلاقة (٤-٨) أن فرق الجهد بين قطبي البطارية يكون مساوياً قوتها الدافعة الكهربائية في حالتين؛ عندما تكون المقاومة الداخلية للبطارية مهملة (م_د = ٠)، أو عندما تكون الدارة مفتوحة (ت = ٠) والبطارية موصولة مع الفولتميتر؛ فمقاومة الفولتميتر كبيرة جداً، فيؤول التيار عبرها إلى الصفر، عندئذ يقرأ الفولتميتر القوة الدافعة الكهربائية.

١ ماذا نعني بقولنا إن القوة الدافعة الكهربائية لبطارية تساوي (٣) فولت؟

٢ فسر: يتلاشى التيار الكهربائي عند فتح الدارة الكهربائية.

٣ اذكر حالتين يكون فيهما فرق الجهد بين قطبي البطارية مساوياً قوتها الدافعة الكهربائية.

٤ دائرة كهربائية تتكون من بطارية ومقاومة ومفتاح، يتصل طرفا البطارية بفولتميتر. إذا كانت قراءة الفولتميتر والمفتاح مفتوح (١٢) فولت، وعند إغلاق المفتاح تصبح (٩) فولت. فأجب عن الأسئلة الآتية:

أ ماذا تمثل قراءة الفولتميتر والمفتاح مفتوح؟

ب إذا كانت المقاومة الداخلية للبطارية (١) Ω ، فما مقدار التيار الكهربائي المار في الدارة؟



تعرف **القدرة الكهربائية** بأنها الشغل المبذول (ش) لنقل شحنة بين نقطتين بينهما فرق في الجهد في وحدة الزمن (ز)، ويعبر عنها بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{القدرة} = \frac{\text{ش}}{\text{ز}} \dots\dots\dots (٤-٩)$$

وتقاس القدرة بوحدة (جول/ثانية)، وتعرف هذه الوحدة في النظام العالمي للوحدات بالواط. وبما أن البطارية في دارة مغلقة تبذل شغلاً لتحريك الشحنات عبر الدارة فإن المعدل الزمني للشغل الذي تبذله البطارية يعبر عن القدرة المنتجة من البطارية، ويمكن حساب هذه القدرة من العلاقة (٤-٧): ش = ق_ش

$$\text{وبقسمة طرفي المعادلة على زمن نقل الشحنة (ز)، فإن: } \frac{\text{ش}}{\text{ز}} = \text{ق}_\text{ش}$$

وحيث إن القدرة = $\frac{\text{ش}}{\text{ز}}$ ، وت = $\frac{\text{ش}}{\text{ز}}$ فإن القدرة الكهربائية التي تنتجها البطارية تُعطى بالعلاقة الرياضية:

$$\text{قدرة البطارية} = \text{ق}_\text{ش} \dots\dots\dots (٤-١٠)$$

وتعبر قدرة البطارية أيضاً عن الطاقة المنتجة منها في وحدة الزمن. وتستهلك هذه الطاقة عبر مقاومات الدارة الداخلية والخارجية، وتظهر بأشكال مختلفة، فمثلاً في المصباح الكهربائي تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ضوئية وطاقة حرارية، وفي ملفات التسخين تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية.

وللتوصل إلى علاقة رياضية لحساب القدرة المستهلكة في مقاومة (م)، فرق الجهد بين طرفيها (ج) فإننا نحسب الشغل (ش) الذي تبذله البطارية لنقل شحنة (س) عبر هذه المقاومة من العلاقة:

$$\text{ش} = \text{ج} \cdot \text{س}$$

$$\text{وبقسمة طرفي المعادلة على زمن عبور الشحنات (ز): } \frac{\text{ش}}{\text{ز}} = \text{ج} \cdot \frac{\text{س}}{\text{ز}}$$

ومن تعريف القدرة، والتيار الكهربائي نجد أن:

$$\text{القدرة المستهلكة في مقاومة} = \text{ج} \cdot \text{ت} \dots\dots\dots (٤-١١)$$

وباستخدام العلاقة (ج = ت م) يمكن التعبير عن القدرة المستهلكة في مقاومة بصيغتين مكافئتين للعلاقة (١١-٤) كما يأتي:

$$\text{القدرة} = ت^2 \times م \quad \text{والقدرة} = \frac{ج^2}{م}$$

ومن قانون حفظ الطاقة؛ فإن القدرة التي تنتجها البطارية (ق_ت) في الدارة المغلقة، تكون مساوية القدرة التي تستهلكها مقاومات الدارة الداخلية والخارجية جميعها؛ أي أن:

$$\text{القدرة المنتجة} = \text{القدرة المستهلكة}$$

ويمكن التعبير عن هذه العلاقة بالصورة الآتية:

$$ق_{ت} = ت^2 م + ت^2 م_{ج} \dots\dots\dots (١٢-٤)$$

إن معرفتنا قدرة جهاز كهربائي تمكننا من حساب الطاقة التي يستهلكها الجهاز عند تشغيله فترة من الزمن. فمثلاً إذا كتب على مصباح (٨٠ واط، ١٢٠ فولت) فهذا يعني أن المصباح يستهلك (٨٠) جول من الطاقة كل ثانية، وذلك عند وصله مع مصدر فرق جهد (١٢٠) فولت. تكون الطاقة المستهلكة في أي جهاز عند تشغيله لمدة من الزمن من العلاقة الرياضية الآتية:

$$ط = \text{القدرة} \times \text{الزمن} \dots\dots\dots (١٣-٤)$$

فإذا كانت القدرة مقيسة بوحدة الواط (جول/ث) وزمن استهلاك الطاقة بالثواني فإن الطاقة تكون بوحدة (الجول). أما إذا كانت القدرة مقيسة بالكيلوواط والزمن بالساعات فإن الطاقة المحسوبة تكون بوحدة (الكيلوواط.ساعة)؛ وهي الوحدة التي تستخدمها شركات الكهرباء عالمياً لقياس الطاقة المستهلكة لحساب أثمانها.

مثال (٤-٤)

وُصل مجفف شعر كهربائي مع مصدر فرق جهد كهربائي مقداره (٢٠٠) فولت، إذا كانت قدرة المجفف (١) كيلو واط، فاحسب:

١ مقاومة ملف مجفف الشعر.

٢ الطاقة الكهربائية المستهلكة عند تشغيل المجفف لمدة (١٥) دقيقة بوحدة (كيلوواط.ساعة).

الحل:

$$١ \text{ القدرة} = \frac{ج^2}{م}$$

$$\Omega ٤٠ = \frac{٤٠٠٠٠}{١٠٠٠} = م \Leftarrow \frac{٢(٢٠٠)}{م} = ٣١٠ \times ١$$

٢ ط = القدرة $\times$ ز (لتحويل الدقائق إلى ساعات نقسم على ٦٠؛ وعليه فإن ١٥ دقيقة = ٠,٢٥ ساعة).

$$ط = ١ \times ٠,٢٥ = ٠,٢٥ \text{ كيلو واط. ساعة}$$

مثال (٥-٤)

مدفأة كهربائية، صُنع ملف التسخين فيها من سبيكة النيكروم، إذا كانت مقاومة الملف تساوي $\Omega (٢٢)$ ، وكان الملف متجانساً، فجد المعدل الزمني للطاقة المستهلكة في الملف في الحالتين الآتيتين:

١ إذا وصلت المدفأة إلى مصدر فرق جهد (٢٢٠) فولت.

٢ إذا قُطع ملف التسخين إلى نصفين، ثم وُصل أحد جزئيه إلى مصدر فرق جهد (٢٢٠) فولت.

الحل:

١ المعدل الزمني للطاقة المستهلكة يمثل القدرة، ويمكن حسابها من العلاقة:

$$\frac{ج^2}{م} = \text{القدرة}$$

$$\text{القدرة} = \frac{٢٢٠}{٢٢} = ٢٢٠٠ \text{ واط}$$

٢ عند قطع ملف التسخين إلى نصفين؛ فإن مقاومة كل جزء تصبح:

$$م = \frac{٢٢}{٢} = \Omega ١١$$

$$\frac{ج^2}{م} = \text{القدرة}$$

$$= \frac{٢٢٠}{١١} = ٤٤٠٠ \text{ واط (ضعفا معدل استهلاك طاقة الملف كاملاً).}$$

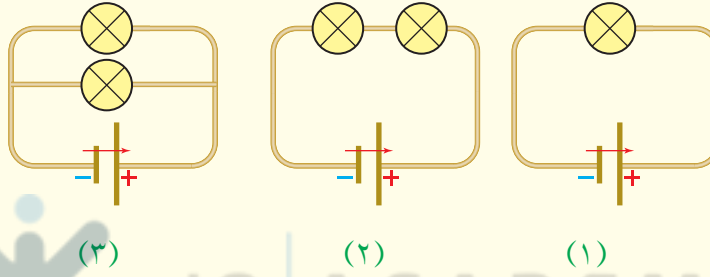
أي أن المعدل الزمني لاستهلاك الطاقة (القدرة) يزداد بنقصان المقاومة، وذلك بسبب زيادة التيار الكهربائي المار في الجهاز عند ثبات فرق الجهد بين طرفيه.

١ ماذا نعني بقولنا إن قدرة مجفف شعر كهربائي تساوي (٢) كيلو واط؟

٢ فسر: يُستهلك جزء من القدرة التي تنتجها البطارية داخل البطارية نفسها.

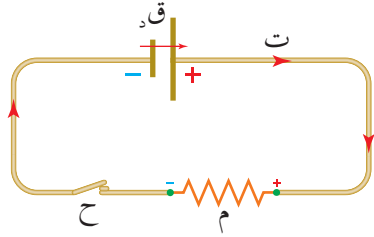
٣ جد الطاقة المكافئة للكيلو واط. ساعة بوحدة الجول.

٤ يبين الشكل (٤-١٦) خمسة مصابيح متماثلة في ثلاث دارات، وصلت مع ثلاث بطاريات متماثلة مقاوماتها الداخلية مهملة. رتب الدارات تصاعدياً وفق القدرة المستهلكة في كل منها.



الشكل (٤-١٦): سؤال (٤).

تشكل البطارية والمقاومات والأسلاك والمفتاح عناصر أساسية في الدارة الكهربائية، حيث



الشكل (٤-١٧): العناصر الأساسية في الدارة الكهربائية البسيطة.

يمكن توصيلها بطرائق مختلفة وفق الغاية من الاستخدام، ويُطلق اسم الدارة الكهربائية البسيطة على الدارة الكهربائية التي يمكن تبسيطها واختصارها في عروة واحدة كما في الشكل (٤-١٧) بحيث يمر فيها تيار واحد. وفي ما يأتي سندرس معادلة الدارة الكهربائية البسيطة وتغيرات الجهد عبر أجزائها.

■ (٤-٦-١) معادلة الدارة الكهربائية البسيطة (Simple Electric Circuit Equation)

توصلنا في البند السابق إلى أن القدرة التي تنتجها البطارية في الدارة المغلقة، تستهلك في مقاومات

الدارة الداخلية والخارجية، ومن العلاقة: $Q \cdot I = I^2 \cdot M + I^2 \cdot H$

وبقسمة طرفي المعادلة على (I) وإعادة ترتيب العلاقة الرياضية نجد أن: $I = \frac{Q}{(M + H)}$

فإذا احتوت الدارة الكهربائية البسيطة على أكثر من بطارية وأكثر من مقاومة خارجية، فإن:

$$I = \frac{\sum Q}{\sum M + \sum H}, \text{ وبصورة عامة:}$$

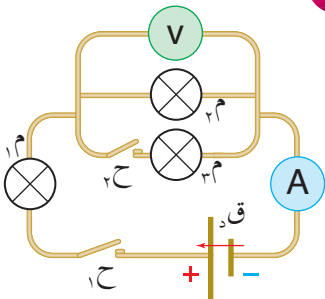
$$I = \frac{\sum Q}{\sum M} \quad (٤-١٤)$$

ويطلق على العلاقة (٤-١٤) معادلة الدارة الكهربائية البسيطة. حيث $(\sum Q)$ هو المجموع الجبري

للقوى الدافعة الكهربائية في الدارة.

ولتعرف أثر توصيل المقاومات في تيار الدارة ادرس النشاط الآتي.

نشاط (٤-٢) أثر توصيل المقاومات في تيار الدارة البسيطة



الشكل (٤-١٨): نشاط (٤-٢).

الهدف: دراسة أثر توصيل المقاومات في تيار الدارة.

المواد والأدوات: ثلاثة مصابيح متماثلة، وأميتير، وفولتميتر، ومصدر

فرق جهد (بطارية)، ومفتاحان كهربائيان، وأسلاك توصيل.

خطوات تنفيذ النشاط:

١) ركب الدارة المبينة في الشكل (٤-١٨).

٢ أغلق المفتاح (ح) فقط، مع بقاء (ح) مفتوحًا.

٣ لاحظ إضاءة المصباحين (م_١، م_٢)، هل شدة إضاءة المصباحين متماثلة؟

٤ سجل قراءة كل من الأميتر، والفولتميتر.

٥ أغلق المفتاح (ح) مع بقاء (ح) مغلقًا.

٦ لاحظ إضاءة المصابيح الثلاثة (م_١، م_٢، م_٣)؛ ماذا حدث لشدة إضاءة المصباحين (م_١) و (م_٢)؟

٧ سجل قراءة الأميتر، هل تغيرت؟ كيف تفسر ذلك.

٨ سجل قراءة الفولتميتر، هل تغيرت؟ كيف تفسر ذلك.

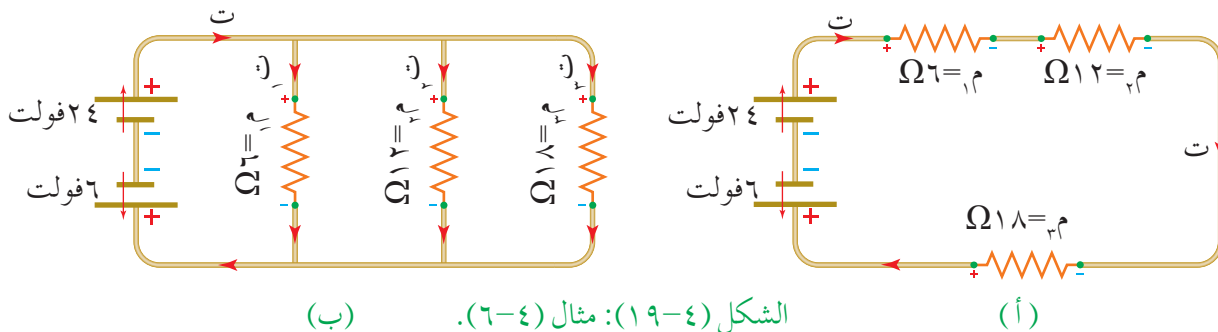
يتبين لك من إجراء النشاط أنه عند إغلاق المفتاح (ح) فقط، فإن شدة إضاءة المصباحين (م_١، م_٢) تكون متماثلة، فكلاهما يمر فيه التيار نفسه. وعند إغلاق المفتاح (ح) يضاف إلى الدارة مقاومة ثالثة على التوازي، فتقل المقاومة الكلية في الدارة، ووفقًا لمعادلة الدارة البسيطة ($T = \frac{V}{R}$) فإن نقصان المقاومة الكلية يؤدي إلى زيادة التيار الكلي، وهذا يفسر زيادة قراءة الأميتر، وزيادة شدة إضاءة المصباح الأول، لاحظ أن مجموع فرق جهد كل من المصباحين (م_١، م_٢) يجب أن يساوي جهد البطارية. أما زيادة التيار المار في المصباح (م_١) عند إغلاق المفتاح فتدل على زيادة جهده وفق العلاقة ($J = T \cdot R$)، وهذا يعني نقصان جهد المصباح (م_٢)؛ ما يفسر نقصان قراءة الفولتميتر وانخفاض شدة إضاءة المصباح (م_٢).

مثال (٤-٦)

وصلت ثلاث مقاومات على التوالي مع بطاريتين كما في الشكل (٤-١٩ أ)، ثم وصلت هذه المقاومات على التوازي مع بطاريتين كما في الشكل (٤-١٩ ب) بإهمال المقاومة الداخلية للبطاريات، جد لكل من الدارتين:

١ تيار الدارة.

٢ القدرة المستهلكة في المقاومتين (٦، ١٨) Ω.



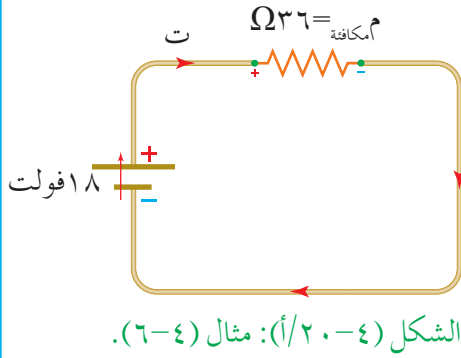
(ب)

الشكل (٤-١٩): مثال (٤-٦).

(أ)

الحل:

أولاً: الشكل (٤-١٩/أ)



يمكن تبسيط الدارة في الشكل (٤-١٩/أ) بإيجاد المقاومة المكافئة وجمع البطاريتين معاً لتصبح كما في الشكل (٤-٢٠/أ)، حيث يتضح أنها دارة بسيطة يمكن تجميع مقوماتها الموصولة على التوالي بمقاومة واحدة، لاحظ أن اتجاه التيار الكهربائي يكون باتجاه دفع الشحنات للبطارية الأكبر، وبما أن اتجاه دفع الشحنات للبطارية (٢٤ فولت) بعكس اتجاهها للبطارية (٦ فولت) فإن:

$$I = I_{\text{الأكبر}} - I_{\text{الأقل}}$$

١) لحساب التيار الكهربائي في الدارة (٤-٢٠/أ) نطبق معادلة الدارة البسيطة:

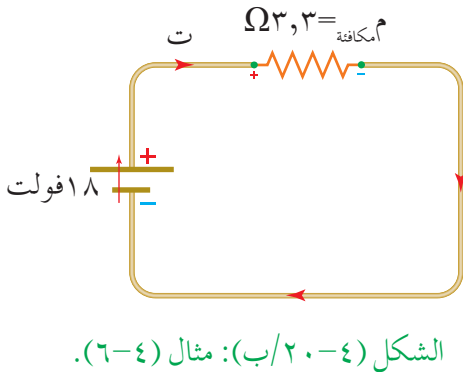
$$I = \frac{E}{R}$$

$$I = \frac{24 - 6}{18 + 12 + 6} = 0,5 \text{ أمبير}$$

$$٢) \text{ القدرة المستهلكة في المقاومة } 6\Omega = I^2 R = (0,5)^2 \times 6 = 1,5 \text{ واط}$$

$$\text{القدرة المستهلكة في المقاومة } 18\Omega = I^2 R = (0,5)^2 \times 18 = 4,5 \text{ واط}$$

ثانياً: الشكل (٤-١٩/ب)



يمكن تبسيط الدارة في الشكل (٤-١٩/ب) بإيجاد المقاومة المكافئة وجمع البطاريتين معاً، لتصبح كما في الشكل (٤-٢٠/ب)، لاحظ أنها دارة بسيطة يمكن تجميع مقوماتها الموصولة على التوازي بمقاومة واحدة وكذلك يمكن تجميع بطارياتها ببطارية واحدة.

١) للحصول على التيار الكهربائي في الدارة (٤-٢٠/ب) نطبق معادلة الدارة البسيطة، فنجد المقاومة المكافئة للمقومات الموصولة على التوازي كما يأتي:

$$\Omega_{3,3} = \Omega_{\frac{36}{11}} = \Omega_{\text{المكافئة}} \leftarrow \frac{1}{18} + \frac{1}{12} + \frac{1}{6} = \frac{1}{\Omega_{\text{المكافئة}}}$$

$$\frac{Z_{\text{ق د}}}{Z_{\text{م}}} = \text{ت}$$

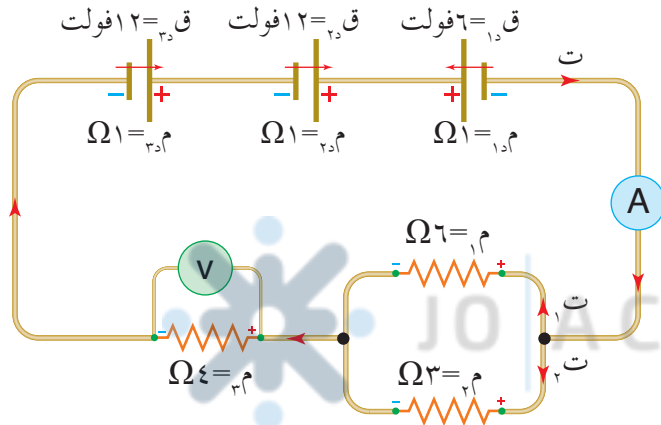
$$\text{ت} = \frac{18 \times 11}{36} = 5,5 \text{ أمبير}$$

(لاحظ أنه يمكن زيادة التيار الكهربائي في دائرة بوصل مقاوماتها على التوازي بدلاً من وصلها على التوالي).

$$\text{٢ القدرة المستهلكة في المقاومة } 6 \Omega = \frac{Z_{\text{ج د}}^2}{Z_{\text{م}}} = \frac{18^2}{6} = 54 \text{ واط}$$

$$\text{القدرة المستهلكة في المقاومة } 18 \Omega = \frac{Z_{\text{ج د}}^2}{Z_{\text{م}}} = \frac{18^2}{18} = 18 \text{ واط}$$

مثال (٧-٤)



معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل
(٤-٢١) جد:

١ قراءة الأميتر.

٢ قراءة الفولتميتر.

٣ التيار الكهربائي المار في كل مقاومة.

الحل:

الشكل (٤-٢١): مثال (٧-٤).

١ تمثل قراءة الأميتر تيار الدارة، وبما أن الدارة الكهربائية بسيطة يمكن حساب تيارها بتطبيق

معادلة الدارة الكهربائية البسيطة.

لإيجاد $Z_{\text{م}}$ لاحظ أن المقاومتين (6Ω و 3Ω) موصولتان على التوازي، ومكافئتهما (2Ω) موصولة على التوالي مع (4Ω):

$$\frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{1}{Z_{\text{م}}}$$

$$Z_{\text{م}} = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = 2 \Omega$$

$$Z_{\text{م ح}} = 2 \Omega + 4 \Omega = 6 \Omega \Leftarrow Z_{\text{م ح}} = 6 \Omega$$

$$Z_{\text{د}} = 1 \Omega + 1 \Omega + 1 \Omega = 3 \Omega \Leftarrow Z_{\text{د}} = 3 \Omega$$

$$ت = \frac{\sum Q_d}{\sum I_d + \sum I_g}$$

$$ت = \frac{6 - (12 + 12)}{6 + 3} \leftarrow ت = 2 \text{ أمبير.}$$

٢ قراءة الفولتميتر تمثل فرق الجهد بين طرفي المقاومة $\Omega 4$

$$ج = ت \times م \leftarrow ج = 2 \times 4 = 8 \text{ فولت}$$

٣ لحساب التيار الكهربائي المار في المقاومة $\Omega(6)$ ، لاحظ أن المقاومتين ($م_1$ و $م_2$) موصولتان على التوازي، فيكون لكل منهما ولكافتهما الجهد نفسه:

$$ج_م = مكافئة ج_م$$

$$ت_كلي \times م_م = مكافئة توازي ت_1 \times م_1$$

$$2 \times 2 = ت_1 \times 6$$

$$ت_1 = \frac{2 \times 2}{6} = \frac{2}{3} \text{ أمبير.}$$

وبالطريقة نفسها نحسب تيار المقاومة $\Omega(3)$

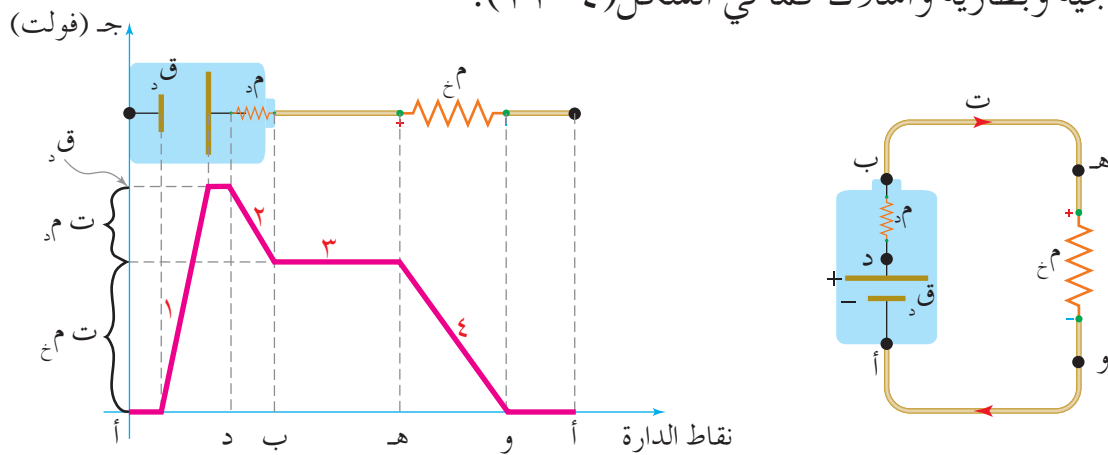
$$ت_2 = \frac{2 \times 2}{3} = \frac{4}{3} \text{ أمبير.}$$

أما المقاومة $\Omega(4)$ فيمر فيها تيار الدارة كاملاً، أي أن $ت = 2$ أمبير.

■ (٤-٦-٢) تمثيل التغيرات في الجهد بيانياً عبر أجزاء دائرة كهربائية بسيطة

يمكن تمثيل التغيرات في الجهد بيانياً عبر أجزاء دائرة كهربائية بسيطة تتكون من مقاومة

خارجية وبطارية وأسلاك كما في الشكل (٤-٢٢).



الشكل (٤-٢٢): تغيرات الجهد في دائرة كهربائية بسيطة.

عند دراسة الشكل (٤-٢٢) تلاحظ أن:

- النقطة (أ) هي الأقل جهداً، أما جهد النقطة (د) فأعلى من جهد النقطة (أ). بمقدار (ق_٣) ويمثله الخط (١).
- عند الانتقال من (د) إلى (ب)، فإن الجهد ينخفض بمقدار (ت م_٣)، وهذا مقدار الهبوط في جهد البطارية، ويمثله الخط (٢).
- إن جهد (ب) يساوي جهد (هـ)، إذ إن مقاومة أسلاك التوصيل تهمل؛ لذلك يبقى الجهد ثابتاً، ويمثله الخط (٣).
- عند الانتقال من (هـ) عبر المقاومة (م_٣) إلى (و) فإن الجهد ينخفض ثانيةً بمقدار (ت م_٣)، ويمثله الخط (٤)، وتعود قيمة الجهد ثانيةً إلى الصفر (ج_٣ = ج_١).

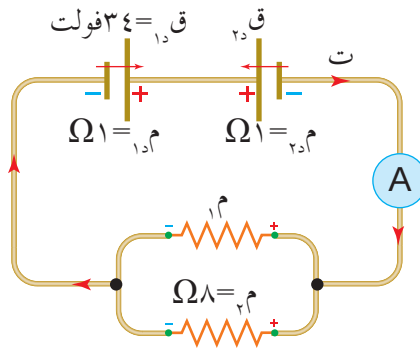
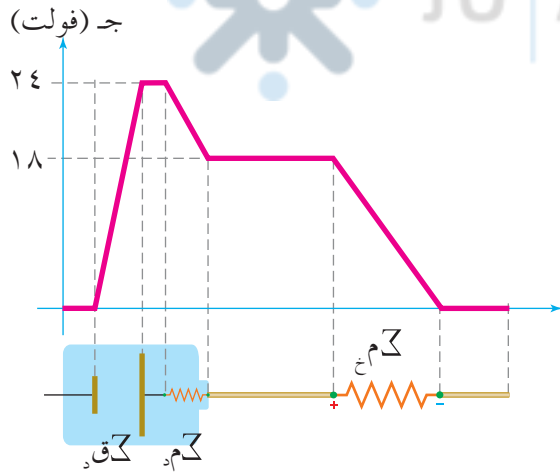
مثال (٤-٨)

يبين الشكل (٤-٢٣) دائرة كهربائية بسيطة والتمثيل البياني للتغيرات في الجهد عبر أجزاء الدارة الكهربائية، مستعيناً بالبيانات الواردة في كل منهما احسب:

١ القوة الدافعة الكهربائية (ق_٣).

٢ تيار الدارة (ت).

٣ المقاومة (م_٣).



الحل:

$$١ \quad \text{ق}_٣ = \text{ق}_١ - \text{ق}_٢$$

$$٢٤ = ٣٤ - \text{ق}_٢ \Rightarrow \text{ق}_٢ = ١٠ \text{ فولت}$$

٢ من التمثيل البياني لتغيرات الجهد في الدارة نحسب الهبوط في جهد البطاريات:

$$\text{ت م}_٣ = ٢٤ - ١٨$$

$$\text{ت} = (١ + ١) = ٦ \Rightarrow \text{ت} = ٣ \text{ أمبير}$$

$$\frac{\Sigma Q_d}{\Sigma M_d + \Sigma M_g} = 3 \text{ ت}$$

$$\frac{24}{M+2} = 3$$

$$M_g = 2 - \frac{24}{3} = 2 \text{ م}$$

نلاحظ أن المقاومتين (M_1 ، M_2) موصولتان على التوازي، ومكافئتهما ($M_g = 2 \Omega$)

$$\frac{1}{M_2} + \frac{1}{M_1} = \frac{1}{M_g}$$

$$\Omega 24 = M_1 \Leftarrow \frac{1}{8} - \frac{1}{6} = \frac{1}{M_1} \Leftarrow \frac{1}{8} + \frac{1}{M_1} = \frac{1}{6}$$

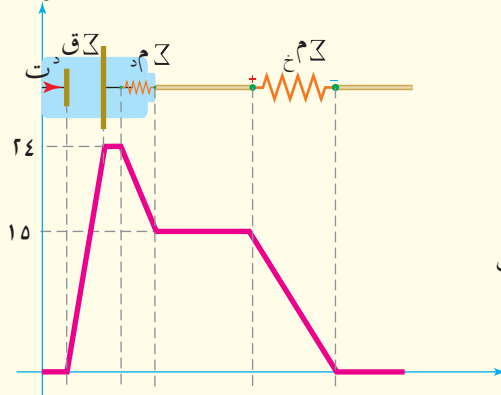
مراجعة (٤-٦)

مثلت تغيرات الجهد عبر أجزاء الدارة الكهربائية الموضحة في الشكل (٤-٢٤ أ) بيانيًا كما في الشكل (٤-٢٤ ب)، مستخدمًا البيانات المثبتة في الشكل، جد:

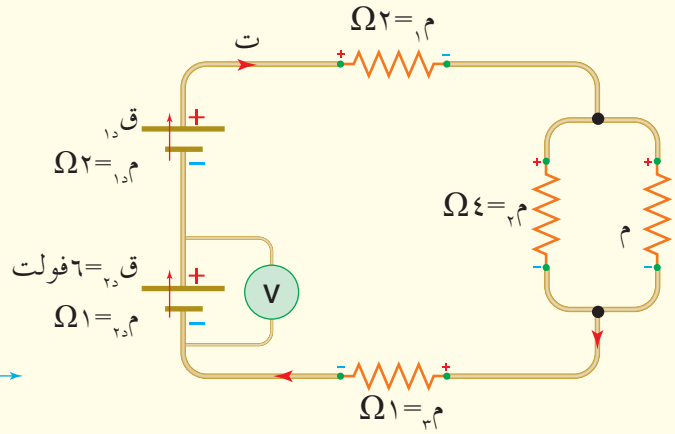
١ القوة الدافعة الكهربائية (Q_1). ٢ تيار الدارة (ت). ٣ المقاومة (م).

٤ قراءة الفولتميتر. ٥ القدرة المستهلكة في المقاومة (م).

جـ- (فولت)



(ب)



(أ)

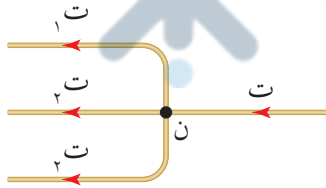
الشكل (٤-٢٤): سؤال المراجعة (٤-٦).

تعد الدارات الكهربائية البسيطة نوعًا خاصًا من الدارات الكهربائية، وقد تعرفت معادلة الدارة الكهربائية البسيطة وتغيرات الجهد عبر أجزائها، وعرفت أنه يمكن تطبيقها في الدارات الكهربائية التي يمكن تبسيطها لتكون عروة واحدة فقط. إلا أن كثيرًا من الدارات الكهربائية لا يمكن تبسيطها إلى عروة واحدة.

درس العالم جوستاف كيرشوف الدارات الكهربائية، ووضع قاعدتين عُرفتا بقاعدتي كيرشوف يمكن تطبيقهما لتحليل الدارات الكهربائية بأنواعها المختلفة، وسنقدم فيما يأتي توضيحًا لهاتين القاعدتين وكيفية تطبيقهما.

■ (٧-٤-١) قاعدة كيرشوف الأولى (قاعدة الوصلة) Kirchhoff's First Rule (Junction Rule)

عند توصيل مجموعة من الأجهزة الكهربائية على التوازي، فإن تيار الدارة الكهربائية (ت) يتجزأ كما في الشكل (٤-٢٥) إلى تيارات عدة عند وصوله إلى نقطة التفرع (ن)، واعتمادًا على مبدأ حفظ الشحنة، فإن كمية الشحنات الداخلة في النقطة (ن) تساوي كمية الشحنات الخارجة منها، ويمكن التعبير عن هذا رياضياً:



$$\Delta_{\text{الداخلية}} = \Delta_{\text{الخارجية}}$$

$$\Delta_{\text{الداخلية}} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$$

الشكل (٤-٢٥): قاعدة كيرشوف الأولى.

وبقسمة طرفي المعادلة على الزمن المستغرق لعبور الشحنات (Δ ز) نتوصل إلى:

$$ت = ت_1 + ت_2 + ت_3$$

وبشكل عام عند أي نقطة تفرع في دارة يكون:

$$\sum ت = \text{صفر} \dots\dots\dots (٤-١٥)$$

وتعد العلاقة (٤-١٥) تعبيرًا رياضيًا لقاعدة كيرشوف الأولى التي تنص على "أن المجموع

الجبري للتيارات عند أي نقطة تفرع في دارة كهربائية يساوي صفرًا".

ويكون التيار الذي يدخل في نقطة التفرع موجبًا والتيار الخارج منها سالبًا. أي أن مجموع

التيارات الداخلة في نقطة تفرع يساوي مجموع التيارات الخارجة منها.

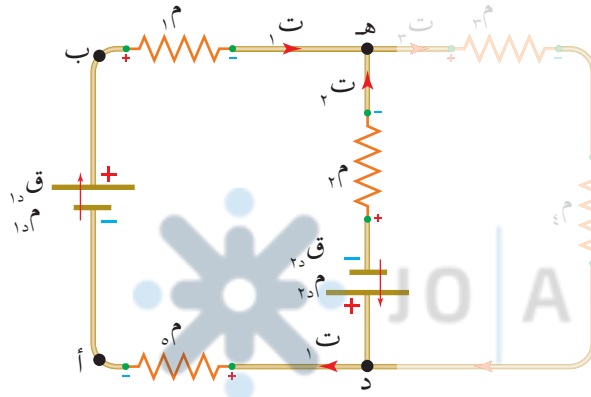
■ (٢-٧-٤) قاعدة كيرشوف الثانية (قاعدة الجهد) Kirchhoff's Second Rule (Potential Rule)

درست سابقاً أن القدرة التي تنتجها البطارية (ق_د) في الدارة المغلقة، تكون مساوية القدرة التي تستهلكها المقاومات في الدارة وبالرجوع إلى العلاقة (٤-١٢)، وباختصار (ت) من طرفي العلاقة يتبين لنا أن مقدار القوة الدافعة الكهربائية يساوي مجموع فروق الجهد بين أطراف المقاومات الداخلية والخارجية للدارة وفق العلاقة:

$$ق_د = ق_١ + ق_٢ + ق_٣$$

$$\text{أي أن: } ق_د - ق_١ - ق_٢ - ق_٣ = \text{صفر}$$

ويمكن تعميم هذه النتيجة عبر أي مسار مغلق من الدارة الكهربائية، أي أن "المجموع الجبري للتغيرات في الجهد الكهربائي عبر عناصر أي مسار مغلق في دارة كهربائية يساوي صفراً". وهذا نص



الشكل (٤-٢٦): قاعدة كيرشوف الثانية.

قاعدة كيرشوف الثانية، وتعد هذه القاعدة إحدى صيغ قانون حفظ الطاقة. فعند دراسة تغيرات الجهد عبر المسار المغلق (أ ب هـ د أ) في الدارة الكهربائية في الشكل (٤-٢٦)، ابتداءً من النقطة (أ) والعودة إلى النقطة نفسها يكون مجموع فروق الجهد صفراً؛ أي أن $ق_د - ق_١ - ق_٢ - ق_٣ = \text{صفر}$. وبشكل عام، عبر أي مسار مغلق تتحقق العلاقة:

$$ق_د + ق_١ + ق_٢ + ق_٣ = \text{صفر} \quad (٤-١٦)$$

للتحقق عملياً من قاعدتي كيرشوف نفذ النشاط الآتي.

نشاط (٤-٣) قاعدتا كيرشوف

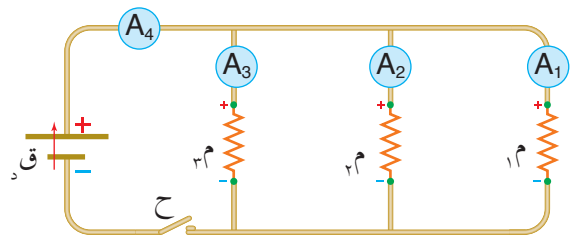
الهدف: التحقق عملياً من قاعدتي كيرشوف.

المواد والأدوات: مصدر قوة دافعة كهربائية عدد (٢)، ومقاومات ثابتة المقدار عدد (٣)، وأميتر عدد (٤)، ومفتاح كهربائي، وفولتميتر، وأسلاك توصيل.

خطوات تنفيذ النشاط:

■ التحقق من قاعدة كيرشوف الأولى

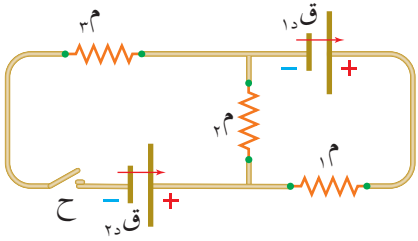
١ ركب الدارة المبينة في الشكل (٤-٢٧/أ).



الشكل (٤-٢٧/أ): قاعدة كيرشوف الأولى.

٢ أغلق الدارة وسجل قراءة كل أميتر (A_4, A_3, A_2, A_1).

٣ ما العلاقة بين قراءة الأميتر (A_4) ومجموع قراءات كل من (A_3, A_2, A_1). ماذا تستنتج؟



■ التحقق من قاعدة كيرشوف الثانية

١ ركب الدارة المبينة في الشكل (٤-٢٧/ب).

٢ قس فرق الجهد بين طرفي كل عنصر من عناصر الدارة

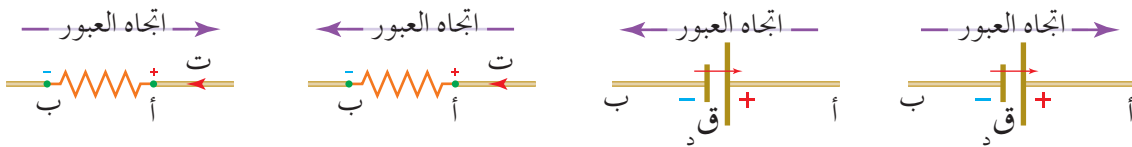
($Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, R_1, R_2, R_3, R_4$) باستخدام الفولتميتر وسجل النتائج. الشكل (٤-٢٧/ب): قاعدة كيرشوف الثانية.

٣ اختر مسارًا مغلقًا عبر الدارة، واجمع فروق الجهد بين طرفي العناصر جميعها في هذا المسار، مع مراعاة توحيد اتجاه الحركة عند الانتقال من عنصر إلى آخر، ماذا تستنتج؟

ولدراسة التغير في الجهد عبر المقاومات أو البطاريات بين نقطتين في دارة، فإنه يتعين مراعاة إشارة التغير في الجهد مع اتجاه عبورها، عند تطبيق قاعدة كيرشوف الثانية كما يأتي:

١ عند عبور البطارية من القطب السالب نحو القطب الموجب يزداد الجهد بمقدار القوة الدافعة الكهربائية لها، وعند عبور البطارية من القطب الموجب نحو القطب السالب يقل الجهد بمقدار القوة الدافعة الكهربائية لها، بغض النظر عن اتجاه التيار الكهربائي.

٢ عند عبور مقاومة في فرع ما باتجاه تيار الفرع يقل الجهد بمقدار ($t \times m$)، وعند عبور المقاومة في فرع ما بعكس اتجاه تيار الفرع يزداد الجهد بمقدار ($t \times m$)، وتعامل المقاومة الداخلية معاملة المقاومة الخارجية لاحظ الشكل (٤-٢٨).



$$ج\text{ب} + ت \times م = ج\text{م}$$

$$ج\text{م} - ت \times م = ج\text{ب}$$

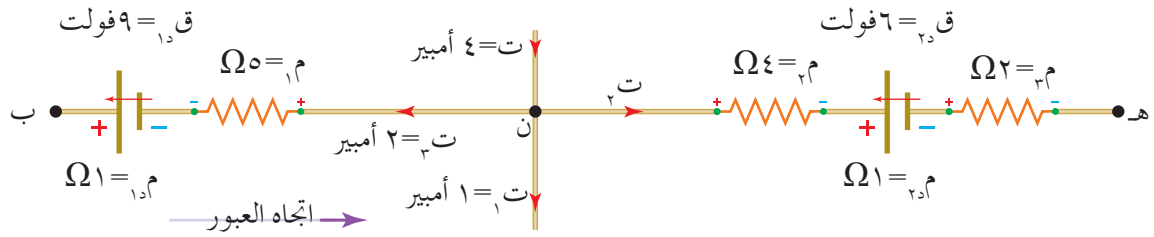
$$ج\text{م} - ق = ج\text{ب}$$

$$ج\text{ب} + ق = ج\text{م}$$

الشكل (٤-٢٨): التغيرات في الجهد عبر المقاومات أو البطاريات.

وبشكل عام يمر التيار الكهربائي في الأسلاك من النقطة الأعلى جهدًا إلى النقطة الأقل جهدًا، ويمكن الاستفادة من قاعدتي كيرشوف في حساب فرق الجهد بين نقطتين، كما يمكن تطبيق القاعدتين عبر مسارات مغلقة ضمن دارات كهربائية، والأمثلة الآتية توضح ذلك.

يُمثل الشكل (٢٩-٤) جزءاً من دائرة كهربائية، معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل جد J_B .



الشكل (٢٩-٤): مثال (٩-٤).

الحل:

أولاً: نجد قيمة التيار الكهربائي T بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى عند نقطة التفرع (ن)

$$\sum I_{\text{الكلية (عند ن)}} = \text{صفر}$$

$$T - T_1 - T_2 - T_3 = 0$$

$$-4 - T_1 - T_2 - T_3 = 0 \Rightarrow T_3 = 1 \text{ أمبير}$$

ثانياً: $J_B = J_B - J_B = 0$

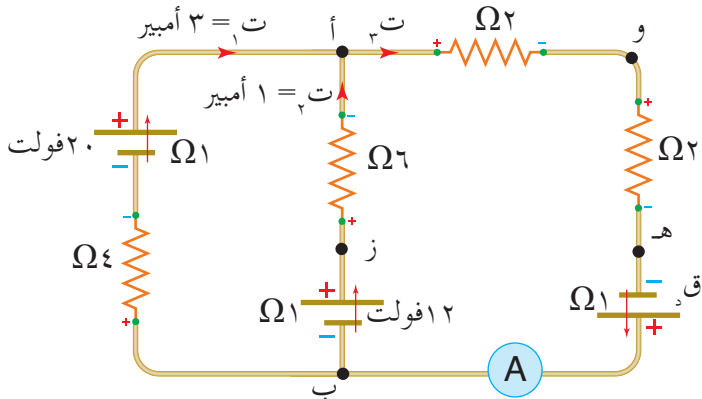
$$J_B = J_C + J_D + J_E$$

$$J_B = J_C - J_D + J_E = (1 + 2 + 4) - (1 + 5) + 6 = 3$$

$$J_B = 3 - 9 + 6 = 0$$

$$J_B = 0 \Rightarrow J_B = 10 \text{ فولت.}$$

وُصِلت دائرة كهربائية كما في الشكل (٤-٣٠)، معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل، أجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٤-٣٠): مثال (٤-١٠).

هل يمكن تبسيط الدارة الكهربائية

لتصبح دارة بسيطة؟ لماذا؟

٢ ﴿جد كلاً من:

٤ التيار الكهربائي (ت٣).

ب ﴿ج﴾ جـ أ ب عبر الفرع الأوسط.

ج القوة الدافعة الكهربائية (ق).

الحل:

لا يمكن تبسيط الدارة لتكون عروة واحدة، وذلك لوجود أكثر من بطارية في أكثر من فرع.

٢ أ تطبيق قاعدة كيرشوف الأولى عند النقطة (أ) نجد:

$$\Sigma \text{ الكلي (عند أ)} = \text{صفر.}$$

$$\bullet = \text{ت}_1 + \text{ت}_2 - \text{ت}_3$$

$$3 + 1 - 2 = 2 \leftarrow 2 = 2 \text{ أمبير}$$

جـ - جـ = جـ ﴿ب﴾

جاء عبر الفرع الأوسط كما في الشكل (٤-٣١).

جـ ا + جـ د + جـ ت م = جـ ب

$$ج_1 = (1+6)1 + 12 - ج_2$$

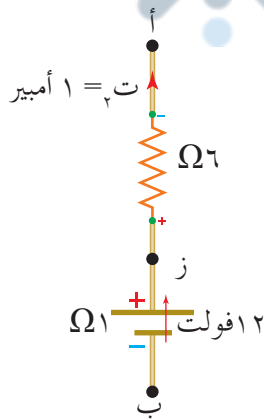
جواب = $12 - 7 = 5$ فولت

ج) لإيجاد q نجد جـ q عبر المسار المغلق (أ و هـ ب ز أ):

ج_ا + ز_د ق + ز_د ت م = ج_ا

$$ج_1 = (6 + 1)1 - (1 + 2 + 2)4 - 12 + ج_3 + ج_4$$

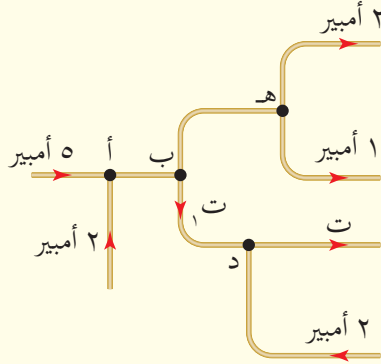
ج. + ق. + ۱۲ - ۲۰ - ۷ = ۰ $\Leftarrow$ ق. = ۱۵ فولت



الشكل (٤-٣١): مثال (٤-١٠).

١ اذكر نص قاعدتي كيرشوف الأولى والثانية.

٢ يمثل الشكل (٣٢-٤) جزءاً من دائرة كهربائية، مستعيناً بالبيانات المثبتة في الشكل احسب مقدار التيار الكهربائي (ت).



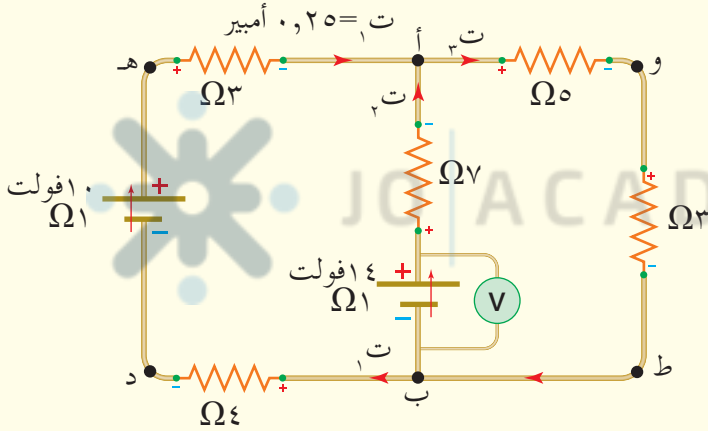
الشكل (٣٢-٤): سؤال (٢).

٣ مستخدماً البيانات المثبتة في الشكل (٣٣-٤) احسب:

أ ت_٢، ت_٣.

ب قراءة الفولتميتر.

ج القدرة الكهربائية المستهلكة في المقاومة (٥) أوم.

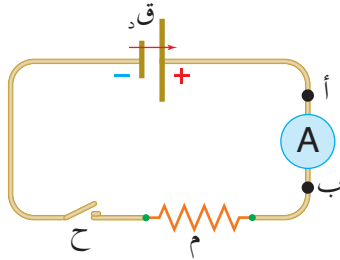


د ج- ب أ

الشكل (٣٣-٤): سؤال (٣).

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ في الشكل (٤-٣٤) تنعدم قراءة الأميتر بين النقطتين (أ، ب) عند فتح الدارة بسبب انعدام:



الشكل (٤-٣٤): سؤال (١) فقرة (١).

أ المجال الكهربائي بينهما

ب المقاومة الخارجية

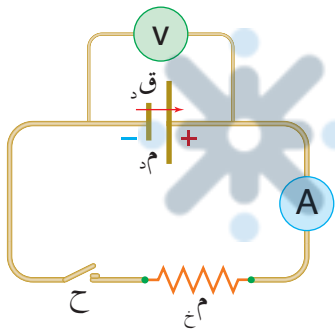
ج القوة الدافعة الكهربائية

د مقاومة الأسلاك

أجب عن الفقرات (٢، ٣، ٤) بالاعتماد على الشكل (٤-٣٥).

٢ إذا كانت قراءة الفولتميتر قبل غلق المفتاح (١٠) فولت، وبعد غلق المفتاح (٨) فولت،

وقراءة الأميتر (٢) أمبير فإن قيمة كل من (م، م_٢) بالأوم على الترتيب:



الشكل (٤-٣٥): سؤال (١) الفقرات (٢، ٣، ٤).

أ (٢، ٢)

ب (٢، ٤)

ج (١، ٤)

د (١، ١)

٣ يكون الهبوط في جهد البطارية بالفولت:

أ ١٠

ب ٨

ج ٤

د ٢

٤ أي من الآتية تمثل قراءة الفولتميتر والمفتاح مفتوح:

أ ت م

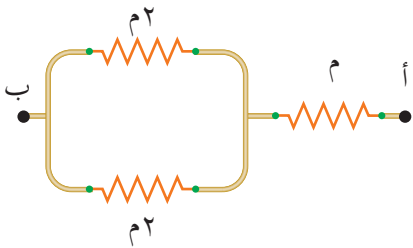
ب ق م

ج ق-٢ ت م

د ت م

٥ في الشكل (٤-٣٦) تكون المقاومة المكافئة لمجموعة

المقاومات بين النقطتين (أ، ب):



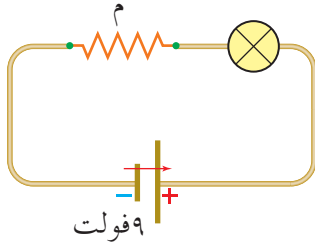
الشكل (٤-٣٦): سؤال (١) فقرة (٥).

أ $\frac{3}{2} م$

ب ٥ م

ج ٢ م

د $\frac{5}{4} م$



الشكل (٤-٣٧): سؤال (١) فقرة (٦).

٦ مصباح كهربائي كتب عليه (٣ فولت، ٢,٥ واط)، يراد إضاءته من بطارية قوتها الدافعة الكهربائية (٩ فولت، ولحماية المصباح من التلف أضيفت مقاومة خارجية (م) إلى الدارة، كما في الشكل (٤-٣٧)، فإن قيمة المقاومة (م) بوحدة الأوم:

د ٠,١

ج ٠,٨

ب ٢,٥

أ ٧,٢

٧ يُعد قانون كيرشوف الأول صيغة من صيغ قانون حفظ:

د المادة

ج الطاقة الميكانيكية

ب الشحنة

أ الزخم

٢ فسر العبارات الآتية:

أ تزداد مقاومة الموصلات الفلزية بارتفاع درجة حرارتها.

ب عند توصيل المقاومات بطريقة التوازي، تكون المقاومة الأقل مقداراً هي الأكثر استهلاكاً للقدرة.

ج عند توصيل المقاومات بطريقة التوالي، تكون المقاومة الأكبر مقداراً هي الأكثر استهلاكاً للقدرة.

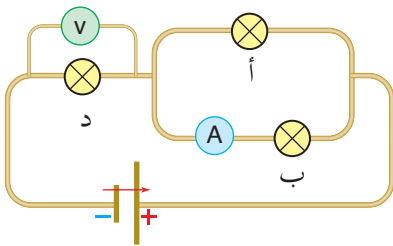
المقاومة (أ)		المقاومة (ب)	
ج (فولت)	ت (أمبير)	ج (فولت)	ت (أمبير)
٠,٢٥	٠,٥	٣	٠,٤
١	١	٦	٠,٨
٢	١,٤	٩	١,٢
٣	١,٧	١٢	١,٦
٣,٨	١,٩	١٥	٢

٣ يمثل الجدول المجاور قيم التيار الكهربائي في مقاومتين

(أ، ب)، عند تغيير فرق الجهد بين طرفي كل منهما.

مستخدماً البيانات الواردة في الجدول، حدد أي

المقاومتين أومية، واحسب مقدارها.



الشكل (٤-٣٨): سؤال (٤).

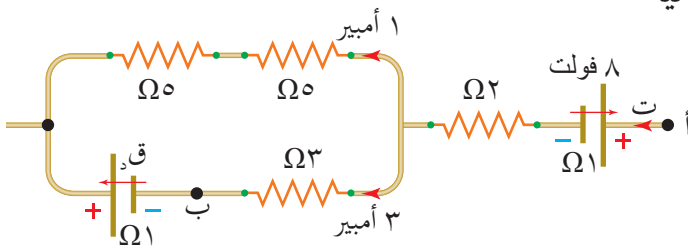
٤ إذا كانت المصابيح (أ، ب، د) في الشكل (٤-٣٨) متماثلة،

وضح ما يحصل لكل من قراءة الأميتر والفولتميتر، إذا

احترق فتيل المصباح (أ).

٥ يمثل الشكل (٤-٣٩) جزءاً من دائرة كهربائية

مستعينة بالبيانات المثبتة في الشكل جد:

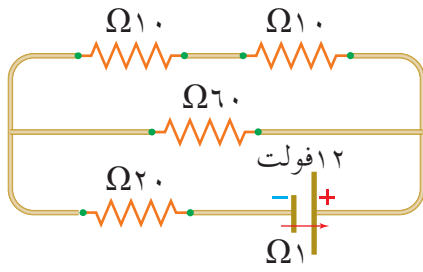


الشكل (٤-٣٩): سؤال (٥).

أ جـ أ ب

ب ق د

٦ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٤-٤٠)، جد:



الشكل (٤-٤٠): سؤال (٦).

أ) المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات.

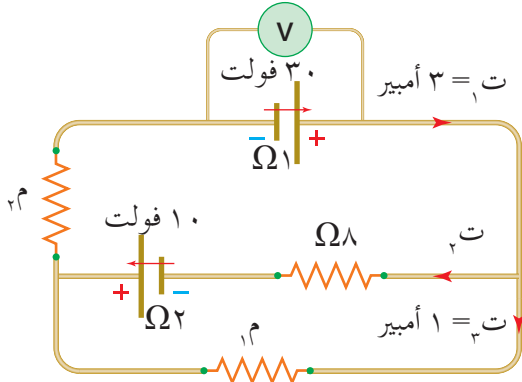
ب) التيار الكهربائي المار في المقاومة 20Ω .

ج) الهبوط في جهد البطارية.

د) جهد المقاومة 60Ω .

هـ) القدرة المستهلكة في المقاومة 10Ω .

٧ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل



الشكل (٤-٤١): سؤال (٧).

(٤-٤١)، جد:

أ) التيار الكهربائي المار في المقاومة 8Ω .

ب) مقدار كل من المقاومتين $(1 \text{ م}, 2 \text{ م})$.

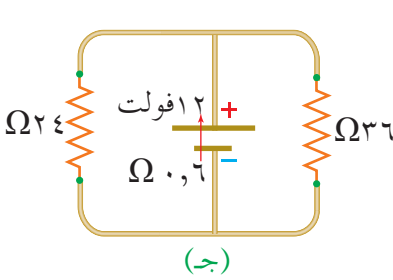
ج) قراءة الفولتميتر.

٨ مستعينًا بالبيانات المثبتة في الدارات الكهربائية (أ، ب، ج) في الشكل (٤-٤٢)، احسب:

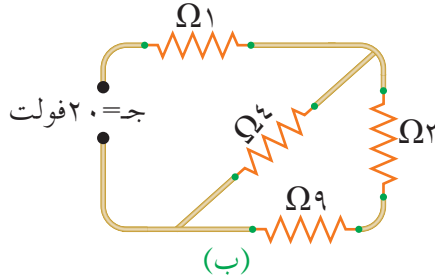
أ) المقاومة المكافئة لمجموعة المقاومات في كل دارة.

ب) التيار الكهربائي المار في كل دارة.

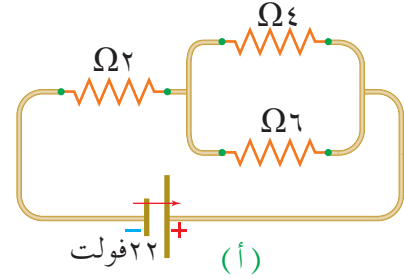
ج) القدرة المستهلكة في كل مقاومة من الدارة (ج).



(ج)



(ب)



(أ)

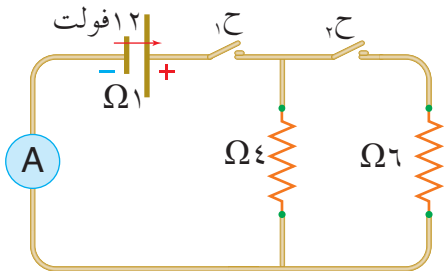
الشكل (٤-٤٢): سؤال (٨).

٩ احسب قراءة الأميتر في الدارة الكهربائية المبينة في الشكل

(٤-٤٣) في الحالتين الآتيتين:

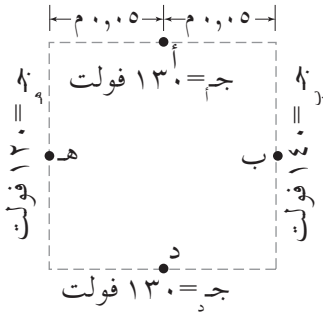
أ) عند غلق المفتاح (ح)، فقط.

ب) عند غلق المفتاحين (ح، و ح)، معًا.



الشكل (٤-٤٣): سؤال (٩).

١ تقع أربع نقاط (أ، ب، د، هـ) في منطقة مجال كهربائي منتظم. معتمداً على القيم المثبتة في الشكل المجاور أجب عما يأتي:



أ) ما المقصود بسطح تساوي الجهد؟

ب) ارسم واحداً من سطوح تساوي الجهد الكهربائي، وثلاثة من خطوط المجال الكهربائي محدداً على هذه الخطوط اتجاه المجال.

ج) احسب مقدار المجال الكهربائي المنتظم.



٢ في جهاز إنعاش القلب يعطى المريض شحنة «صدمة كهربائية» عن طريق السماح لمواسع كهربائي بتفريغ شحنته عبر منطقة قلب المريض كما هو مبين في الشكل. إذا كانت موسعة المواسع (٢٠) ميكروفاراد، وشحن باستخدام مصدر فرق جهده (٦٠٠٠) فولت. فأجب عما يأتي:

أ) ما أهمية المواسعات؟

ب) احسب شحنة المواسع والطاقة المخزنة فيه.

ج) يحدث عادة التفريغ الكهربائي خلال مدة زمنية قصيرة، تقريباً (٢) ملي ثانية. احسب متوسط التيار الكهربائي المار عبر منطقة قلب المريض.



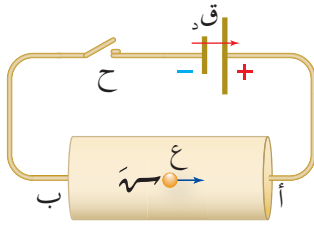
سلك نحاس عازل شبكة أسلاك موصلة

٣ تستخدم الأكبال الكهربائية لنقل الطاقة الكهربائية وتوجد بأشكال مختلفة، ويبين الشكل مقطعاً من كبل كهربائي.

أ) يحتوي الكبل على طبقة رقيقة من شبكة مصنوعة من مادة موصلة، ما الهدف من هذه الشبكة؟

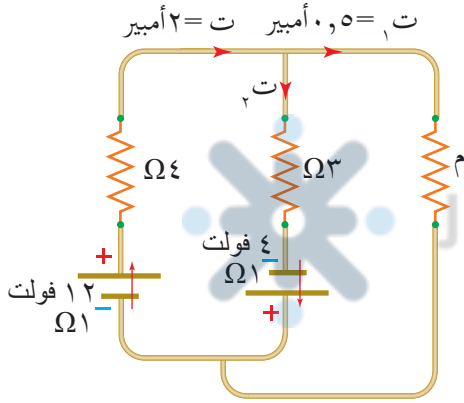
ب) فسر: يلاحظ أحياناً ظهور وميض أزرق حول أكبال الكهرباء ذات الجهد العالي.

ج) إذا كانت مقاومة النحاس $(1.7 \times 10^{-8}) \Omega \cdot \text{m}$ فاحسب مقاومة كبل من النحاس طوله (٥٠) م، ومساحة مقطعه $(2.5 \times 10^{-6}) \text{ m}^2$.



٤ يمر تيار كهربائي (١٠) أمبير في موصل نحاسي متصل مع بطارية كما هو موضح في الدارة الكهربائية المبينة في الشكل المجاور عند إغلاق المفتاح (ح)، ادرس الشكل، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

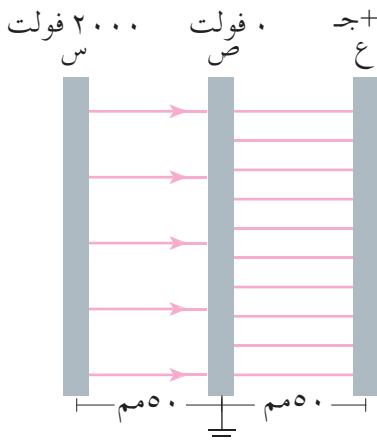
- أ) ما اتجاه المجال الكهربائي الناشئ في الموصل؟ وما اتجاه التيار الكهربائي فيه؟
 ب) إذا علمت أن الشحنة (س) تتحرك بسرعة انسيابية (ع) داخل الموصل بالاتجاه المبين في الشكل، فما نوع الشحنة (س)؟
 ج) احسب السرعة الانسيابية للشحنات (س)، إذا علمت أن مساحة مقطع الموصل تساوي (٢) مم^٢ وأن $(\dot{N} = 8,5 \times 10^{21})$ إلكترون/م^٣.
 د) ما دور البطارية في الدارات الكهربائية المغلقة؟



- ٥ اعتماداً على البيانات المثبتة في الشكل جد:
 أ) التيار الكهربائي (ت).
 ب) المقاومة (م).
 ج) المقاومة (ρ) لمادة المقاومة (م) إذا علمت أن طولها (٠,٨) م ومساحة مقطعها (7×10^{-10}) م^٢.

٦ معتمداً على البيانات المثبتة في الشكل، والذي يبين ثلاث صفائح موصلة مختلفة في الجهد. أجب عن الأسئلة الآتية:

أ) كيف يتناسب عدد خطوط المجال الكهربائي مع الكثافة السطحية للشحنة؟



- ب) احسب:
 ١) مقدار المجال الكهربائي بين الصفيحتين (س) و (ص).
 ٢) المجال الكهربائي بين الصفيحتين (ص) و (ع) مقداراً واتجاهاً.
 ٣) جهد الصفيحة (ع).



الفصل الدراسي الثاني

المجال المغناطيسي

The Magnetic Field

كان الاعتقاد السائد في الماضي ولمدة زمنية طويلة أن الكهرباء والمغناطيسية علمان منفصلان، حتى اكتشف أورستد الآثار المغناطيسية للتيار الكهربائي عام ١٨١٩م، وأدى اكتشافه إلى تطوير حياة الإنسان وتحسينها. ومن ثم توالى إسهامات الكثير من العلماء في هذا المجال، حتى أصبحت المغناطيسية في عصرنا الحالي تدخل في تركيب أغلب الأجهزة الكهربائية والإلكترونية. فما العوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الكهربائي؟ وهل تتغير هذه العوامل بتغير شكل الموصل؟ وكيف نحصل على مغناطيس يمكن التحكم في مجالها المغناطيسي؟

هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

يعد جهاز التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) أحد أهم الأجهزة الطبية التي تستخدم في تصوير أجزاء مختلفة من الجسم كالدماع والنخاع الشوكي، وإظهار تشريحها لمعرفة حالتها الصحية.

الفصل الخامس

في هذا الفصل

(١-٥)

المجال المغناطيسي.

(٢-٥)

القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة نقطية متحركة في مجال مغناطيسي منتظم.

(٣-٥)

حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم.

(٤-٥)

قوة لورنتز.

(٥-٥)

القوة المغناطيسية التي يؤثر بها مجال مغناطيسي في موصل مستقيم يحمل تياراً كهربائياً.

(٦-٥)

المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي.

(٧-٥)

القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين يمر فيهما تياران كهربائيان.

(٨-٥)

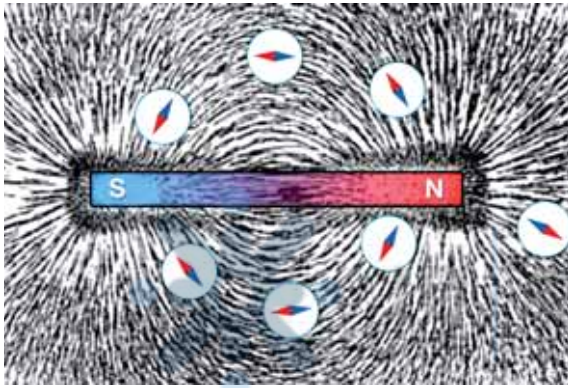
المواد المغناطيسية.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

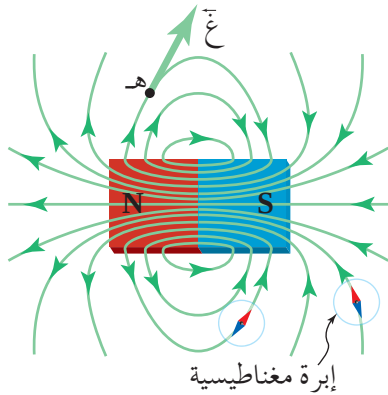
- * توضّح المقصود بالمجال المغناطيسي، والمجال المغناطيسي المنتظم.
- * تقارن بين تأثير المجالين الكهربائي والمغناطيسي في الشحنات الكهربائية.
- * تستنتج العوامل التي تعتمد عليها القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في شحنة نقطية متحركة فيه، وفي موصل يمر فيه تيار كهربائي، وتعبّر عن القوة المغناطيسية رياضياً.
- * تتوصل بالتجربة إلى أثر المجال المغناطيسي في موصل يحمل تياراً كهربائياً.
- * تستخدم قاعدة اليد اليمنى في تحديد اتجاه القوة المغناطيسية، والمجال المغناطيسي.
- * تذكر العوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي (قانون بيو – سافار).
- * تذكر العلاقات الرياضية للمجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي في كلٍّ من: موصل مستقيم طويل، وملف دائري، وملف لولبي.
- * تطبّق العلاقات الرياضية المتعلقة بالقوة المغناطيسية والمجال المغناطيسي في حلّ مسائل حسابية.
- * تتعرف تطبيقات تكنولوجية لحركة الأجسام المشحونة في مجالات مغناطيسية منتظمة.
- * تتوصل إلى العلاقة الرياضية للقوة المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين يمر فيهما تياران كهربائيان.
- * تذكر أنواع المواد المغناطيسية، وتقارن بينها.



درست في الكهرباء أن الشحنة الكهربائية محاطة بمجال كهربائي، وتحيط المجالات المغناطيسية بالمغناط، فلكل مغناطيس منطقة حوله تظهر فيها آثاره المغناطيسية تسمى المجال المغناطيسي، ويعد المجال المغناطيسي خاصية للحيز المحيط بالمغناطيس، ويرمز للمجال المغناطيسي بالرمز ($\vec{B}$). يُمثَّلُ المجال المغناطيسي حول المغناطيس بخطوط وهمية تسمى خطوط المجال المغناطيسي. ويعرف **خط المجال المغناطيسي** بأنه المسار الذي يسلكه قطب شمالي مفرد (افتراضي) عند وضعه حرًا في أي نقطة داخل المجال المغناطيسي.



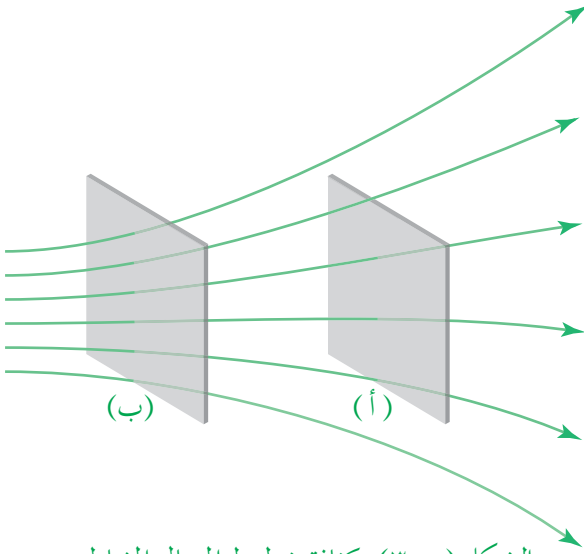
الشكل (١-٥): تخطيط المجال المغناطيسي.



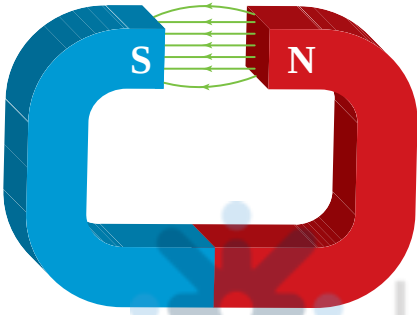
الشكل (٢-٥): خطوط المجال المغناطيسي مقفلة.

ويمكن استخدام برادة الحديد أو الإبرة المغناطيسية لتخطيط المجال المغناطيسي كما في الشكل (١-٥). تمتاز خطوط المجال المغناطيسي عن خطوط المجال الكهربائي بأنها مقفلة حيث تخرج من القطب الشمالي للمغناطيس وتدخل في القطب الجنوبي خارج المغناطيس، مكاملة مسارها داخل المغناطيس من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي كما يتضح في الشكل (٢-٥)، ويفسر ذلك عدم وجود قطب مغناطيسي مفرد.

يحدد اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة ما باتجاه المماس لخط المجال عند تلك النقطة، لاحظ ذلك عند النقطة (هـ) في الشكل (٢-٥)، وعمليًا يتحدد اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة فيه باستخدام إبرة مغناطيسية توضع عند تلك النقطة، حيث يشير القطب الشمالي للإبرة المغناطيسية إلى اتجاه المجال المغناطيسي عندها. والمجال المغناطيسي له اتجاه واحد عند كل نقطة؛ لذلك فخطوطه لا تتقاطع.



الشكل (٣-٥): كثافة خطوط المجال المغناطيسي .



الشكل (٤-٥): المجال المغناطيسي المنتظم بين قطبي مغناطيس .

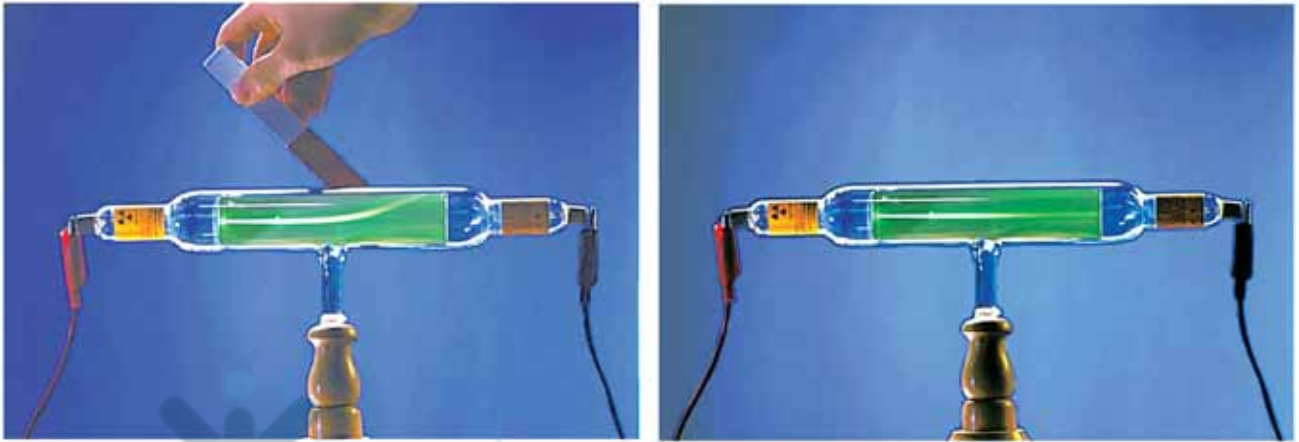
ويعبر عن مقدار المجال المغناطيسي في منطقة ما بكثافة خطوط المجال المغناطيسي في تلك المنطقة كما يوضح الشكل (٣-٥).

وقد يكون المجال المغناطيسي منتظمًا أو غير منتظم، ويظهر من الشكل (٢-٥) أن المجال المغناطيسي الناتج من المغناطيس المستقيم ليس منتظمًا، فخطوط المجال المغناطيسي تشير إلى اتجاهات مختلفة، بينما يكون منتظمًا تقريبًا في المنطقة المحصورة بين قطبي مغناطيس على شكل حرف (C) بعيدًا عن الأطراف كما في الشكل (٤-٥). ويعرف **المجال المغناطيسي المنتظم** في منطقة ما بأنه المجال المغناطيسي الثابت مقدارًا واتجاهًا عند نقاطه جميعها. ويمثل بخطوط مستقيمة متوازية، المسافات بينها متساوية.

مراجعة (١-٥)

- ١ اذكر ثلاثًا من خصائص خطوط المجال المغناطيسي.
- ٢ عرف كلاً من خط المجال المغناطيسي، والمجال المغناطيسي المنتظم.
- ٣ إذا علمت أن السطحين (أ، ب) في الشكل (٣-٥) لهما المساحة نفسها فأَي منهما يكون مقدار المجال المغناطيسي عنده أكبر؟ وضح إجابتك.
- ٤ فسر: تعد خطوط المجال المغناطيسي مقفلة.

إذا قربت مغناطيساً من أنبوب أشعة المهبط، فسوف تلاحظ أن حزمة الإلكترونات انحرقت عن مسارها، لاحظ الشكل (٥-٥)، يدل ذلك على أن المجال المغناطيسي أثر بقوة مغناطيسية في هذه الشحنات المتحركة، وأجبرها على تغيير مسارها. ما العوامل المؤثرة في القوة المغناطيسية؟ وكيف تحسب القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة كهربائية؟



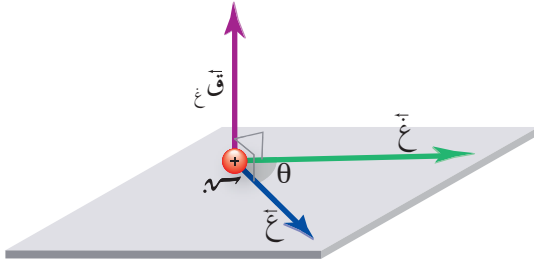
الشكل (٥-٥): انحراف حزمة الإلكترونات في أنبوب أشعة المهبط بتأثير المغناطيس.

وجد تجريبياً أن القوة المغناطيسية ($\vec{F}_m$) المؤثرة في جسيم مشحون متحرك في مجال مغناطيسي عند نقطة ما تتناسب طردياً مع كل من شحنة الجسيم الكهربائية (q)، والمجال المغناطيسي ($\vec{B}$)، وسرعة الجسيم ($\vec{v}$) التي يتحرك بها داخل المجال المغناطيسي عند تلك النقطة، وتتناسب القوة المغناطيسية طردياً أيضاً مع ($\sin \theta$)؛ حيث (θ): الزاوية المحصورة بين اتجاه كل من ($\vec{v}$) و ($\vec{B}$). وعليه فإن القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة متحركة داخل مجال مغناطيسي يعبر عنها بالعلاقة:

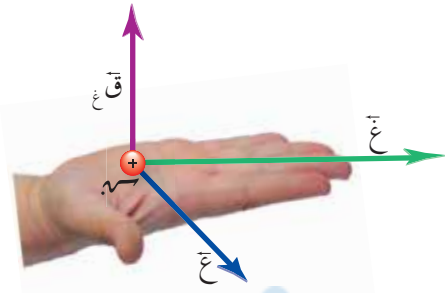
$$\vec{F}_m = q \vec{v} \times \vec{B}$$

ويحسب مقدار القوة المغناطيسية من العلاقة الرياضية الآتية:

$$F_m = q v B \sin \theta \quad \text{..... (٥-١)}$$



الشكل (٦-٥): القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة متحركة عمودية دائماً على المستوى الذي يتشكل من المتجهين $(\vec{v})$ و $(\vec{B})$.



الشكل (٧-٥): قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة موجبة متحركة داخل مجال مغناطيسي.

وبالاعتماد على العلاقة (١-٥) يمكن تعريف **المجال المغناطيسي** عند نقطة ما بأنه القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة لحظة مرورها بسرعة (١) م/ث عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي عند تلك النقطة. ويكون اتجاه القوة المغناطيسية دائماً عمودياً على المستوى الذي يتشكل من المتجهين $(\vec{v})$ و $(\vec{B})$ مهما كانت الزاوية بين اتجاهيهما كما يبين الشكل (٦-٥).

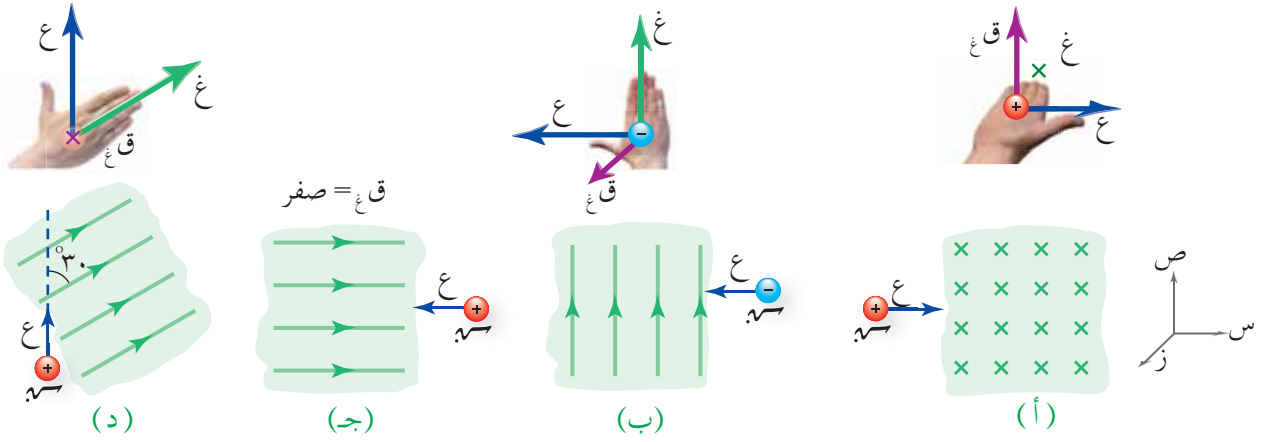
ويمكن تحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الشحنة الموجبة باستخدام قاعدة اليد اليمنى كما في الشكل (٧-٥)، حيث يشير الإبهام إلى اتجاه السرعة، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسي، عندها يشير المتجه العمودي على باطن الكف والخارج منه إلى اتجاه القوة المغناطيسية. وعندما تكون الشحنة سالبة، فإننا نطبق قاعدة اليد اليمنى، ثم يكون اتجاه القوة المغناطيسية عكس الاتجاه الناتج.

ونستنتج من العلاقة (١-٥) أن القوة المغناطيسية المؤثرة في جسيم مشحون في مجال مغناطيسي تنعدم في حالتين؛ إذا كان الجسيم المشحون ساكناً ($v = 0$)، وإذا كان اتجاه السرعة موازياً لاتجاه المجال المغناطيسي ($\theta = 0^\circ$ ، أو $\theta = 180^\circ$). ونستنتج من ذلك أن المجال المغناطيسي لا يؤثر في الشحنة المتحركة إلا إذا قطعت خطوطه. وتكون القوة المغناطيسية أكبر ما يمكن عندما يكون اتجاه السرعة $(\vec{v})$ عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي ($\theta = 90^\circ$). وفي النظام العالمي للوحدات يقاس المجال المغناطيسي بوحدة تسمى تسلا، ويمكن اشتقاقها من العلاقة (١-٥) عندما تكتب بالصورة الآتية:

$$[\vec{F}] = [\vec{q}][\vec{v}][\vec{B}] \Rightarrow [\vec{B}] = \frac{[\vec{F}]}{[\vec{q}][\vec{v}]} = \frac{\text{نيوتن.ث}}{\text{كولوم.م}} = \text{تسلا}$$

وتُعرف **التسلا** بأنها المجال المغناطيسي الذي يؤثر بقوة (١) نيوتن في شحنة (١) كولوم تتحرك بسرعة (١) م/ث باتجاه يعامد اتجاه المجال المغناطيسي.

قذف جسيم شحنته (٤) ميكروكولوم، بسرعة (6×10^6) م/ث، داخل مجال مغناطيسي منتظم مقداره (٠,٠١) تسلا. جد القوة المغناطيسية مقداراً واتجهاً المؤثرة في الجسيم لحظة دخوله منطقة المجال المغناطيسي المنتظم في الحالات المبينة في الشكل (٨-٥).



الشكل (٨-٥): مثال (١-٥).

الحل:

بتطبيق العلاقة الرياضية $(q \cdot v \cdot \sin \theta)$ ، نجد أن:

أ) $q \cdot v \cdot \sin \theta = 4 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^6 \times \sin 90^\circ = 24 \text{ نيوتن}$
وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى، يشير الإبهام إلى اتجاه السرعة نحو المحور السيني الموجب، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه المجال المغناطيسي نحو المحور الزيني السالب ويمكن أن نعبر عن اتجاهه بالرمز $\otimes$ ، فيكون اتجاه القوة المغناطيسية باتجاه المحور الصادي الموجب (+ص). لاحظ اليد فوق الشكل (٨-٥/أ).

ب) $q \cdot v \cdot \sin \theta = 4 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^6 \times \sin 90^\circ = 24 \text{ نيوتن}$
وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى ومن ثم عكس الاتجاه الناتج لأن الشحنة سالبة نجد أن اتجاه (ق) يكون باتجاه المحور الزيني الموجب ويمكن أن نعبر عن اتجاهه بالرمز $\odot$. لاحظ اليد فوق الشكل (٨-٥/ب).

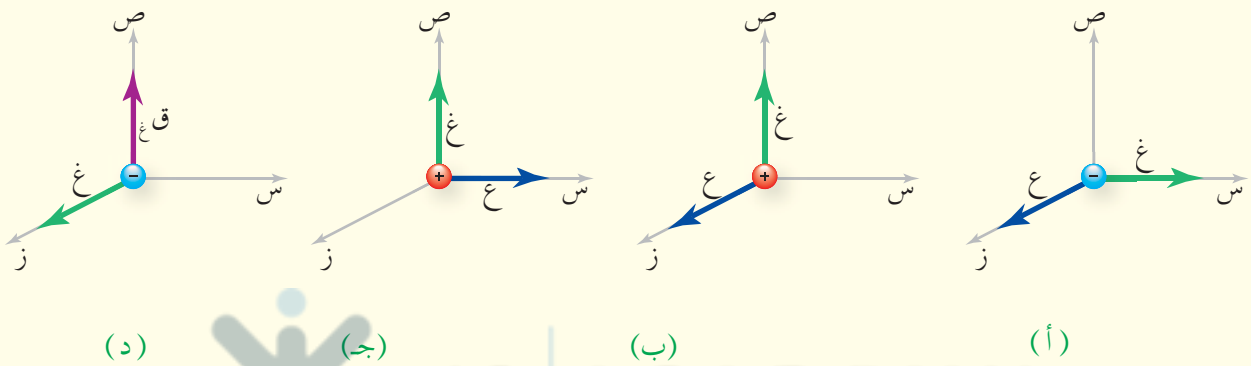
ج) $q \cdot v \cdot \sin \theta = 4 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^6 \times \sin 90^\circ = 24 \text{ نيوتن}$
د) $q \cdot v \cdot \sin \theta = 4 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^6 \times \sin 90^\circ = 24 \text{ نيوتن}$
الزيني السالب $\otimes$. لاحظ اليد فوق الشكل (٨-٥/د).

١ كيف يمكن لشحنة كهربائية أن تتحرك في مجال مغناطيسي ولا تتأثر بقوة مغناطيسية؟

٢ افسر: عند قذف نيوترون في مجال مغناطيسي، فإنه لا يتأثر بقوة مغناطيسية.

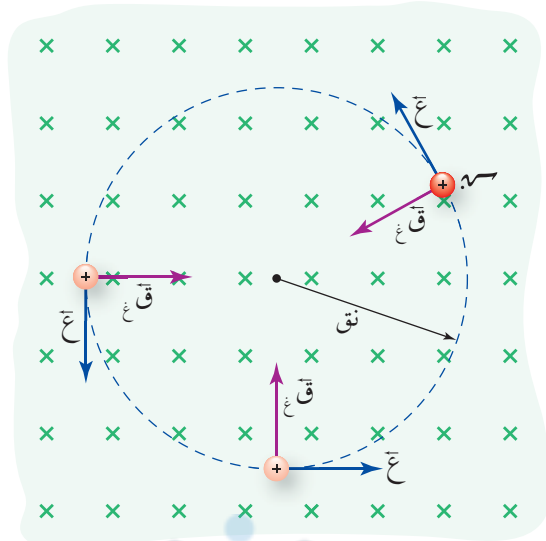
٣ ماذا نعني بقولنا إن المجال المغناطيسي لمغناطيس يساوي (5×10^{-3}) تسلا؟

٤ باستخدام قاعدة اليد اليمنى حدد اتجاه الكمية الفيزيائية المجهولة في الشكل (٥-٩).



الشكل (٥-٩): سؤال (٤).

تعلمت في الدرس السابق أن الجسيم المشحون عندما يتحرك داخل مجال مغناطيسي باتجاه لا يوازي اتجاه المجال، فإنه يتأثر بقوة مغناطيسية اتجاهها دائماً عمودي على اتجاه كل من المجال



الشكل (١٠-٥): القوة المغناطيسية قوة مركزية.

المغناطيسي وسرعة الجسيم المشحون. وإذا كان متجه السرعة عمودياً على متجه المجال المغناطيسي ($\theta = 90^\circ$) كما يظهر في الشكل (١٠-٥) فإن القوة المغناطيسية تجبر الجسيم على الحركة في مسار دائري، وستقتصر دراستنا على هذه الحالة.

لاحظ أن اتجاه القوة المغناطيسية باستمرار نحو مركز المسار الدائري، لذلك تعد القوة المغناطيسية قوة مركزية تكسب الجسيم المشحون تسارعاً مركزياً باتجاهها يمكن حسابه من العلاقة: (ت) $\left(\frac{v^2}{r} = \frac{F_m}{m} \right)$ ،

ويمكن حساب نصف قطر المسار الدائري الذي يسلكه الجسيم المشحون في هذه الحالة بتطبيق القانون الثاني لنيوتن:

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

حيث (ت) $\left(\frac{v^2}{r} \right)$: التسارع المركزي للجسيم، و (ع): سرعة الجسيم، و (نق): نصف قطر المسار الدائري، و (ك): كتلة الجسيم المشحون.

بإهمال قوة الجاذبية المؤثرة في الجسيم المشحون، فإن القوة المغناطيسية (ق_غ) هي القوة المحصلة المركزية المؤثرة في الجسيم كما في الشكل (١٠-٥):

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

وعليه، فإن نصف قطر مسار الجسيم الدائري يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{نق} = \frac{\text{ك ع}}{\text{س.م غ}} \dots\dots\dots (٢-٥)$$

وتكمن أهمية هذه العلاقة في إمكانية التحكم في مقدار نصف قطر مسار الجسيم المشحون المتحرك في المجال المغناطيسي عن طريق التحكم في كميات فيزيائية يمكن قياسها مثل السرعة والمجال المغناطيسي، أو تحديدها مثل الشحنة والكتلة، كما ستتعلم لاحقاً.

ولأن اتجاه القوة المغناطيسية عمودي باستمرار على اتجاه الإزاحة التي يحققها الجسيم المشحون المتحرك في المجال المغناطيسي، فإن القوة المغناطيسية لا تبذل شغلاً عليه، ووفق مبرهنة (الشغل-الطاقة الحركية) ($\Delta \text{ط ع} = \text{ش}$)، فإن الطاقة الحركية للجسيم لا تتغير؛ ما يعني أن مقدار سرعته يبقى ثابتاً، فالمجال المغناطيسي وإن كان يغير اتجاه حركة الجسيم باستمرار ويجبره على الحركة في مسار دائري إلا أنه لا يكسب الجسيم طاقة حركية ولا يسحبها منه، فتبقى سرعته ثابتة، ولهذا يستخدم المجال المغناطيسي في المسارعات النووية وغيرها من الأجهزة الكهربائية لتوجيه الجسيمات المشحونة والتحكم في مسارها دون تغيير مقدار سرعتها، في حين يستخدم المجال الكهربائي لتسريع هذه الجسيمات.

مثال (٢-٥)

دخل جسيم مشحون كتلته (2×10^{-10}) كغ وشحنته (2) ميكروكولوم مجالاً مغناطيسياً مقداره $(0,2)$ تسلا بسرعة مقدارها (310) م/ث باتجاه عمودي على اتجاه المجال المغناطيسي، احسب:

- ١ مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيم.

- ٢ التسارع المركزي الذي اكتسبه الجسيم.

- ٣ نصف قطر مسار الجسيم.

- ٤ مقدار سرعة الجسيم بعد مرور (3) ثوان على وجوده داخل المجال المغناطيسي.

الحل:

$$١ \text{ ق غ} = \text{س.م غ جا } \theta$$

$$= 2 \times 10^{-10} \times 310 \times 0,2 \times 90 \text{ جا} \Leftarrow \text{ق غ} = 0,4 \times 10^{-3} \text{ نيوتن}$$

٢ ق مركزية = ق غ = ك ت مركزي

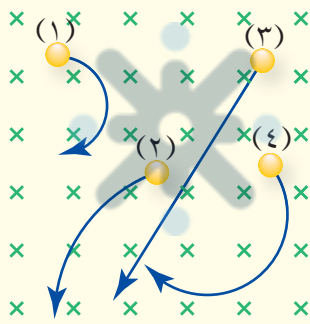
$$٠,٤ \times ١٠^{-٣} = ٢ \times ١٠^{-١٠} \text{ ت مركزي} \Leftarrow \text{ت مركزي} = ٠,٢ \times ١٠^{-٧} \text{ م/ث}^٢$$

$$\text{٣ نق} = \frac{\text{ك ع}}{\text{س.غ}}$$

$$= \frac{٢ \times ١٠^{-١٠} \times ٣١٠}{٢ \times ١٠^{-٦} \times ٠,٢} \Leftarrow \text{نق} = ٠,٥ \text{ م}$$

٤ القوة المغناطيسية لا تغير مقدار سرعة الجسيم، ولكن تغير اتجاه السرعة فقط، ولذلك فإن مقدار سرعة الجسيم سيبقى (٣١٠) م/ث.

مراجعة (٥-٣)

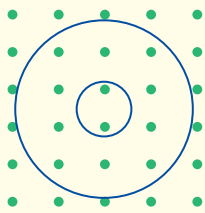


الشكل (٥-١١): سؤال (١).

١ أدخلت أربعة جسيمات متماثلة في الكتلة والسرعة بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم، فاتخذت المسارات الموضحة في الشكل (٥-١١)، أجب عما يأتي:

أ حدد نوع شحنة كل من الجسيمات الأربعة، موضحة ذلك.

ب رتب الجسيمات تنازلياً وفق مقدار شحنة كل منها.



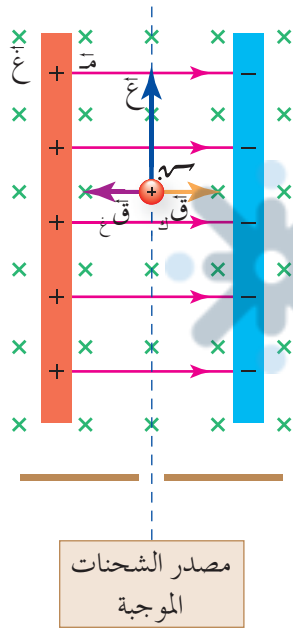
الشكل (٥-١٢): سؤال (٢).

٢ يمثل الشكل (٥-١٢) مساراً دائرياً لكل من إلكترون وبروتون، يتحركان داخل مجال مغناطيسي بالسرعة نفسها، إذا علمت أن كتلة البروتون أكبر من كتلة الإلكترون، فحدد أي المسارين للإلكترون وأيها للبروتون، ثم حدد على المسار اتجاه الحركة لكل منهما.

تحتوي بعض الأجهزة الكهربائية المستخدمة في الطب والصناعة والأبحاث العلمية على مجالين متعامدين؛ مجال كهربائي منتظم ومجال مغناطيسي منتظم، وفي هذه الحالة فإن الجسيمات المشحونة المتحركة في المجالين المتعامدين تتأثر بقوتين معاً إحداهما كهربائية والأخرى مغناطيسية، وتسمى القوة المحصلة للقوتين الكهربائية والمغناطيسية **قوة لورنتز**، وتحسب من العلاقة الآتية:

$$\vec{Q}_{\text{لورنتز}} = \vec{Q}_k + \vec{Q}_m \dots\dots\dots (٣-٥)$$

مثال (٣-٥)



في الشكل (١٣-٥) صفيحتان متوازيتان مشحونتان، جهد الصفيحة الموجبة (٧,٥) فولت، وجهد الصفيحة السالبة (-٧,٥) فولت، والبعـد بينهما (١٠) سم. ويمر بينهما جسيم مشحون شحنته (+٤) ميكروكولوم، وبسرعة مقدارها (٣٠٠) م/ث باتجاه المحور الصادي الموجب، والصفيحتان مغمورتان في مجال مغناطيسي منتظم (٠,٥) تسلا اتجاهه نحو المحور الزيني السالب (⊗).

١) جد القوة المحصلة (لورنتز) المؤثرة في الشحنة مقداراً واتجهاً، وصف حركة الجسيم.

٢) إذا كانت سرعة الجسيم أكبر من (٣٠٠) م/ث، فماذا سيحدث لحركته؟

الشكل (١٣-٥): مثال (٣-٥).

الحل:

١) لإيجاد القوة المحصلة فإننا نحسب القوة الكهربائية والمغناطيسية مقداراً واتجهاً:

■ نحسب المجال الكهربائي، بتطبيق العلاقة (٢-٩):

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

$$E = \frac{(7.5 - (-7.5))}{0.1} = 150 \text{ فولت/م}$$

$$F_k = qE = 4 \times 10^{-6} \times 150 = 6 \times 10^{-4} \text{ نيوتن}$$

■ نحسب القوة الكهربائية من العلاقة (١-٣):

$$Q_k = m \times v$$

$$= 10^{-6} \times 4 \times 150$$

$$= 0,6 \times 10^{-3} \text{ نيوتن باتجاه المحور السيني الموجب.}$$

■ نحسب القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسم المشحون:

$$Q_g = v \times B \times \sin \theta$$

$$= 4 \times 10^{-6} \times 300 \times 0,5 \times 90$$

$$= 0,6 \times 10^{-3} \text{ نيوتن باتجاه المحور السيني السالب.}$$

■ نجد القوة المحصلة (قوة لورنتز):

$$Q_{\text{لورنتز}} = Q_k - Q_g$$

$$= 0,6 \times 10^{-3} - 0,6 \times 10^{-3}$$

$$Q_{\text{لورنتز}} = \text{صفر}$$

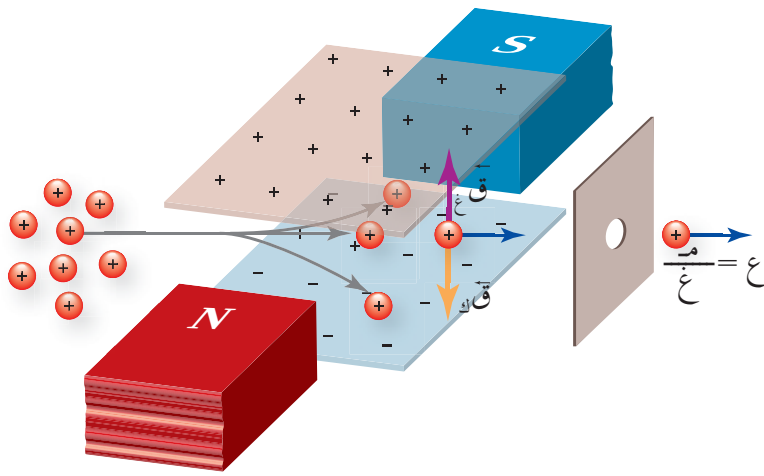
بما أن القوة المحصلة المؤثرة في الجسم تساوي صفراً؛ فإن الجسم يكمل حركته بسرعة ثابتة وفي خط مستقيم.

٢ إذا كانت سرعة الجسم أكبر من (٣٠٠) م/ث فإن القوة المغناطيسية المؤثرة فيه ستكون أكبر من القوة الكهربائية؛ لذلك سينحرف الجسم باتجاه محور السينات السالب.

وتستخدم قوة لورنتز في الأجهزة البحثية، وفي ما يأتي توضيح لعمل كل من جهاز منتقي السرعة، وجهاز مطياف الكتلة.

■ (١-٤-٥) منتقي السرعة (Velocity Selector)

تبين لك من المثال السابق أنه إذا كانت قوة لورنتز المؤثرة في جسم مشحون تساوي صفراً؛ فإن الجسم يكمل حركته بسرعة ثابتة وفي خط مستقيم. وبالاعتماد على هذه الفكرة صمم العلماء جهازاً لاختيار جسيمات ذات سرعة محددة يسمى منتقي السرعة، يستخدم في التجارب العلمية للحصول على حزمة من الجسيمات المشحونة المتحركة بسرعة ثابتة في خط مستقيم، ففي جهاز منتقي السرعة يستخدم مجالان متعامدان؛ كهربائي ومغناطيسي يؤثر كل منهما بقوة في



الشكل (١٤-٥): جهاز منتهي السرعة.

الجسيمات المشحونة المتحركة
كما في الشكل (١٤-٥)، فإذا
أدخلت شحنة إلى المجالين،
وأكملت حركتها بلا انحراف
فهذا يعني أن:

$$q = q$$

$$m = m \quad v = v \quad q = q$$

$$m = m \quad v = v \quad q = q$$

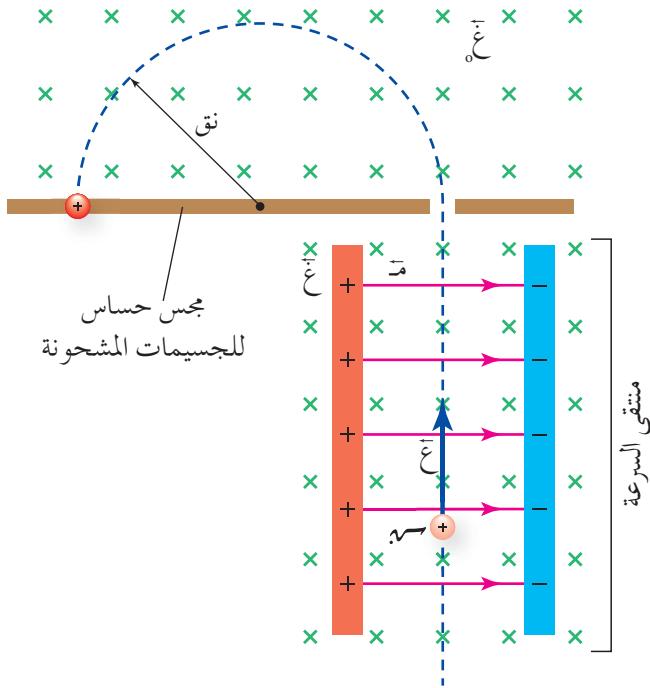
وبإعادة ترتيب الكميات:

$$m = m \quad v = v \quad q = q \quad (٤-٥)$$

تشير هذه العلاقة إلى أنه إذا أدخلت حزمة من الجسيمات المشحونة المتحركة بسرعات مختلفة إلى جهاز منتهي السرعة، فإن الجسيمات التي تكون سرعتها مساوية النسبة $(\frac{m}{q})$ تكمل حركتها بلا انحراف. أما التي تكون سرعتها أكبر أو أقل من هذه النسبة فسوف تنحرف عن مسارها كما يبين الشكل (١٤-٥)، وعملياً يمكن التحكم بمقدار كل من (m) و (q) لتكون نسبة $(\frac{m}{q})$ مساوية السرعة المطلوبة في التجربة.

■ (٢-٤-٥) مطياف الكتلة (The Mass Spectrometer)

مطياف الكتلة جهاز يستخدم لفصل الأيونات المشحونة بعضها عن بعض وفق نسبة شحنة كل منها إلى كتلتها، ما يتيح معرفة كتلتها ونوع شحنتها، بالإضافة إلى دراسة مكونات بعض المركبات الكيميائية. يوضح الشكل (١٥-٥) مبدأ عمل مطياف الكتلة، حيث يستخدم فيه منتهي السرعة في البداية لانتقاء الجسيمات المشحونة التي لها السرعة نفسها، وبعد أن تخرج هذه الجسيمات من منطقة المجالين الكهربائي (m) والمغناطيسي (q) ، تدخل منطقة أخرى فيها مجال مغناطيسي آخر (q_0) اتجاهه باتجاه المجال المغناطيسي (q) ، يجبر الجسيمات المشحونة على الحركة في مسار دائري. وفي نهاية المسار الذي يشكل نصف دائرة، تصطدم هذه الجسيمات بمجس خاص حساس للجسيمات المشحونة، وفي هذا الجهاز تُحدد نسبة الشحنة إلى الكتلة.



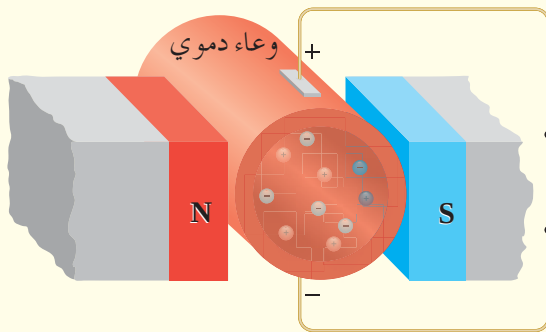
الشكل (٥-١٥): مطياف الكتلة.

اعتماداً على نصف قطر المسار الدائري، وفق العلاقة (٥-٢) وإذا كانت شحنة الجسيم معلومة، يمكن عندها حساب كتلته. وتجدر الإشارة إلى أن العالم تومسون (Thomson) استخدم مطيافاً للكتلة في عام (١٨٩٧) م لقياس نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته.

مراجعة (٥-٤)

- ١ ما الشرط اللازم لتحقيقه لكي يعمل المجالان الكهربائي والمغناطيسي معاً لانتقاء سرعة محددة للجسيمات المتحركة؟
- ٢ اذكر اثنين من استخدامات مطياف الكتلة.

- ٣ وضح دور كل من المجال المغناطيسي (غ)، والمجال الكهربائي (غ) في جهاز مطياف الكتلة.
- ٤ يمثل الشكل (٥-١٦) مبدأ عمل مضخة كهربائية في جهاز القلب الصناعي تستخدم في ضخ الدم الذي يحتوي على أيونات موجبة وأيونات سالبة في الأوعية الدموية؛ حيث يؤثر مجال كهربائي نحو محور الصادات السالب فيكون عمودياً على كل من الوعاء الدموي



الشكل (٥-١٦): سؤال (٤).

والمجال المغناطيسي المنتظم. اعتماداً على الشكل، حدد اتجاه حركة كل من الأيونات الموجبة والأيونات السالبة داخل الوعاء الدموي.

درست أن حركة الشحنات الكهربائية باتجاه واحد تشكل تيارًا كهربائيًا، وحيث إن الشحنات الكهربائية المتحركة داخل مجال مغناطيسي تتأثر بقوة مغناطيسية فمن المتوقع أن يتأثر التيار الكهربائي المار في موصل مغمور في مجال مغناطيسي منتظم بقوة مغناطيسية أيضًا، فالقوة المغناطيسية المؤثرة في مجموعة شحنات (q) تتحرك بسرعة (v) في موصل طوله (L) مغمور في مجال مغناطيسي:

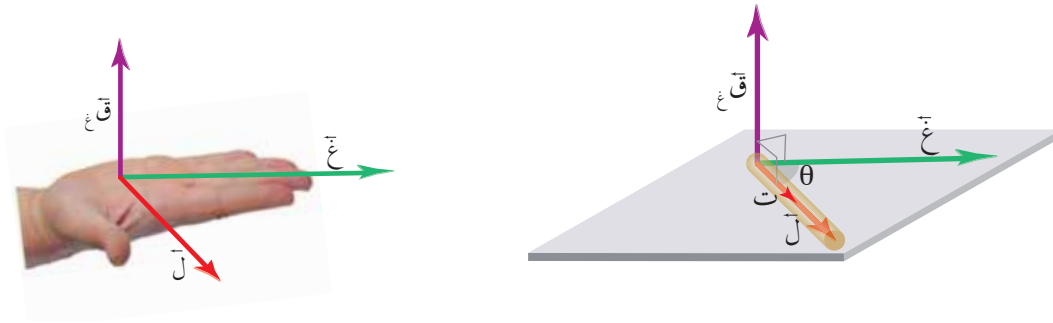
$$q = \frac{q}{L} \cdot L = \frac{q}{L} \cdot \frac{L}{v} \cdot v = \frac{q}{L} \cdot \frac{L}{v} \cdot v \cdot \sin \theta$$

$$q = \frac{q}{L} \cdot \frac{L}{v} \cdot v \cdot \sin \theta$$

وعليه يمكن حساب القوة المغناطيسية التي يؤثر بها المجال المغناطيسي في موصل مستقيم يمر فيه تيارًا كهربائيًا من العلاقة الرياضية الآتية:

$$F = I L \sin \theta \quad (5-5)$$

وتكتب العلاقة (5-5) بصورتها الاتجاهية كما يأتي: $\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B}$ ومتجه طول الموصل ($\vec{L}$) مقداره يساوي طول الموصل الموجود في المجال المغناطيسي واتجاهه باتجاه مرور التيار الكهربائي فيه، و(θ): الزاوية التي يصنعها متجه طول الموصل مع متجه المجال المغناطيسي. ويكون اتجاه القوة المغناطيسية عموديًا على المستوى الذي يتشكل من المتجهين ($\vec{L}$) و($\vec{B}$) مهما كانت الزاوية بين اتجاهيهما كما يبين الشكل (5-17). ويُحدد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل باستخدام قاعدة اليد اليمنى الموضحة في الشكل (5-18).

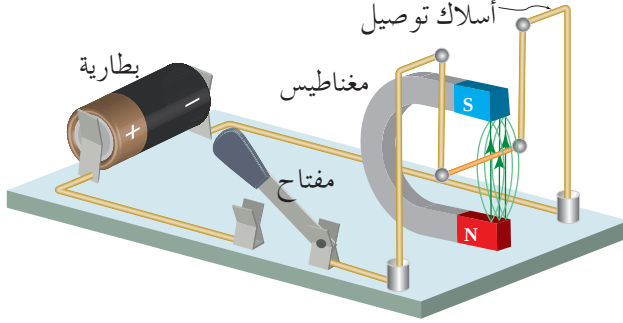


الشكل (5-18): قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تيارًا.

الشكل (5-17): القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يمر فيه تيار عمودية دائماً على المستوى الذي يتشكل من المتجهين ($\vec{L}$) و($\vec{B}$).

وللتوصل إلى أثر المجال المغناطيسي في موصل يحمل تيارًا كهربائيًا نفذ النشاط الآتي.

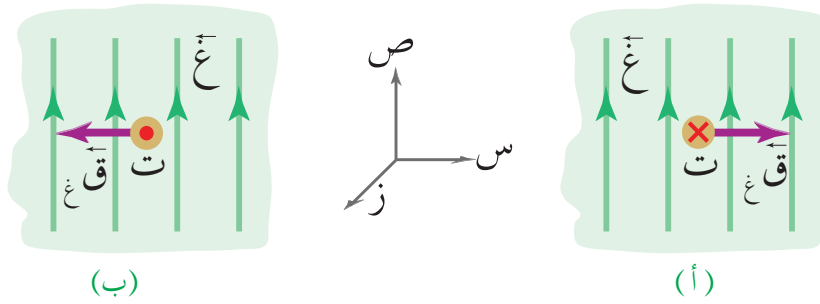
الهدف: استقصاء أثر المجال المغناطيسي في موصل يحمل تياراً كهربائياً.
المواد والأدوات: مغناطيس على شكل حرف (U)، وأسلاك توصيل، وبطارية، ومفتاح كهربائي.
خطوات تنفيذ النشاط:



الشكل (٥-١٩): نشاط (٥ - ١).

- ١ ركب الدارة المبينة في الشكل (٥-١٩).
- ٢ أغلق مفتاح الدارة وراقب الجزء من السلك بين قطبي المغناطيس. ماذا تلاحظ؟
- ٣ اعكس قطبي البطارية لتغيير اتجاه مرور التيار الكهربائي في الدارة، ثم أغلقها وراقب الجزء من السلك بين قطبي المغناطيس. ماذا تلاحظ؟

عملياً يستدل على اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تياراً من اتجاه انحناء الموصل أو إزاحته إذا كان قابلاً للانزلاق أو الحركة، ويبين الشكل (٥-١٩) موصلًا مثبتًا من طرفيه موضوعًا بين قطبي مغناطيس. عند انعدام التيار الكهربائي في الموصل، لا يتأثر الموصل بقوة مغناطيسية من المجال المغناطيسي المغمور فيه، في حين يكون اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الموصل باتجاه (+س) عندما يكون اتجاه مرور التيار الكهربائي نحو (-ز) كما في الشكل (٥-٢٠/أ)، بينما يكون اتجاه القوة المغناطيسية نحو (-س) إذا انعكس اتجاه مرور التيار الكهربائي وأصبح نحو (+ز) كما يظهر في الشكل (٥-٢٠/ب).



الشكل (٥-٢٠): أثر القوة المغناطيسية في موصل.

وقد صُممت أجهزة كهربائية متنوعة تعتمد في عملها على القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تياراً كهربائياً داخل مجال مغناطيسي، مثل مكبرات الصوت، والغلفانوميتر المستخدم للكشف عن التيارات الكهربائية الصغيرة، والمحرك الكهربائي الذي يعد جزءاً أساسياً في العديد من الأجهزة مثل المراوح والسيارات الهجينة.

مثال (٥-٤)

موصل مستقيم طوله (٢٠) سم يمر فيه تيار كهربائي مقداره (٤) أمبير مغمور في مجال مغناطيسي

منتظم مقداره (٠,١) تسلا. جد القوة المغناطيسية المؤثرة في هذا الموصل مقداراً واتجاهاً في الحالات المبينة في الشكل (٥-٢١).

الحل:

نحسب القوة المغناطيسية

بتطبيق العلاقة:

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

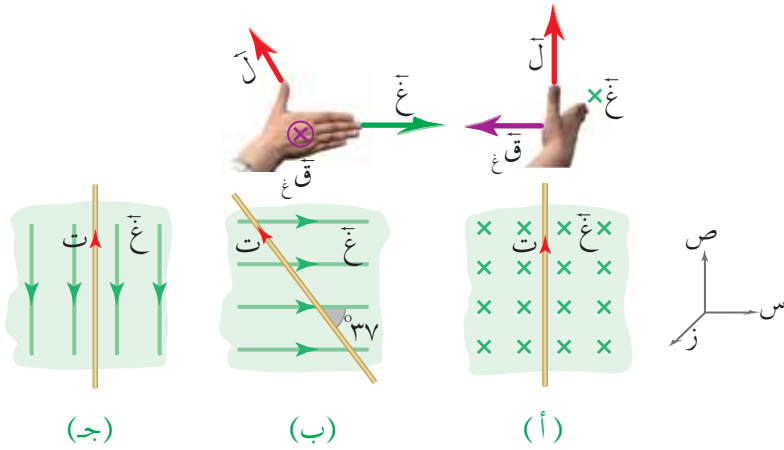
$$F = 4 \times 20 \times 10^{-2} \times 0,1 \times \sin 90^\circ = 0,8 \text{ نيوتن}$$

باتجاه المحور السيني السالب.

$$F = 4,8 \times 10^{-2} \times 0,1 \times \sin 37^\circ = 0,6 \text{ نيوتن}$$

باتجاه المحور الزيني السالب.

$$F = 0,8 \times 180^\circ = 180^\circ \text{ صفر}$$



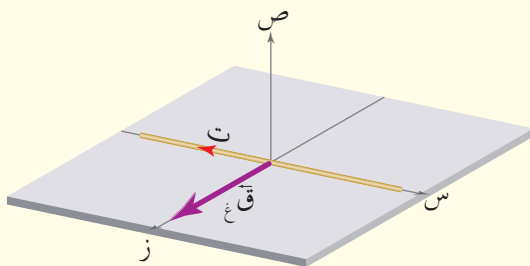
الشكل (٥-٢١): مثال (٥-٤).

مراجعة (٥-٥)

١ اذكر العوامل التي تعتمد عليها القوة المغناطيسية المؤثرة في موصل يحمل تياراً كهربائياً، ومغمور في مجال مغناطيسي.

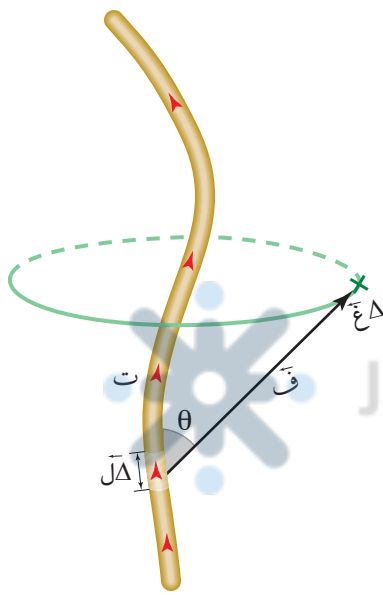
٢ يبين الشكل (٥-٢٢) موصلاً مستقيماً يمر فيه

تيار كهربائي باتجاه المحور السيني السالب، فإذا كان الموصل مغموراً في مجال مغناطيسي منتظم وأثر فيه بقوة مغناطيسية بالاتجاه المبين في الشكل. فحدد اتجاه المجال المغناطيسي.



الشكل (٥-٢٢): سؤال (٢).

توصل العالم الدنماركي أورستد (Orsted) إلى أن التيار الكهربائي هو أحد أهم مصادر المجال المغناطيسي حين لاحظ انحراف إبرة مغناطيسية عند وضعها بالقرب من موصل معزول يمر فيه تيار كهربائي، وفسر ذلك بتولد مجال مغناطيسي حول ذلك الموصل. ثم توالت أبحاث العلماء في دراسة العلاقة بين التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي الناشئ عنه، فتمكن العالمان الفرنسيان جان بيو (J.Biot) وفيليكس سافار (F. Savart) من التوصل تجريبياً إلى علاقة رياضية لحساب



الشكل (٥-٢٣): قانون بيو-سافار.

المجال المغناطيسي الناشئ حول موصلٍ يحمل تياراً كهربائياً عرفت بقانون بيو-سافار، إذ إن مقدار المجال المغناطيسي (Δ غ) عند نقطة تبعد مسافة (ف) عن (Δ ل) من طول موصل يمر فيه تيار كهربائي (ت) والناشئ عنه يتناسب طردياً مع كل من مقدار التيار الكهربائي وطول الموصل و(θ جا)؛ حيث (θ) الزاوية بين اتجاه (ف) واتجاه (Δ ل) الذي يكون باتجاه التيار الكهربائي، وعكسياً مع مربع بعد النقطة عن الموصل انظر الشكل (٥-٢٣). وتمثل العلاقة (٥-٦) إحدى صيغ

قانون بيو-سافار:

$$\Delta \text{ غ} = \frac{\mu}{4\pi} \text{ ت} \frac{\Delta \text{ ل جا } \theta}{\text{ف}^2} \dots\dots\dots (٥-٦)$$

حيث (μ): ثابت النفاذية المغناطيسية (Magnetic Permeability) للوسط المحيط بالموصل، فإذا كان الوسط هواءً أو فراغاً، فإن ($\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ تسلا م. أمبير). وفي ما يأتي سندرس المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في كل من موصل مستقيم طويل، وملف دائري، وملف لولبي.

■ (٥-٦-١) المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي يمر في موصل مستقيم طويل
(Magnetic Field Due to a Long Straight Wire Carrying a Current)

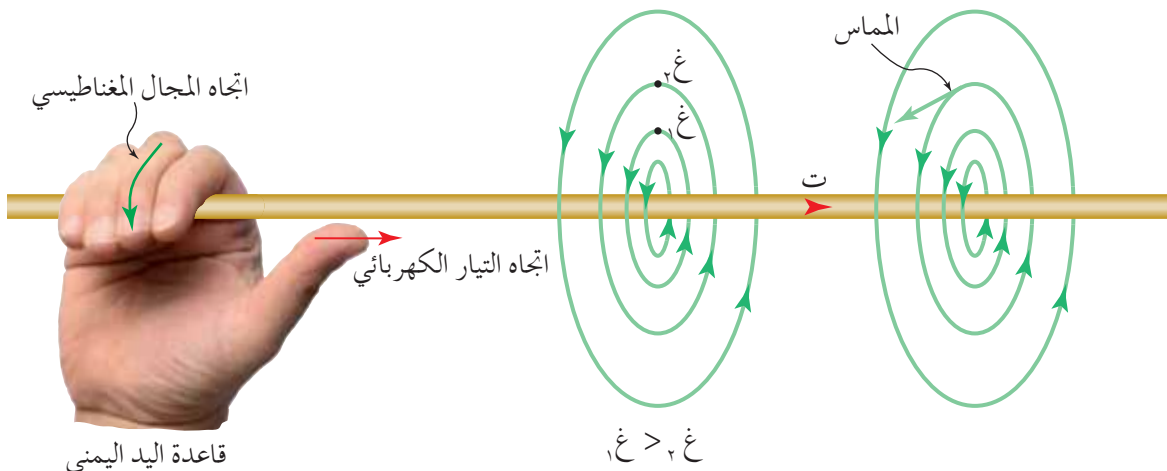
بينت التجارب العملية أن مرور تيار كهربائي في موصل مستقيم طويل يولد حوله مجالاً مغناطيسياً، ويكون هذا المجال على شكل دوائر متحدة في المركز، ويقع مركزها عند نقطة على محور الموصل ويكون مستواها عمودياً على الموصل كما في الشكل (٥-٢٤).

وباستخدام قانون بيو-سافار وإجراء بعض العمليات الرياضية نحصل على المجال المغناطيسي (غ) الناشئ عن تيار كهربائي (ت) يمر في موصل مستقيم طويل عند نقطة تبعد مسافة (ف) عن محوره ممثلاً بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$غ = \frac{\mu_0 T}{2\pi f} \dots \dots \dots (٥-٧)$$

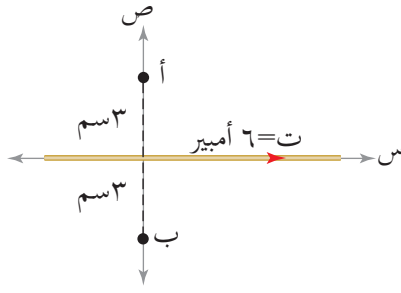
ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي حول الموصل المستقيم، نستخدم قاعدة اليد اليمنى؛ فإذا قبضنا على السلك باليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه مرور التيار الكهربائي في الموصل المستقيم، فإن بقية الأصابع تشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي كما في الشكل (٥-٢٤). وبوجه عام فإن اتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة بالقرب من الموصل يكون باتجاه المماس لخط المجال المغناطيسي عند تلك النقطة.

وتبعاً لقانون بيو-سافار، فإن المجال المغناطيسي على امتداد الموصل المستقيم يساوي صفراً؛ حيث تكون (θ) بين (Δل) و(ف) تساوي صفراً.



الشكل (٥-٢٤): المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في موصل مستقيم طويل.

مثال (٥-٥)



الشكل (٥-٥): مثال (٥-٥).

يبين الشكل (٥-٥) موصلًا مستقيمًا طويلًا يحمل تيارًا كهربائيًا مقداره (٦) أمبير، جد المجال المغناطيسي الناشئ عن هذا التيار مقدارًا واتجاهًا عند النقطتين (أ) و(ب).

الحل:

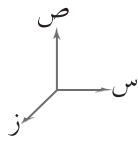
بما أن النقطتين (أ) و(ب) لهما البعد نفسه عن الموصل المستقيم فإن مقدار المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار المار في الموصل المستقيم عند كل منهما (غ)، و(غ) متساو، ويحسب من العلاقة:

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

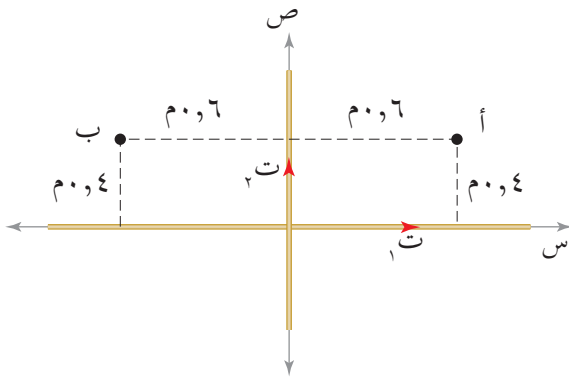
$$B = B = \frac{6 \times 10^{-7} \times \pi \times 4}{2 \times 10^{-3} \times \pi \times 2}$$

$$= 4 \times 10^{-5} \text{ تسلا}$$

ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة (أ) نطبق قاعدة اليد اليمنى، وبأخذ اتجاه المماس لخط المجال المغناطيسي عند النقطة (أ)، يكون اتجاهه نحو المحور الزيني الموجب $\odot$. أما عند النقطة (ب) فيكون نحو المحور الزيني السالب $\otimes$.



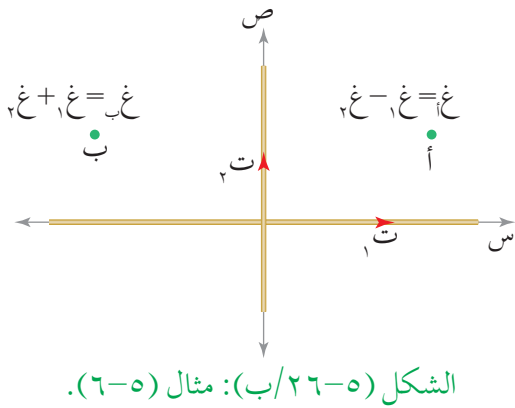
مثال (٥-٦)



الشكل (٥-٦): مثال (٥-٦).

يبين الشكل (٥-٦) موصلين مستقيمين طويلين متعامدين، يمر في كل منهما تيار مقداره (١٢) أمبير. اعتمادًا على القيم المبينة في الشكل، جد المجال المغناطيسي المحصل مقدارًا واتجاهًا عند كل من النقطتين (أ)، (ب).

الحل:



■ يوجد عند النقطة (أ) مجالان مغناطيسيان كما يوضح الشكل (٥-٢٦/ب)، (غ_١) الناشئ عن التيار الأول، و(غ_٢) الناشئ عن التيار الثاني.

$$\vec{G}_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1} = \frac{12 \times 10^{-7} \times \pi 4}{0,4 \times \pi 2} = 12 \times 10^{-7} \text{ تسلا}$$

غ_١ = ١٠ × ٦ = ٦ × ١٠^{-٦} تسلا، باتجاه المحور الزيني الموجب ⊙.

$$\vec{G}_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_2} = \frac{12 \times 10^{-7} \times \pi 4}{0,6 \times \pi 2} = 8 \times 10^{-7} \text{ تسلا}$$

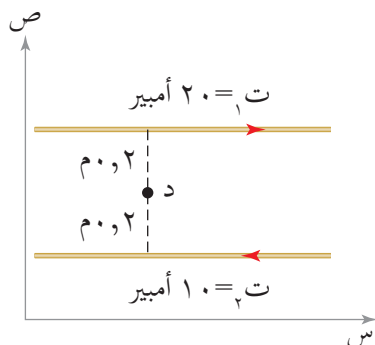
غ_٢ = ٤ × ١٠^{-٦} تسلا، باتجاه المحور الزيني السالب ⊗.

غ_أ (المحصلة) = غ_١ - غ_٢ = ٢ × ١٠^{-٦} تسلا، باتجاه المحور الزيني الموجب ⊙.

■ أما عند النقطة (ب) والتي لها بعد النقطة (أ) نفسه عن السلكين فإن المجالين بالاتجاه نفسه، ولهذا يكون المجال المغناطيسي المحصل:

غ_ب (المحصلة) = غ_١ + غ_٢ = ١٠ × ١٠^{-٦} تسلا، باتجاه المحور الزيني الموجب ⊙.

مثال (٥-٧)



موصلان مستقيمان متوازيان طويلان يحملان تيارين متعاكسين (ت_١، ت_٢)، كما في الشكل (٥-٢٧/أ)، معتمداً على الشكل أجب عما يأتي:

١ جـد المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (د) مقداراً واتجهاً.

٢ حدد موقع النقطة أو النقاط التي ينعلم عندها المجال المغناطيسي.

الشكل (٥-٢٧/أ): مثال (٥-٧).

الحل:

١ يوجد عند النقطة (د) مجالان مغناطيسيان، (غ_١) الناشئ عن (ت_١)، و(غ_٢) الناشئ عن (ت_٢).

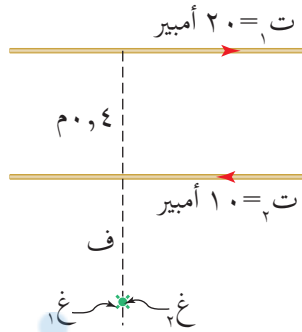
$$\vec{G}_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1} = \frac{20 \times 10^{-7} \times \pi 4}{0,2 \times \pi 2} = 2 \times 10^{-5} \text{ تسلا، باتجاه المحور الزيني السالب.}$$

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10}{2\pi \times 0,2} = 10^{-5} \text{ تسلا، باتجاه المحور الزيني السالب.}$$

وعليه، يكون المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (د) حاصل جمع المجالين:

$$\vec{B}_{\text{المحصلة}} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = 3 \times 10^{-5} \text{ تسلا، باتجاه المحور الزيني السالب.}$$

٢ لكي ينعدم المجال المغناطيسي ($\vec{B}_{\text{محصلة}} = \text{صفر}$)، يجب أن يكون المجالان الناشئان عن الموصلين متساويين مقدارًا ومتعاكسين اتجاهًا، ويتحقق ذلك في المنطقة الواقعة خارج الموصلين من جهة التيار الأصغر، وعلى بعد (ف) منه كما في الشكل (٥-٢٧/ب):



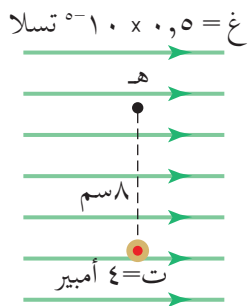
$$\begin{aligned} B_1 &= B_2 \\ \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1} &= \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_2} \\ \frac{10}{f} &= \frac{20}{(f + 0,4)} \end{aligned}$$

الشكل (٥-٢٧/ب): مثال (٥-٧).

$$20 \cdot f = 10 \cdot (f + 0,4) \Rightarrow f = 0,4 \text{ م}$$

ينعدم المجال المغناطيسي عند النقاط جميعها الواقعة على خط مستقيم يوازي الموصلين وعلى بعد (٠,٤) م عن الموصل الثاني، و (٠,٨) م عن الموصل الأول.

مثال (٥-٨)



مجال مغناطيسي منتظم باتجاه المحور السيني الموجب مغمور فيه موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي. إذا كانت النقطة (هـ) تبعد عن الموصل (٨) سم كما يوضح الشكل (٥-٢٨)، فجد:

الشكل (٥-٢٨): مثال (٥-٨).

١ المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (هـ) مقدارًا واتجاهًا.

٢ القوة المغناطيسية مقدارًا واتجاهًا المؤثرة في شحنة كهربائية مقدارها (٢) نانوكولوم في أثناء مرورها بالنقطة (هـ) بسرعة مقدارها (٤٠٠) م/ث باتجاه المحور الزيني الموجب.

الحل:

١ يوجد عند النقطة (هـ) مجالان مغناطيسيان، أحدهما المجال المنتظم باتجاه المحور السيني الموجب، والآخر المجال المغناطيسي الناشئ عن الموصل المستقيم الطويل، ولحسابه نطبق العلاقة:

$$\frac{\mu_0 I}{2\pi r} = B_{\text{مستقيم}}$$

$$\frac{4 \times 10^{-7} \times \pi \times 4}{2 \times 10 \times 8 \times \pi} =$$

$$B_{\text{مستقيم}} = 1 \times 10^{-8} \text{ تسلا، باتجاه المحور السيني السالب.}$$

ولأن المجالين متعاكسان في الاتجاه عند النقطة (هـ):

$$B_{\text{هـ (المحصلة)}} = B_{\text{مستقيم}} - B_{\text{منتظم}} = 1 \times 10^{-8} - 0,5 \times 10^{-8}$$

$$B_{\text{هـ (المحصلة)}} = 0,5 \times 10^{-8} \text{ تسلا، باتجاه المحور السيني السالب.}$$

٢ تمر الشحنة الكهربائية بالنقطة (هـ) فيؤثر فيها المجال المغناطيسي المحصل (غـ) بقوة مغناطيسية يمكن حسابها من العلاقة:

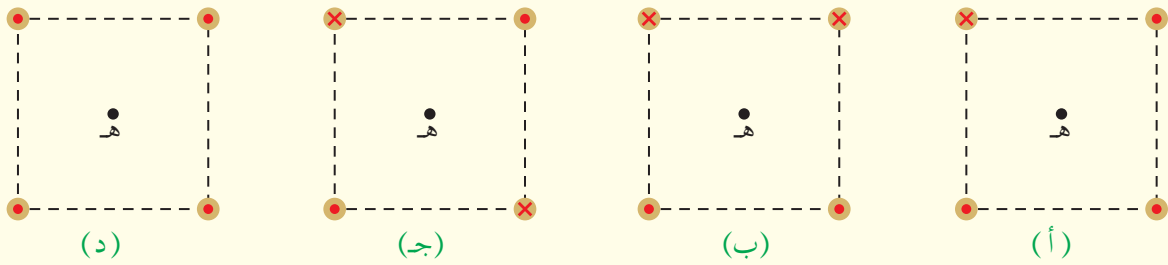
$$F_g = q v B \sin \theta \quad (\theta = 90^\circ)$$

$$= 2 \times 10^{-9} \times 4 \times 10^{-8} \times 0,5 \times 10^{-8} \times \sin 90^\circ$$

$$F_g = 4 \times 10^{-21} \text{ نيوتن نحو المحور الصادي السالب.}$$

- ١ صف المجال المغناطيسي الناشئ حول موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي.
- ٢ ما العوامل التي يعتمد عليها المجال المغناطيسي عند نقطة قرب موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي؟

- ٣ يمثل الشكل (٥-٢٩) أربعة توزيعات لموصلات مستقيمة طويلة يمر فيها تيار في اتجاه المحور الزيني موضوعة عند رؤوس مربع، إذا كانت قيم التيار في الموصلات متساوية، رتب هذه التوزيعات تصاعدياً وفق مقدار المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (هـ).



الشكل (٥-٢٩): سؤال (٣).

- ٤ في الشكل (٥-٣٠)، إذا انعدم المجال المغناطيسي عند النقطة (أ)، أجب عما يأتي:
- أ جد اتجاه التيار (ت).

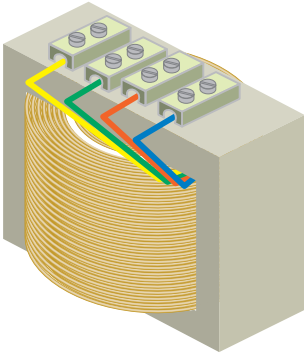
- ب أيهما أكبر مقداراً التيار (ت_١) أم (ت_٢)؟ فسر إجابتك.



الشكل (٥-٣٠): سؤال (٤).

■ (٥-٦-٢) المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربائي يمر في ملف دائري (Magnetic Field of a Circular Current Loop)

تدخل الملفات الدائرية في تركيب بعض الأجهزة الكهربائية مثل المحول الكهربائي، حيث تولد كل لفة من لفات الموصل النحاسي المعزول في المحول مجالا مغناطيسيا عندما يمر فيها تيار كهربائي، انظر الشكل (٥-٣١). ويكون المجال المغناطيسي في مركز الملف الدائري عموديا على مستوى الملف، يمكن تمثيله بخط مستقيم، بينما تنحني هذه الخطوط ويزداد انحناءها كلما ابتعدنا عن مركز الملف الدائري كما يظهر في الشكل (٥-٣٢).

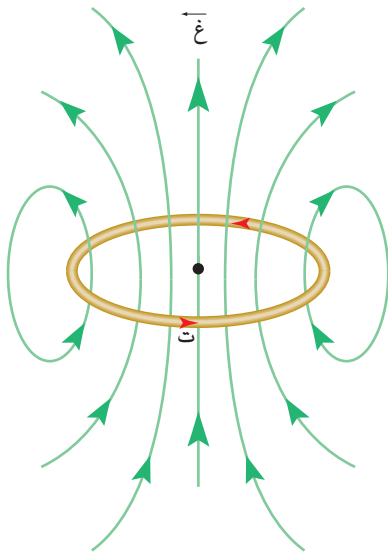


الشكل (٥-٣١): أحد أشكال المحولات.

وقد وجد تجريبيًا أن مقدار المجال المغناطيسي (غ) المتولد في مركز ملف دائري عدد لفاته (ن)، ونصف قطره (نق)، ويمر فيه تيار كهربائي (ت) يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية التي يمكن اشتقاقها بسهولة من قانون بيو-سافار:

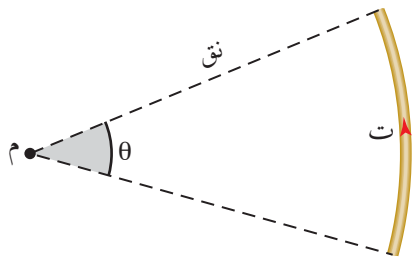
$$\text{غ} = \frac{\mu_0 \text{ت ن}}{2 \text{نق}} \quad \text{..... (٥-٨)}$$

ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي الناشئ في مركز الملف الدائري، نستخدم قاعدة اليد اليمنى، حيث توضع الأصابع الأربعة باتجاه التيار في الملف الدائري، فيشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي (القطب الشمالي) في مركز الملف الدائري كما في الشكل (٥-٣٢).



قاعدة اليد اليمنى

الشكل (٥-٣٢): المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في ملف دائري.

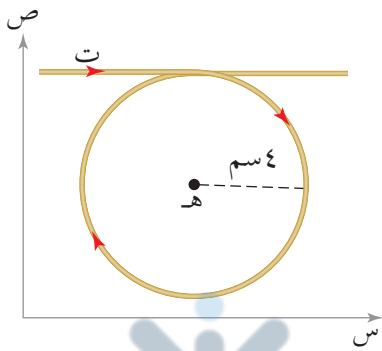


الشكل (٣٣-٥): الموصل جزء من لفة دائرية على شكل قوس.

$$ن = \frac{\theta}{360^\circ} \dots (٩-٥)$$

حيث (θ): الزاوية المركزية التي تقابل القوس بالدرجات.

مثال (٩-٥)



الشكل (٣٤-٥): مثال (٩-٥).

يبين الشكل (٣٤-٥) موصلًا مستقيمًا طويلاً يمر فيه تيار كهربائي مقداره (١٢) أمبير، صنع من جزء منه ملف دائري مكون من (٧) لفات نصف قطره (٤) سم. جد المجال المغناطيسي المحصل في مركز الملف الدائري (هـ) مقدارًا واتجاهًا.

الحل:

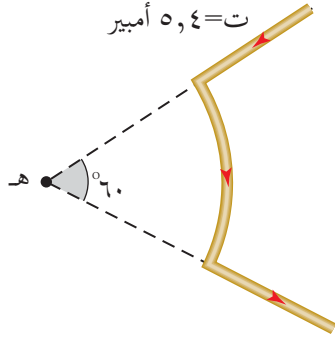
تمثل النقطة (هـ) مركز الملف الدائري، ويوجد عندها مجالان مغناطيسيان، أحدهما ناشئ عن التيار الكهربائي المار في الموصل المستقيم الطويل (غ_١)، والآخر عن التيار المار في الملف الدائري (غ_٢). التيار المار في الموصلين متساوٍ، وبعد النقطة (هـ) عن الموصل المستقيم يساوي نصف قطر الملف الدائري (ف=نق).

$$غ_١ = \frac{\mu_0 \cdot ١٢ \times ٧ \times \pi \cdot ٤}{2 \cdot ١٠ \times ٤ \times \pi \cdot ٢} = \frac{\mu_0 \cdot ١٢}{2 \cdot ١٠ \times ٤} = ١.٥ \times ١٠^{-٦} \text{ تسلا، باتجاه (-ز).}$$

$$غ_٢ = \frac{\mu_0 \cdot ١٢ \cdot ٧}{2 \cdot ١٠ \times ٤ \times ٢} = \frac{\mu_0 \cdot ١٢ \cdot ٧}{2 \cdot ١٠ \times ٨} = ١.٣٢ \times ١٠^{-٦} \text{ تسلا، باتجاه (-ز).}$$

$$غ_هـ \text{ (المحصلة)} = غ_١ + غ_٢ = ١.٣٨ \times ١٠^{-٦} \text{ تسلا، باتجاه (-ز).}$$

مثال (١٠-٥)



يمثل الشكل (٥-٣٥) موصلًا نصف قطر الجزء الدائري منه (٩) سم، اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل جد المجال المغناطيسي مقدارًا واتجاهًا عند النقطة (هـ).

الشكل (٥-٣٥): مثال (١٠-٥).

الحل:

تقع النقطة (هـ) على امتداد الموصلين المستقيمين، ولهذا يكون المجال المغناطيسي الناتج من كل موصل مستقيم عند النقطة (هـ) يساوي صفرًا وفق قانون بيو-سافار. أما القوس فيمثل جزءًا من لفة دائرية، ولإيجاد (ن) نستخدم العلاقة:

$$ن = \frac{\theta}{360} = \frac{60}{360} = \frac{1}{6} \text{ لفة.}$$

وعليه، فإن المجال المغناطيسي عند النقطة (هـ):

$$\vec{B} = \frac{\frac{1}{6} \times 5 \times 10^{-3} \times \pi \times 4}{2 \times 10^{-7} \times 9 \times 2} = \frac{\mu_0 I n}{2r} = 2 \text{ ت/م}^2$$

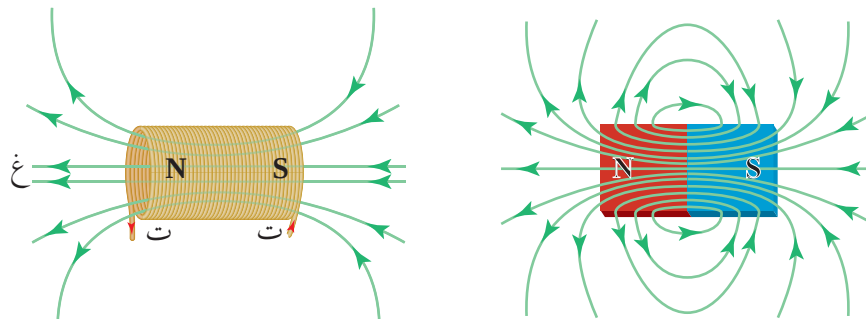
$$\vec{B} = 2 \times 10^{-7} \times \pi \times 0.2 = 1.256 \times 10^{-7} \text{ تسلا، باتجاه (-z).}$$

مراجعة (٥-٦-٢)

- ١ اذكر العوامل المؤثرة في المجال المغناطيسي الناشئ في مركز ملف دائري يمر فيه تيار كهربائي.
- ٢ هل المجال المغناطيسي المتولد في مركز ملف دائري يمر فيه تيار كهربائي، منتظم أم لا؟ فسر إجابتك.

■ (٣-٦-٥) المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار المار في ملف لولبي (The Magnetic Field of a Solenoid)

يتكون الملف اللولبي من عدد من الحلقات الدائرية المتماثلة في نصف القطر وتقع مراكزها على خط مستقيم يمثل محور الملف، بحيث يكون المجال المغناطيسي الناشئ داخله هو ناتج الجمع الاتجاهي للمجالات المغناطيسية الناشئة عن التيار الكهربائي المار في الحلقات الدائرية المكونة له. ويشبه المجال المغناطيسي الناشئ في الملف اللولبي المجال المغناطيسي للمغناطيس المستقيم كما يوضحه الشكل (٣٦-٥)، إلا أنه يمتاز عنه بإمكانية التحكم في مقداره واتجاهه عن طريق التحكم في التيار المار فيه.



الشكل (٣٦-٥): الملف اللولبي مغناطيس كهربائي عند مرور تيار فيه.

يعد المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي بعيداً عن طرفي الملف مجالاً مغناطيسياً منتظماً؛ إذ تكون خطوط المجال المغناطيسي متوازية داخله وبالاتجاه نفسه. وكلما زاد تراص حلقات الملف اللولبي زاد انتظام مجاله، ولذلك نستخدم أسلاكاً رفيعة ومتراصة للحصول على مجال مغناطيسي منتظم تماماً داخل الملف اللولبي.

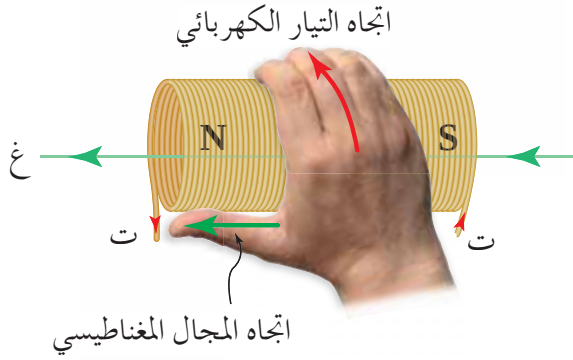
يعتمد مقدار المجال المغناطيسي المتولد داخل الملف اللولبي على التيار الكهربائي المار فيه (ت)، وعدد لفاته (ن)، وطوله (ل)، وعلى نوع مادة قلب الملف، فإذا أدخلنا قلباً من الحديد داخل الملف اللولبي مثلاً؛ يزداد المجال المغناطيسي داخل الملف بشكل كبير حيث $(\mu_{\text{الحديد}} > \mu_0)$ ، ويحسب المجال المغناطيسي المتولد عند نقطة تقع داخل الملف اللولبي وبعيداً عن طرفيه من العلاقة الرياضية الآتية:

$$B = \frac{\mu N I}{L} \quad \text{..... (١٠-٥)}$$

ويمكن كتابة هذه العلاقة بدلالة عدد اللفات في وحدة الأطوال (ن)، حيث $(\frac{N}{L} = \frac{N}{\text{وحدة (لغة/م)}})$ كما يأتي:

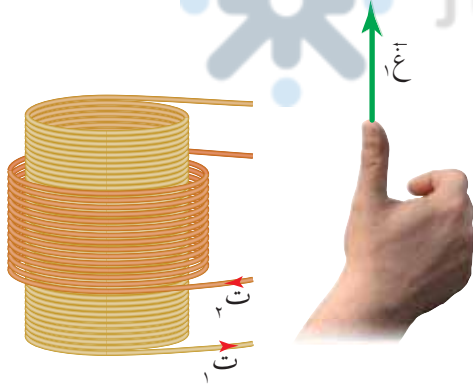
غ = μ ت ن (١١-٥)

ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي المنتظم داخل الملف اللولبي وبعيداً عن طرفيه، فإننا نستخدم قاعدة اليد اليمنى، حيث تشير الأصابع الأربعة إلى اتجاه التيار الكهربائي في الملف اللولبي، فيشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي (القطب الشمالي)، كما في الشكل (٣٧-٥). وعليه يعد الطرف الذي تخرج منه خطوط المجال المغناطيسي قطباً شمالياً، والطرف الذي تدخل فيه خطوط المجال المغناطيسي قطباً جنوبياً كما هو الحال في المغناطيس المستقيم.



الشكل (٣٧-٥): قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي.

مثال (١١-٥)



الشكل (٣٨-٥): مثال (١١-٥).

ملف لولبي طويل عدد لفاته (١٥) لفة لكل (١) سم من طوله، يمر فيه تيار (ت) مقداره (٨) أمبير، يحيط به ملف لولبي آخر عدد لفاته (٢٠٠٠) لفة، وطوله (٢٤) سم، يمر فيه تيار (ت) مقداره (٣) أمبير باتجاه معاكس لاتجاه تيار الملف اللولبي الأول، إذا علمت أن الملفين متحدين في المحور كما في الشكل (٣٨-٥)، فجد:

١ المجال المغناطيسي المحصل مقداراً واتجاهاً الناشئ في المحور المشترك.

٢ التيار الكهربائي المار في الملف اللولبي الخارجي لكي ينعقد المجال المغناطيسي في المحور المشترك.

١ يوجد عند المحور المشترك مجالان مغناطيسيان، أحدهما ناشئ عن التيار المار في الملف اللولبي الأول (غ_١)، والآخر عن التيار المار في الملف اللولبي الثاني (غ_٢).
بما أن عدد لفات الملف اللولبي الأول (١٥) لفة لكل (١) سم، فإن:

$$N_1 = \frac{15}{1 \times 10^{-2}} = 1500 \text{ لفة/م.}$$

وعليه، فإن:

$$B_1 = \mu_0 N_1 I_1 = 4\pi \times 10^{-7} \times 1500 \times 8 = 4.8\pi \times 10^{-4} \text{ تسلا، باتجاه (+ص).}$$

$$B_2 = \mu_0 N_2 I_2 = 4\pi \times 10^{-7} \times 2400 \times 3 = 2.88\pi \times 10^{-4} \text{ تسلا، باتجاه (-ص).}$$

$$B_{\text{المحصلة}} = B_1 - B_2 = 4.8\pi \times 10^{-4} - 2.88\pi \times 10^{-4} = 1.92\pi \times 10^{-4} \text{ تسلا، باتجاه (-ص).}$$

$$B_{\text{المحصلة}} = 1.92\pi \times 10^{-4} \text{ تسلا، باتجاه (-ص).}$$

وعليه، فإن المجال المغناطيسي المحصل عند المحور المشترك:

$$B_{\text{المحصلة}} = B_1 - B_2 = 4.8\pi \times 10^{-4} - 2.88\pi \times 10^{-4} = 1.92\pi \times 10^{-4} \text{ تسلا، باتجاه (-ص).}$$

$$B_{\text{المحصلة}} = 1.92\pi \times 10^{-4} \text{ تسلا، باتجاه (-ص).}$$

٢ لكي ينعدم المجال المغناطيسي في المحور، يجب أن يتساوى المجالان في المقدار، ويتعاكسا في الاتجاه، وبما أن اتجاهيهما متعاكسان، فإن:

$$B_1 = B_2$$

$$\mu_0 N_1 I_1 = \mu_0 N_2 I_2$$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \Rightarrow 1500 \times 8 = 2400 \times I_2$$

$$I_2 = 5 \text{ أمبير}$$



١ هل تتغير قيمة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي عند الانتقال من منتصف محور الملف اللولبي نحو طرفيه؟ فسر إجابتك.

٢ ثلاثة ملفات لولبية، طول الأول (ل) وعدد لفاته (ن)، وطول الثاني (٢ل) وعدد لفاته (ن)، وطول الثالث (٥ل) وعدد لفاته (٢ن). يمر في كل منها التيار الكهربائي نفسه، رتب هذه الملفات تنازلياً وفق المجال المغناطيسي المتولد في محور كل منها.

٣ كيف سيتأثر المجال المغناطيسي المتولد عند نقطة تقع على محور الملف اللولبي وبعيداً عن طرفيه في الحالات الآتية:

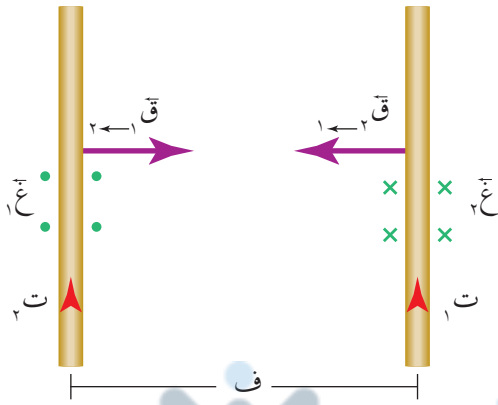
أ زيادة قطر كل لفة إلى ضعف ما كان عليه.

ب تغيير مادة قلب الملف اللولبي لتصبح حديداً.

ج مضاعفة طول الملف اللولبي مرتين مع مضاعفة عدد لفاته مرتين أيضاً.

٤ ملف لولبي طوله (٠,٣١٤) م، نشأ داخله مجال مغناطيسي مقداره (٦) تسلا عندما مر فيه تيار كهربائي مقداره (٧٥) أمبير، احسب عدد لفاته.

درست أن الموصل المستقيم الذي يحمل تيارًا كهربائيًا يتأثر بقوة مغناطيسية عند غمره في مجال مغناطيسي. فكيف تحسب القوة المغناطيسية المؤثرة فيه إذا كان المجال المغناطيسي الخارجي المؤثر ناتجًا من موصل مستقيم آخر طويل مجاور له؟ وكيف يمكن تحديد اتجاه هذه القوة؟ وما العوامل التي تعتمد عليها؟



الشكل (٣٩-٥): القوة المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين.

عند وضع موصلين طويلين مستقيمين متوازيين البعد بينهما (ف)، ويمر في كل منهما تيار كهربائي كما في الشكل (٣٩-٥)، تنشأ قوة مغناطيسية متبادلة بين الموصلين، وفقًا للقانون الثالث لنيوتن، حيث يؤثر الموصل الأول في الثاني بقوة مغناطيسية $(\vec{F}_{21})$ باتجاه معين، وفي الوقت ذاته، يؤثر الموصل الثاني في الأول بقوة مغناطيسية $(\vec{F}_{12})$ مساوية القوة الأولى في المقدار ومعاكسة لها في الاتجاه $(\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21})$.

عند مرور تيار كهربائي وليكن (I_1) في الموصل الأيمن باتجاه $(+z)$ ، سينشأ عنه مجال مغناطيسي $(\vec{B}_1)$ على بعد (ف) منه يعطى بالعلاقة (٧-٥): $\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi f}$

وفق قاعدة اليد اليمنى، يكون اتجاه المجال المغناطيسي $(\vec{B}_1)$ نحو محور $(+z)$ في المنطقة الواقعة على يسار الموصل. فإذا كان موصل مستقيم آخر يمر فيه تيار وليكن (I_2) باتجاه $(+z)$ في تلك المنطقة، فإن

هذا الموصل سيتأثر بقوة مغناطيسية وفق العلاقة (٥-٥): $\vec{F} = I_2 \vec{L} \times \vec{B}_1$ جا θ

حيث $(\theta = 90^\circ)$ بين اتجاه $(\vec{L})$ واتجاه $(\vec{B}_1)$ ، فإذا عوضنا $(\vec{B}_1)$ في العلاقة السابقة، سنحصل على العلاقة الآتية:

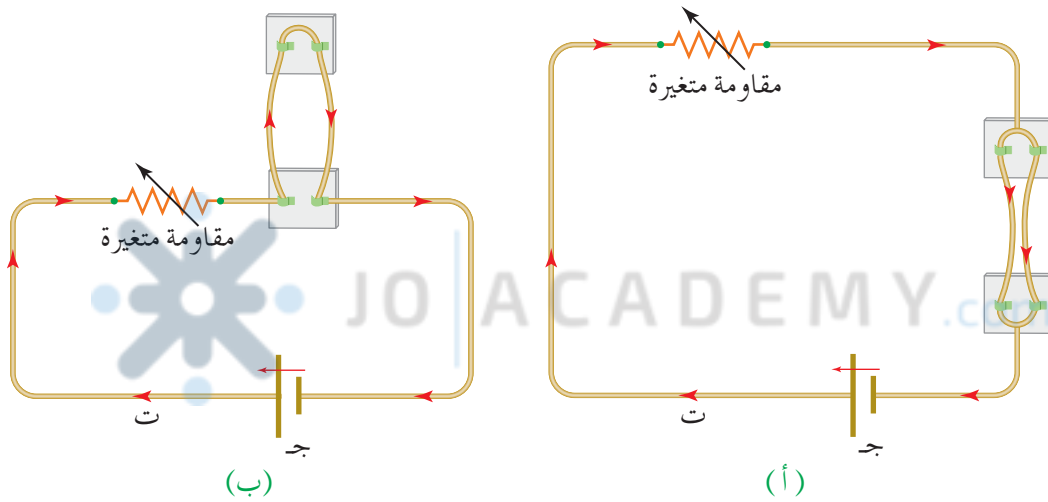
$$\vec{F}_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi f} \quad (١٢-٥)$$

ووفق قاعدة اليد اليمنى، فإن اتجاه القوة المؤثرة في (I_2) سيكون نحو $(+z)$ ، أي سينجذب

الموصل الثاني نحو الأول، ويمكن بالطريقة ذاتها إيجاد (ق_{٢١}).
ويمكن حساب القوة المتبادلة لكل وحدة طول من الموصل من العلاقة الآتية:

$$\frac{ق\text{ متبادلة}}{ل} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{\pi^2 ف} \quad \text{..... (١٣-٥)}$$

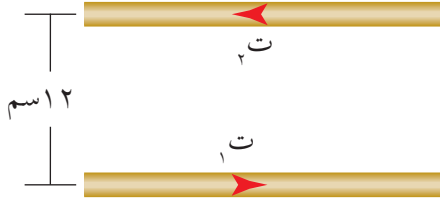
ويشترط لتطبيق العلاقة الرياضية (١٣-٥) بين موصلين مستقيمين أن يكونا متوازيين، أي أن التيارين المارّين فيهما إما أن يكونا بالاتجاه نفسه أو متعاكسين. وبالنظر إلى اتجاه القوتين، نجد أن الموصلين ينجذبان نحو بعضهما إذا كان التياران بالاتجاه نفسه، بينما يتنافران إذا كان التياران متعاكسين كما يظهر في الشكل (٤٠-٥).



الشكل (٤٠-٥): القوة المتبادلة بين موصلين مستقيمين متوازيين يحملان تيارين:
(أ): بالاتجاه نفسه (بينهما قوة تجاذب) (ب): متعاكسين (بينهما قوة تنافر).

ومن التطبيقات العملية على القوة المتبادلة بين موصلين مستقيمين متوازيين جهاز يستخدم لقياس التيار الكهربائي المار في موصل بدقة، يسمى ميزان أمبير.

موصلان مستقيمان متوازيان طويلا كما في الشكل (٥-١٤)، يمر في الأول تيار كهربائي مقداره (٤) أمبير باتجاه محور السينات الموجب، ويمر في الثاني تيار كهربائي مقداره (٦) أمبير باتجاه محور السينات السالب، جد:



الشكل (٥-١٤): مثال (٥-١٢).

١ القوة المتبادلة بين الموصلين لوحدة الأطوال منهما.

٢ القوة المغناطيسية التي يؤثر بها الموصل الأول في جزء طوله ٢ سم من الموصل الثاني مقداراً واتجاهاً.

الحل:

١ نحسب القوة المتبادلة لكل وحدة طول من العلاقة (٥-١٣):

$$\frac{6 \times 4 \times 10^{-7} \times \pi \times 4}{2 \times 10 \times 12 \times \pi \times 2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{\pi r} = \frac{ق}{ل} \text{ متبادلة}$$

$$\frac{ق}{ل} \text{ متبادلة} = 4 \times 10^{-5} \text{ نيوتن/م}، وهي قوة تنافر لأن التيارين متعاكسان.$$

٢ نحسب القوة المؤثرة في طول محدد من الموصل من العلاقة (٥-١٢):

$$\frac{2 \times 10 \times 2 \times 6 \times 4 \times 10^{-7} \times \pi \times 4}{2 \times 10 \times 12 \times \pi \times 2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{\pi r} = ق_{١ \leftarrow ٢}$$

$$ق_{١ \leftarrow ٢} = 8 \times 10^{-5} \text{ نيوتن، نحو (+ص).}$$

مراجعة (٥-٧)

١ اذكر العوامل التي تعتمد عليها القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين طويلين مستقيمين متوازيين يمر فيهما تياران كهربائيان.

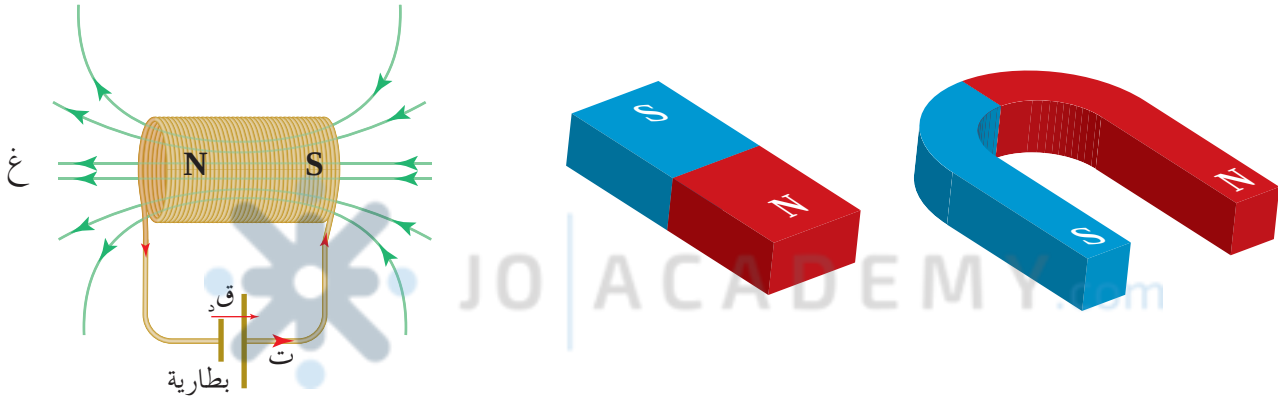
٢ ما الشرط اللازم لتطبيق علاقة القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين مستقيمين طويلين يمر فيهما تيار كهربائي؟



الشكل (٥-١٤): سؤال (٣).

٣ يظهر الشكل (٥-١٤) ثلاثة موصلات طويلة مستقيمة متوازية تقع في مستوى واحد تحمل تيارات متساوية والمسافات بينها متماثلة. رتب الموصلات الثلاثة تصاعدياً وفق القوة المغناطيسية المحصلة المؤثرة في كل منها.

كثير منا تعرّف المغناطيسية عن طريق استخدام مغناط مختلفة ضمن أدوات المطبخ أو القرطاسية أو الألعاب، وللمغناط (Magnets) أهمية كبيرة في التكنولوجيا التي تقوم عليها حياة المجتمعات الحديثة، فالمغناط الكهربائية في المحركات والمولدات، والطبقة التي تغطي الأقراص الممغنطة في الحاسوب، والكثير من الأجهزة العملية والعلمية تعد أمثلة على استخدام المغناط. وللمغناط أشكال عدة، منها المغناطيس المستقيم وحدوة الفرس، والمغناطيس الكهربائي. انظر الشكل (٥-٤٣)، وتولد المغناط جميعها مجالات مغناطيسية حولها، فما منشأ هذا المجال المغناطيسي؟ وما المواد التي تصنع منها المغناط؟



الشكل (٥-٤٣): بعض أشكال المغناط.

يكن أصل الخصائص المغناطيسية للمادة في بنائها الذري؛ فالمادة تتألف من ذرات، وتدور الإلكترونات في مدارات حول النواة الموجبة للذرة. وبالإضافة إلى حركتها الدائرية فإن للإلكترونات حركة دورانية؛ إذ يدور كل إلكترون حول محوره الذاتي، وهذه الحركة للإلكترون بمثابة تيار كهربائي، وقد تبين من تجربة أورستد أن التيار الكهربائي هو أحد مصادر المجال المغناطيسي؛ ولذلك فإن كل إلكترون يولد حوله مجالاً مغناطيسياً ذاتياً. والمجال المغناطيسي الناتج من حركة الإلكترون يشبه المجال المغناطيسي الناتج من مغناطيس صغير جداً، له قطبان أحدهما شمالي والآخر جنوبي، وفي الذرة الواحدة قد تكون هذه المجالات في صورة أزواج متعاكسة، فتكون محصلتها صفراً، أو تكون هذه المجالات في ذرة أخرى باتجاه واحد فينشأ لها مجال مغناطيسي صغير دائم.

إن محصلة المجالات المغناطيسية الذرية في قطعة من المادة هي التي تحدد خصائص المادة المغناطيسية

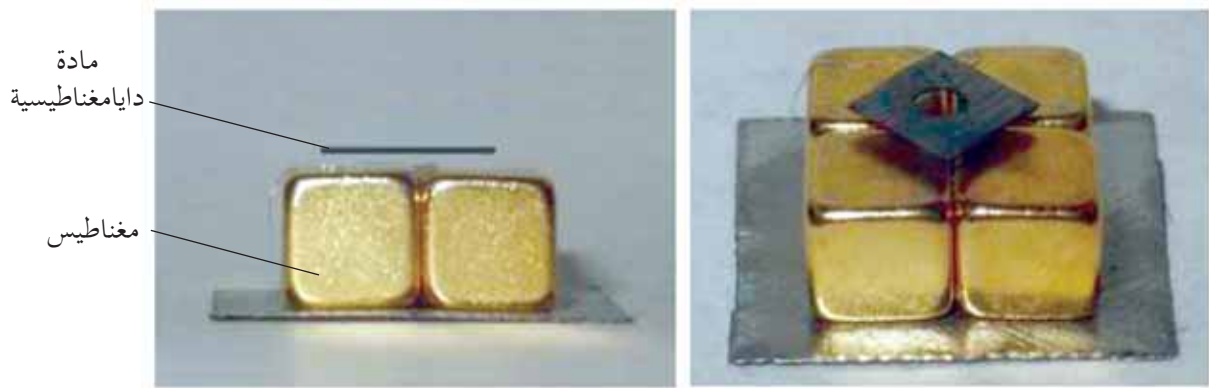
وسلوكلها عند وضعها في مجال مغناطيسي خارجي وتأثيرها به؛ لذلك تصنف المواد وفق خصائصها المغناطيسية وسلوكها المغناطيسي إلى ثلاثة أصناف رئيسة: مواد بارامغناطيسية (paramagnetic)، ومواد دايامغناطيسية (diamagnetic)، ومواد فرومغناطيسية (ferromagnetic).



الشكل (٤٤-٥): انجذاب الأكسجين السائل إلى مغناطيس.

ففي المواد البارامغناطيسية فإن محصلة المجالات المغناطيسية الذرية الناتجة من حركة الإلكترونات تساوي صفراً؛ لذلك لا يتولد حول المادة مجال مغناطيسي، إلا أنه عند وضع هذه المواد في مجال مغناطيسي خارجي تترتب مغناطها الذرية الصغيرة بقدر محدود باتجاه المجال المغناطيسي المؤثر، وتبدي استجابة ضعيفة للمجال المؤثر، أي أنها تتمغنط وتتأثر بقوة جذب عند تقريب مغناطيس خارجي منها. ومن الأمثلة على المواد البارامغناطيسية الألمنيوم والصوديوم والأكسجين السائل. ويظهر الشكل (٤٤-٥) انجذاب الأكسجين السائل إلى مغناطيس.

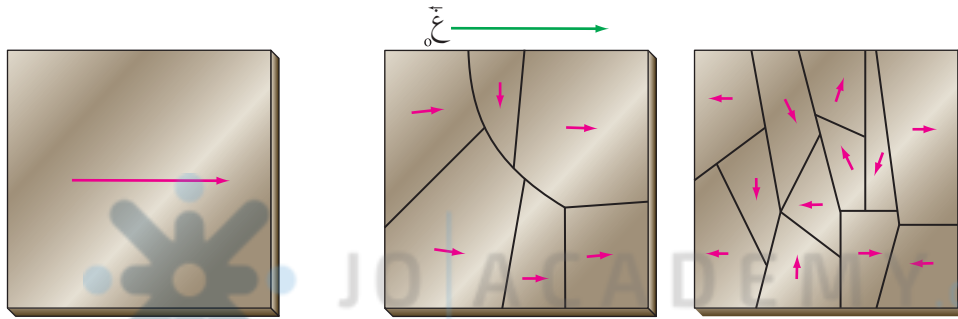
أما المواد الدايمغناطيسية ليس لها أثر مغناطيسي، وعند تعرضها إلى مجال مغناطيسي خارجي تكون استجابتها ضعيفة، إلا أنها تتمغنط بعكس اتجاه المجال المغناطيسي المؤثر، وإذا قُربت من مغناطيس دائم فإنها تتنافر معه، وقد لاحظ العالم فارادي هذا الأثر في البزموت والماء والفضة، وحديثاً لوحظ هذا الأثر في المواد فائقة التوصيل. ويظهر الشكل (٤٥-٥) مادة دايامغناطيسية تتنافر مع مغناطيس موضوع أسفلها.



الشكل (٤٥-٥): مادة دايامغناطيسية تتنافر مع مغناطيس أسفلها.

وأما المواد الفرومغناطيسية فتمتاز باحتوائها على مغناط ذرية تتفاعل مع بعضها بعضاً بصورة قوية، وهذا التفاعل القوي يؤدي بهذه المغناط إلى ترتيب أو اصطفاف تلقائي حتى بغياب المجال

المغناطيسي الخارجي، وتشكل مجموعة المغناطيسية الذرية المرتبة باتجاه واحد ما يعرف **بالمناطق المغناطيسية (magnetic domains)**، ويتراوح حجم المنطقة المغناطيسية بين $(10^{-10} - 10^{-2})$ سم³، وتحتوي المنطقة على عدد من الذرات بين $(10^{17} - 10^{21})$ ذرة. وقد يختلف اتجاه الاصطفاف في المناطق المتجاورة، لاحظ الشكل (٥-٤٦)، وعند وضع قطعة من مادة فرومغناطيسية مثل الحديد تحت تأثير مجال مغناطيسي خارجي ($\vec{H}$) فإن المناطق المغناطيسية ذات الاتجاه الواحد والتي تكون باتجاه المجال المغناطيسي المؤثر تكبر وتزداد على حساب المناطق الأخرى؛ وبهذا تصبح القطعة كلها مغناطيساً له قطبان، وبذلك تكون استجابة هذه المواد للتمغنط كبيرة وباتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. وتشمل المواد الفرومغناطيسية إضافة إلى الحديد، النيكل والكوبالت وبعض السبائك المصنوعة منها، فهي تستخدم لصناعة كل ما نطلق عليه مغناطيس دائم.



قطعة حديد أصبحت مغناطيساً.

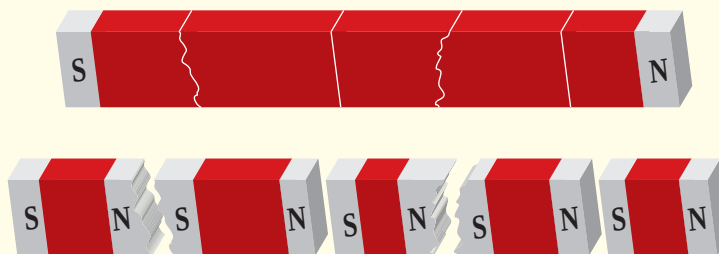
قطعة حديد تعرضت لمجال مغناطيسي.

قطعة حديد غير ممغنطة.

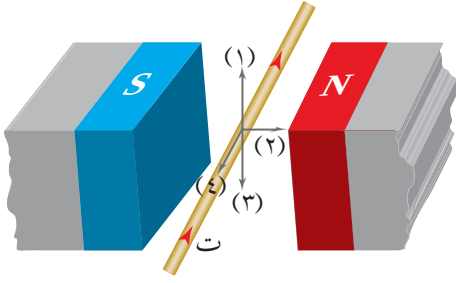
الشكل (٥-٤٦): ممغنطة قطعة حديد.

مراجعة (٥-٨)

- ١ اذكر أنواع المواد المغناطيسية، ثم قارن بينها من حيث استجابتها لمغناطيس قريب منها.
- ٢ فسر انجذاب برادة الحديد إلى مغناطيس.
- ٣ من الخصائص التي تميز المغناطيس أنه لا يمكن فصل قطبيه الشمالي والجنوبي عن بعضهما. مستعيناً بالشكل (٥-٤٧) وبالاتماد على مفهوم المناطق المغناطيسية فسر هذه الخاصية.



الشكل (٥-٤٧): سؤال (٣).



الشكل (٥-٤٨): سؤال (١) فقرة (١).

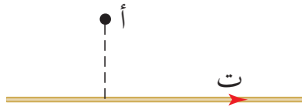
١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ في الشكل (٥-٤٨)، السهم الذي يمثل اتجاه القوة

المغناطيسية المؤثرة في الموصل:

أ (١) ب (٢)

ج (٣) د (٤)



الشكل (٥-٤٩): سؤال (١) فقرة (٢).

٢ موصل مستقيم طويل يمر فيه تيار كهربائي باتجاه (+س)

كما في الشكل (٥-٤٩)، عند مرور بروتون بالنقطة

(أ) باتجاه (-ص)، فإن اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في

البروتون سيكون باتجاه:

أ (١) (+ز) ب (+س) ج (-س) د (-ص)

٣ جسيم مشحون يتحرك عمودياً على اتجاه مجال مغناطيسي منتظم، فيصنع مساراً دائرياً

نصف قطره (نق_١). إذا دخل إلى المجال المغناطيسي نفسه جسيم مشحون آخر له كتلة

الجسيم الأول بينما شحنته تساوي ثلاثة أضعاف شحنة الجسيم الأول، وبسرعة تساوي

ضعفي سرعة الجسيم الأول، فإن نصف قطر المسار الدائري للجسيم الثاني (نق_٢) يساوي:

أ (١) $\frac{1}{4}$ نق_١ ب (٢) $\frac{3}{2}$ نق_١ ج (٣) $\frac{2}{3}$ نق_١ د (٤) ٢ نق_١

٤ يعتمد مبدأ عمل جهاز منتقي السرعة على انعدام قوة لورنتز. وتنعقد قوة لورنتز عندما:

أ (١) يتساوى المجالان الكهربائي والمغناطيسي في المقدار ويتعاكسان في الاتجاه.

ب (٢) يكون المجالان الكهربائي والمغناطيسي بالاتجاه نفسه.

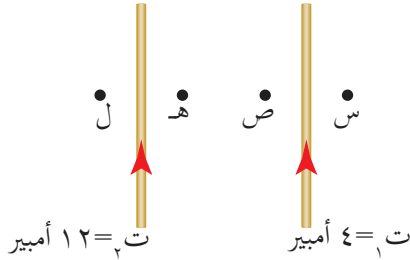
ج (٣) ينحرف الجسيم المشحون باتجاه القوة الكهربائية.

د (٤) تتساوى القوتان الكهربائية والمغناطيسية في المقدار وتتعاكسان في الاتجاه.

٥ ملف لولبي متصل ببطارية ومقاومة. يمكن مضاعفة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي بإحدى الطرائق الآتية:

- أ مضاعفة طوله. ب مضاعفة القوة الدافعة الكهربائية للمصدر. ج إنقاص عدد لفاته إلى النصف. د مضاعفة المقاومة المتصلة به.

اعتمادًا على الشكل (٥-٥٠)، أجب عن الفقرتين (٦، ٧).



٦ إذا كانت (ق١) هي القوة المؤثرة في وحدة الأطوال

من الموصل الأول، و (ق٢) هي القوة المؤثرة في وحدة

الأطوال من الموصل الثاني، فإن العلاقة بين مقداريهما:

الشكل (٥-٥٠): سؤال (١) فقرة (٦، ٧).

- أ $ق١ = ١٢ ق٢$ ب $ق١ = ٣ ق٢$ ج $ق١ = ق٢$ د $ق١ = \frac{١}{٣} ق٢$

٧ النقطة المحتمل أن ينعلم عندها المجال المغناطيسي المحصل هي:

- أ (ل) ب (هـ) ج (ص) د (س)

٢ بين الشكل (٥-٥١)، مسار ثلاثة جسيمات (أ، ب، ج)

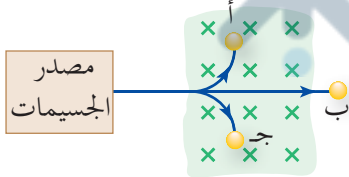
تعبّر مجالاً مغناطيسيًا. فإذا كانت هذه الجسيمات تتحرك

بالسرعة نفسها، فأجب عن الأسئلة الآتية:

أ أي الجسيمات متعادل؟

ب أي الجسيمات سالب الشحنة؟

ج إذا كان مقدار شحنة الجسيم (أ)، (ج) متساوي، أيهما أكبر كتلة (أ) أم (ج)؟



الشكل (٥-٥١): سؤال (٢).

٣ موصلان طويلان مستقيمان متوازيان كما في الشكل (٥-٥٢)،

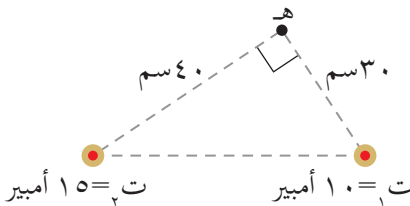
يمر في الأول تيار كهربائي (١٠) أمبير باتجاه (+ز)، ويمر في

الثاني تيار كهربائي (١٥) أمبير بالاتجاه نفسه. جد:

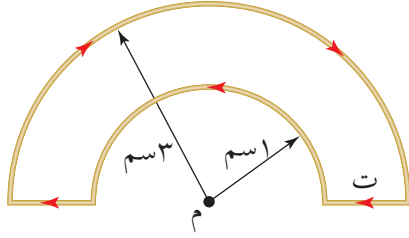
أ موقع النقطة أو النقاط التي ينعلم عندها المجال

المغناطيسي المحصل.

ب المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (هـ) مقدارًا واتجاهًا.

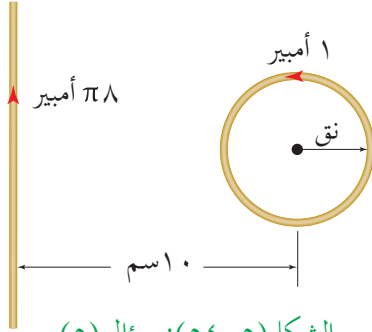


الشكل (٥-٥٢): سؤال (٣).



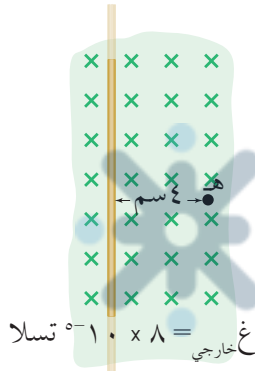
الشكل (٥-٥٣): سؤال (٤).

٤ في الشكل (٥-٥٣)، حدد مقدار التيار الكهربائي (ت) المار في الملف إذا كان مقدار المجال المغناطيسي المحصل في النقطة (م) يساوي $(\frac{88}{\sqrt{2}} \times 10^{-10})$ تسلا. وما اتجاه المجال المغناطيسي المحصل عند تلك النقطة؟



الشكل (٥-٥٤): سؤال (٥).

٥ في الشكل (٥-٥٤)، حدد نصف قطر الملف الدائري لكي ينعلم المجال المغناطيسي في مركزه، علماً بأنه يتكون من لفتين اثنتين فقط.



الشكل (٥-٥٥): سؤال (٦).

٦ في الشكل (٥-٥٥)، أثرت قوة مغناطيسية مقدارها (١) ملي نيوتن نحو (+ص) في شحنة مقدارها (٢-) ميكروكولوم لحظة مرورها بالنقطة (هـ)، بسرعة مقدارها (5×10^{-11}) م/ث باتجاه (-س). جد التيار الكهربائي المار في الموصل المستقيم مقداراً واتجهاً.

٧ قذف جسيم شحنته (١) بيكوكولوم، وكتلته (2×10^{-17}) كغ بسرعة مقدارها (9×10^{-11}) م/ث نحو (+س) عمودياً على مجال مغناطيسي، فاكسب تسارعاً مركزياً مقداره $(9, 0)$ م/ث^٢ نحو (+ز) لحظة مروره بنقطة ما، جد المجال المغناطيسي عند تلك النقطة مقداراً واتجهاً.

٨ يتحرك بروتون بسرعة $(1, 6 \times 10^{-4})$ م/ث نحو محور السينات الموجب فيدخل إلى منطقة مجال كهربائي مقداره (2×10^{-3}) نيوتن/كولوم واتجاهه نحو محور الصادات السالب. أ جد القوة الكهربائية المؤثرة في البروتون مقداراً واتجهاً.

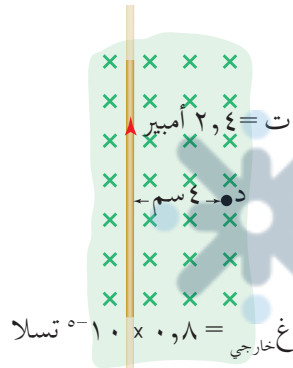
ب عند إضافة مجال مغناطيسي إلى المنطقة نفسها، وفي لحظة ما أدخل بروتون آخر يتحرك بالسرعة نفسها إلى منطقة المجالين الكهربائي والمغناطيسي لوحظ أن البروتون الثاني أكمل

حركته بلا انحراف. احسب مقدار المجال المغناطيسي وحدد اتجاهه.

جـ إذا أدخل جسيم ألفا بالسرعة نفسها، إلى منطقة المجالين الكهربائي والمغناطيسي، فهل يكمل حركته بلا انحراف؟ فسر إجابتك.

(ملاحظة: جسيم ألفا شحنته موجبة وتساوي ضعف شحنة البروتون، وكتلته أربعة أضعاف كتلة البروتون تقريبًا).

٩ قذف جسيم شحنته (٠,٤) ميكروكولوم بسرعة مقدارها (١٠٠) م/ث نحو (+ص) إلى منطقة مجالين، أحدهما كهربائي مقداره (٥٠٠) نيوتن/كولوم متجه نحو (+س) والآخر مغناطيسي مقداره (٢) تسلا نحو (-ز)، جد قوة لورنتز المؤثرة في هذا الجسيم لحظة دخوله منطقة المجالين مقدارًا واتجاهًا.

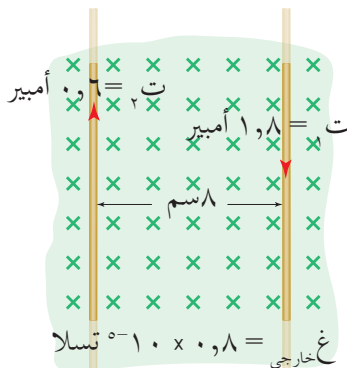


١٠ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٥٦-٥)، احسب:

أ المجال المغناطيسي المحصل عند النقطة (د).

ب القوة المغناطيسية المؤثرة في بروتون مروره بالنقطة (د) باتجاه المحور الزيني الموجب.

ج القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل.



١١ اعتمادًا على البيانات المثبتة في الشكل (٥٧-٥)، احسب:

أ القوة المتبادلة بين الموصلين لوحدة الأطوال.

ب المجال المغناطيسي المحصل عند الموصل الثاني مقدارًا واتجاهًا.

ج القوة المغناطيسية المحصلة المؤثرة في وحدة الأطوال من الموصل الثاني.

الحث الكهرومغناطيسي

Electromagnetic Induction

الفصل السادس

في هذا الفصل

(١-٦)

التدفق المغناطيسي.

(٢-٦)

قانون فارادي في الحث الكهرومغناطيسي.

(٣-٦)

القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل مستقيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم.

(٤-٦)

قانون لنز.

(٥-٦)

الحث الذاتي.

(٦-٦)

الطاقة المغناطيسية المخزنة في المحث.

بقيت الخلايا الكهربائية حتى بداية القرن التاسع عشر الميلادي مصدرًا وحيدًا لإنتاج الطاقة الكهربائية بالرغم من أنها لا تنتج إلا كمية قليلة منها، ولما أصبحت الحاجة ماسة لإنتاج المزيد من الطاقة الكهربائية لتزويد المصانع والمنازل؛ جاء اكتشاف فارادي للعلاقة بين المغناطيسية والكهرباء، وهذا ما يعرف بظاهرة الحث الكهرومغناطيسي، وأصبح بالإمكان توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الحركية بالحث الكهرومغناطيسي.

فما المقصود بالحث الكهرومغناطيسي؟ وكيف يتولد التيار الكهربائي الحثي؟ وكيف تنشأ القوة الدافعة الكهربائية الحثية في موصل يتأثر بمجالات مغناطيسية؟ وعلام تعتمد القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل أو ملف؟ هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

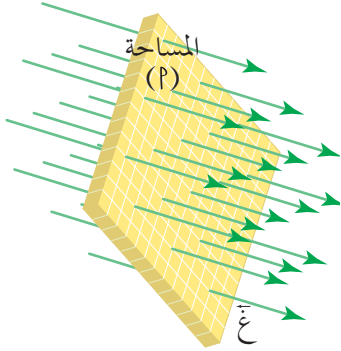
تعد ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي المبدأ الأساسي في العديد من التطبيقات الحديثة مثل مولدات الكهرباء، والبطاقات الممغنطة، ووحدات التخزين في الأجهزة الإلكترونية.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- * توضح المقصود بالتدفق المغناطيسي، وتحدد وحدة قياسه، وتعبّر عنه رياضياً.
- * تذكر نص قانون فارادي في الحث، وتعبّر عنه رياضياً.
- * تحلل رسوماً بيانية متعلقة بقانون فارادي في الحث.
- * تستقصي عملياً تولد تيار كهربائي حثي في حالات مختلفة.
- * تفسر تولد قوة دافعة كهربائية حثية عند حركة موصل في مجال مغناطيسي منتظم.
- * تذكر العلاقة الخاصة بالقوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل مستقيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم.
- * تذكر نص قانون لنز، وتطبقه لتحديد اتجاه التيار الحثي.
- * تتحقق عملياً من قانون لنز.
- * توظف العلاقات والقوانين الخاصة بالقوة الدافعة الكهربائية الحثية في حل مسائل حسابية.
- * توضح المقصود بالحث الذاتي ووحدة المحاثة، وتعبّر عنها رياضياً.
- * توظف علاقات الحث الذاتي في حل مسائل حسابية.
- * تتوصل إلى العوامل التي تعتمد عليها محاثة المحث اللولبي .
- * تعبّر رياضياً عن الطاقة المخزنة في محث لولبي، وتحل مسائل حسابية تتعلق بها.



تعد البطارية أحد مصادر التيار الكهربائي، فهل يمكن توليد تيار كهربائي في دائرة من غير بطارية؟ توصل العالم فارادي إلى أنه يمكن توليد تيار كهربائي باستخدام المجال المغناطيسي، ومن المهم أن نبدأ بدراسة كمية فيزيائية ترتبط بتوليد التيار الكهربائي من المجال المغناطيسي تسمى التدفق المغناطيسي، فماذا نعني بالتدفق المغناطيسي؟



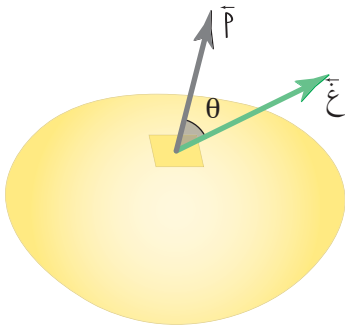
الشكل (١-٦): التدفق المغناطيسي عبر سطح معين.

درست سابقاً أن للمغناطيس مجالاً مغناطيسياً، يمكن تمثيله بخطوط تسمى خطوط المجال المغناطيسي، ويعرف **التدفق المغناطيسي (Magnetic flux)** بأنه عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق سطحاً ما عمودياً عليه، لاحظ الشكل (١-٦).

ويعبر عنه بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{P} = B P \cos \theta \quad (١-٦)$$

حيث (Φ) : التدفق المغناطيسي، و $(\vec{B})$: المجال المغناطيسي، و $(\vec{P})$: متجه المساحة، وهو متجه مقداره يساوي مساحة السطح الذي تخترقه خطوط المجال المغناطيسي، واتجاهه عموديٌّ على السطح خارجٌ منه كما يوضح الشكل (٢-٦)، و (θ) : الزاوية بين اتجاه المجال المغناطيسي ومتجه المساحة.



الشكل (٢-٦): متجه المساحة.

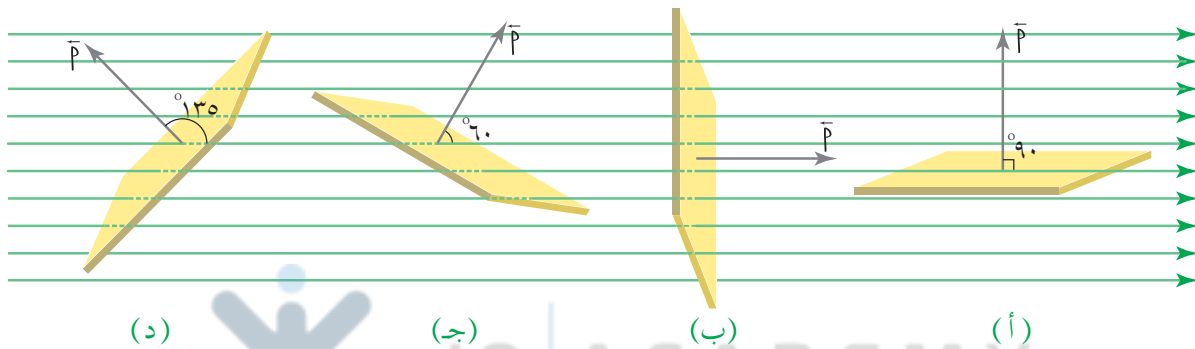
تبين العلاقة (١-٦) أن التدفق المغناطيسي كمية قياسية، يقاس بوحدة (تسلا.م^٢) ووفق النظام العالمي للوحدات تسمى هذه الوحدة ويير نسبة للعالم ويير (Weber).

ويُعرف **الويير** بأنه التدفق المغناطيسي عبر وحدة المساحة من سطح ما عندما يخترقه عمودياً مجالٌ مغناطيسيٌّ مقداره (١) تسلا.

احسب التدفق المغناطيسي عبر سطح مساحته $(٠,٢)$ م^٢ مغمور في مجال مغناطيسي مقداره $(٠,٤)$ تسلا إذا كان متجه المساحة:

- ١ عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي.
- ٢ موازياً لاتجاه المجال المغناطيسي.
- ٣ يصنع زاوية (٦٠°) مع اتجاه المجال المغناطيسي.
- ٤ يصنع زاوية (١٣٥°) مع اتجاه المجال المغناطيسي.

الحل:



الشكل (٦-٣): مثال (٦-١).

نحسب التدفق المغناطيسي بتطبيق العلاقة:

$$\Phi = B \cos \theta$$

- ١ بما أن متجه المساحة عمودي على اتجاه المجال المغناطيسي فإن $(\theta = 90^\circ)$ ، كما في الشكل (٦-٣/أ)، لذا فإن:

$$\Phi = B \cos \theta = 0,2 \times 0,4 \times \cos 90^\circ = 0 \text{ صفر.}$$

- ٢ بما أن متجه المساحة مواز لاتجاه المجال المغناطيسي فإن $(\theta = 0^\circ)$ ، كما في الشكل (٦-٣/ب)، لذا فإن:

$$\Phi = B \cos \theta = 0,2 \times 0,4 \times \cos 0^\circ = 0,08 \text{ ويبر.}$$

٣ عندما تكون الزاوية بين متجه المساحة واتجاه المجال المغناطيسي ($\theta = 60^\circ$) كما في الشكل (٦-٣)، فإن:

$$\Phi = B \cos \theta = 0,4 \times 0,2 \times 0,5 = 0,04 \text{ ويبر.}$$

٤ عندما تكون الزاوية بين متجه المساحة واتجاه المجال المغناطيسي ($\theta = 135^\circ$) كما في الشكل (٦-٣)، فإن:

$$\Phi = B \cos \theta = 0,4 \times 0,2 \times (-0,7) = -0,056 \text{ ويبر.}$$

لاحظ أن التدفق المغناطيسي سالب، وهذا يعني أن خطوط المجال المغناطيسي تخترق السطح داخلة فيه.



JO ACADEMY

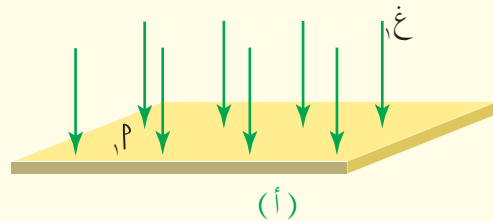
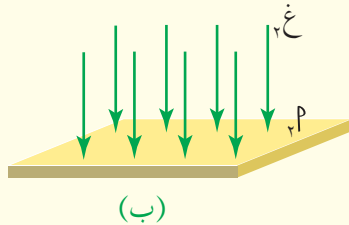
مراجعة (٦-١)

١ ما المقصود بالتدفق المغناطيسي؟ وما وحدة قياسه؟

٢ ماذا نعني بقولنا إن التدفق المغناطيسي عبر سطح مغمور في مجال مغناطيسي يساوي (٥) ويبر؟

٣ اذكر ثلاث طرائق لتغيير التدفق المغناطيسي عبر سطح ما مغمور في مجال مغناطيسي.

٤ سطحان (أ، ب) يخترق كل منهما مجال مغناطيسي منتظم كما في الشكل (٦-٤). في أي الحالتين يكون المجال المغناطيسي أكبر مقداراً؟ قارن بين التدفق المغناطيسي عبر السطحين.



الشكل (٦-٤): سؤال (٤).

اكتشف كل من العالمين مايكل فارادي (M. Faraday) في بريطانيا، وجوزيف هنري (J. Henry) في الولايات المتحدة، عن طريق تجارب أجريها بمعزل عن بعضهما أنه يمكن توليد تيار كهربائي عن طريق تغيير التدفق المغناطيسي. ولتعرف كيفية توليد هذا التيار الكهربائي ادرس النشاط الآتي.

قانون فارادي

نشاط (٦-١)

الهدف: استقصاء تولد تيار حثي عملياً في حالات مختلفة.

المواد والأدوات: ملفان دائريان مختلفان في عدد اللفات، وغلفانوميتر، ومغناطيس مستقيم قوي، ومغناطيس مستقيم ضعيف.

خطوات تنفيذ النشاط:

١ صل طرفي أحد الملفين بطرفي غلفانوميتر.

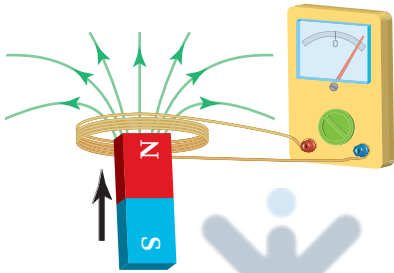
٢ حرك المغناطيس الضعيف نحو الملف كما في الشكل (٦-٥/أ)، ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر.

٣ أبعد المغناطيس عن الملف كما في الشكل (٦-٥/ب)، ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر، ثم استمر في تحريك المغناطيس بالنسبة إلى الملف قريباً وبعداً مع ملاحظة التغير على مؤشر الغلفانوميتر.

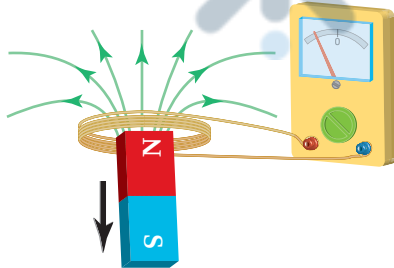
٤ توقف عن تحريك المغناطيس بالنسبة إلى الملف كما في الشكل (٦-٥/ج). هل يتحرك مؤشر الغلفانوميتر الآن؟ ماذا تستنتج؟

٥ كرر الخطوات من ٢ إلى ٤، بتثبيت المغناطيس وتحريك الملف بالنسبة إلى المغناطيس قريباً وبعداً، ولاحظ التغير على مؤشر الغلفانوميتر.

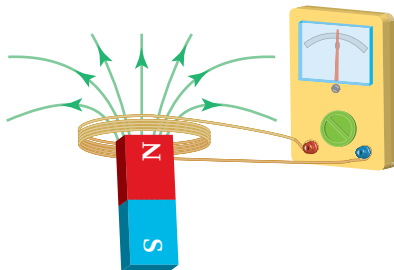
٦ كرر الخطوات من ٢ إلى ٤، ولاحظ التغير على مقدار انحراف مؤشر الغلفانوميتر بتغيير ما يأتي:



(أ) حركة المغناطيس مقترباً من الملف.



(ب) حركة المغناطيس مبتعداً عن الملف.



(ج) المغناطيس والملف ساكنان.

الشكل (٦-٥): توليد تيار حثي في ملف.

- الملف؛ واستخدام الملف الثاني.
- المغناطيس؛ واستخدام المغناطيس القوي.
- سرعة الحركة (حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف أو حركة الملف بالنسبة إلى المغناطيس).

لا بد من أنك استنتجت من إجراء النشاط السابق أن حركة مؤشر الغلفانوميتر تدل على مرور تيار كهربائي في الملف فقط في أثناء حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف أو حركة الملف بالنسبة إلى المغناطيس، بحيث يتغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق الملف. ويتغير اتجاه هذا التيار بتغير اتجاه الحركة، بينما ينعدم التيار الكهربائي عند توقف الحركة، أي عندما يكون التدفق المغناطيسي الذي يخترق الملف ثابتاً، وأن انحراف مؤشر الغلفانوميتر يكون أكبر بزيادة سرعة الحركة قريبًا كانت أو بعدًا، وزيادة عدد لفات الملف.

إن التيار المتولد في ملف نتيجة التغير في التدفق المغناطيسي عبره يسمى **تيارًا حثيًا (Induced Current)**، وهذا التيار لحظي ينتج من قوة دافعة كهربائية تسمى قوة دافعة كهربائية حثية تتولد في الملف للسبب نفسه، وتسمى ظاهرة توليد التيار الحثي بسبب تغير التدفق المغناطيسي عبر ملف **ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Induction)**.

استطاع العالم فارادي بعد إجراء تجارب عدة أن يعبر عن نتائجها بقانون سمي باسمه في ما بعد. وينص **قانون فارادي (Faraday's Law)** على أن "متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في ملف يتناسب طرديًا مع المعدل الزمني لتغير التدفق المغناطيسي الذي يخترقه". ويعبر عن قانون فارادي بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ق_ح = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (٢-٦)$$

حيث (ق_ح): متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في ملف، و(ن): عدد لفات الملف، و(ΔΦ): التغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف في الفترة الزمنية (Δt). ويجدر الانتباه إلى أن الإشارة السالبة في العلاقة (٢-٦)، تُفسّر لاحقًا عند دراسة قانون لنز.

غُمر ملف عدد لفاته (٥٠٠٠) لفة في مجال مغناطيسي منتظم، كما في الشكل (٦-٦/أ)، فكان التدفق المغناطيسي عبره (٠,٦) ويبر، احسب:

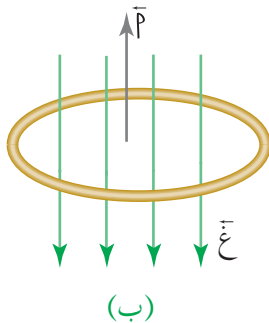
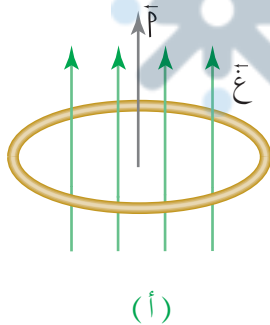
١ متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف عندما ينعكس اتجاه المجال المغناطيسي المؤثر فيه خلال (٠,٢) ثانية.

٢ متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف إذا تلاشى المجال المغناطيسي خلال (٠,١) ثانية.

٣ المعدل الزمني للتغير في التدفق المغناطيسي عندما يصبح متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية (١٠٠٠-) فولت.

الحل:

١ لاحظ الشكل (٦-٦/أ) والشكل (٦-٦/ب)، إن خطوط المجال المغناطيسي كانت تخترق سطح الملف خارجة منه، ولما انعكس اتجاه المجال المغناطيسي أصبحت خطوط المجال المغناطيسي داخلة فيه، وبهذا فإن التدفق المغناطيسي الذي كان يعبر الملف ($\Phi_1 = 0,6$) ويبر، أصبح ($\Phi_2 = -0,6$) ويبر، أي أن متجه المساحة أصبح بعكس اتجاه المجال المغناطيسي، لذا فإن:



الشكل (٦-٦): مثال (٦-٢).

$$\Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi$$

$$-0,6 - 0,6 = -1,2 \text{ ويبر}$$

$$Q = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-1,2 \times 5000}{0,2} = -30000 \text{ فولت}$$

$$Q = -30000 \text{ فولت}$$

$$\Delta\Phi = 0 \text{ صفر} = -0,6 - 0,6 = -1,2 \text{ ويبر}$$

$$Q = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-1,2 \times 5000}{0,1} = -60000 \text{ فولت}$$

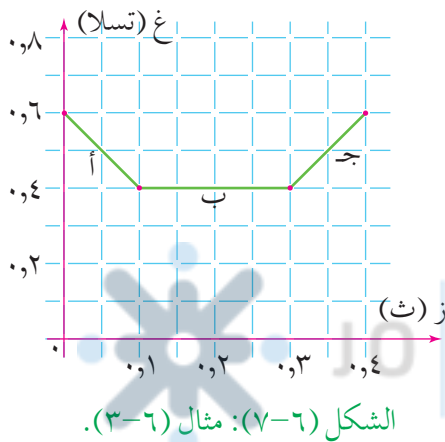
$$Q = -60000 \text{ فولت}$$

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$0,2 = \frac{1000 -}{5000} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

عند تحريك مغناطيس داخل ملف، يتغير المجال المغناطيسي الذي يخترق الملف بالنسبة إلى الزمن وفق الرسم البياني في الشكل (٦-٧). إذا علمت أن عدد لفات الملف (٢٠٠٠) لفة، ومساحة مقطع اللفة الواحدة (٨٠) سم^٢، واتجاه المجال المغناطيسي يوازي متجه المساحة، فأجب عن الأسئلة الآتية:

- ١ احسب التغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف في الفترات الزمنية (أ، ب، ج).
- ٢ احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف في الفترات الزمنية (أ، ب، ج).
- ٣ مثل بيانيًا العلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية والزمن في كل من الفترات الزمنية (أ، ب، ج).



الحل:

- ١ نحسب التغير في التدفق المغناطيسي بمعرفة التغير في مقدار المجال المغناطيسي الذي يخترق الملف في كل فترة.

الفترة (أ)

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Delta\Phi$$

$$= \Phi_1 \times 2 \times \cos\theta - \Phi_2 \times 2 \times \cos\theta$$

$$= (\Phi_1 - \Phi_2) (2 \times \cos\theta)$$

$$\Delta\Phi = (0.6 - 0.4) \times (2 \times 10^{-4} \times 80 \times 10^{-4} \times 1000) = 0.0008 \text{ وبيير.}$$

الفترة (ب)

لا يوجد تغير في المجال المغناطيسي في الفترة الزمنية (ب)؛ لذا فإن $\Delta\Phi = 0$ صفر. ومنها $\Delta\Phi = 0$ صفر.

الفترة (ج)

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Delta\Phi$$

$$= \Phi_1 \times 2 \times \cos\theta - \Phi_2 \times 2 \times \cos\theta$$

$$= (\Phi_1 - \Phi_2) (2 \times \cos\theta)$$

$$\Delta\Phi = (0.6 - 0.4) \times (2 \times 10^{-4} \times 80 \times 10^{-4} \times 1000) = 0.0008 \text{ وبيير.}$$

٢ نحسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية بتطبيق قانون فارادي:

الفترة (أ)

$$ق_د = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{0 - 1.0 \times 10^{-3}}{0.1} \times 2000 = 20 \text{ فولت}$$

$$ق_د = 32 \text{ فولت}$$

الفترة (ب)

$$ق_د = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{0 - 0}{0.2} \times 2000 = 0 \text{ فولت}$$

$$ق_د = 0 \text{ فولت}$$

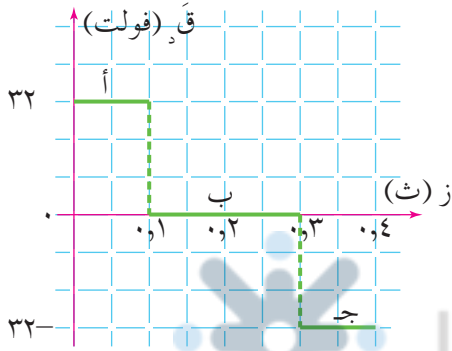
الفترة (ج)

$$ق_د = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{0 - 1.0 \times 10^{-3}}{0.1} \times 2000 = 20 \text{ فولت}$$

$$ق_د = 32 \text{ فولت}$$

٣ التمثيل البياني: يبين الشكل (٦-٨) التمثيل

البياني للعلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية والزمن في كل من الفترات الزمنية (أ، ب، ج).



الشكل (٦-٨): التمثيل البياني للعلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية والزمن.

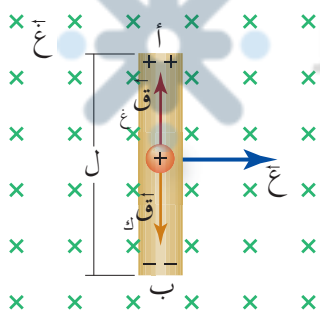
مراجعة (٦-٢)

١ اذكر نص قانون فارادي في الحث الكهرومغناطيسي.

٢ وضع مغناطيس مقابل ملف على سطح مستو، ثم حركاً معاً بحيث بقيا في المستوى نفسه في أثناء حركتهما، وبقي البعد بينهما ثابتاً. هل تتولد في الملف قوة دافعة كهربائية حثية؟ لماذا؟

٣ ملف عدد لفاته (ن) لفه، ومساحة اللفة الواحدة (P) سم^٢ مغمور في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (غ) تسلا موازاً لمتجه المساحة. إذا زاد المجال المغناطيسي عبر الملف إلى ضعف ما كان عليه في الفترة الزمنية (Δت) ثانية، فما متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف؟

في الدرس السابق تعلمت أنه يمكن توليد قوة دافعة كهربائية حثية عن طريق تغير التدفق المغناطيسي الذي يخترق ملفاً ما، إلا أنه يوجد طريقة أخرى تتولد فيها قوة دافعة كهربائية حثية، فعندما يغمر موصل مستقيم طوله (ل) في مجال مغناطيسي منتظم ($\vec{B}$) اتجاهه نحو المحور الزيني السالب، ويسحب بسرعة ثابتة ($\vec{v}$) باتجاه محور السينات الموجب كما في الشكل (٦-٩) بتأثير قوة خارجية، فإن الشحنات الموجبة ($+$) الموجودة في الموصل ستتأثر بقوة مغناطيسية ($\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$) باتجاهها عمودي على اتجاه كل من ($\vec{v}$) و ($\vec{B}$)؛ ما يجعل هذه الشحنات تتحرك داخل الموصل من (ب) إلى (أ) وفقاً لقاعدة اليد اليمنى، فتتراكم الشحنات الموجبة عند الطرف (أ)، وعند الطرف (ب) للموصل تتراكم الشحنات السالبة، وتبعاً لذلك ينشأ مجال كهربائي ($\vec{E}$) داخل الموصل يؤثر في الشحنات الموجبة بقوة كهربائية باتجاه محور الصادات السالب؛ أي بعكس اتجاه القوة المغناطيسية، وباستمرار حركة الموصل يستمر تراكم الشحنات الكهربائية على طرفي الموصل؛ ما يزيد المجال



الكهربائي، ومن ثم تزداد القوة الكهربائية، وهكذا حتى تتساوى القوة المغناطيسية باتجاه محور الصادات الموجب مع القوة الكهربائية باتجاه محور الصادات السالب كما هو موضح في الشكل (٦-٩).

الشكل (٦-٩): حركة موصل مستقيم بسرعة ثابتة في مجال مغناطيسي منتظم بتأثير قوة خارجية.

نتيجة لذلك يتولد فرق جهد كهربائي بين طرفي الموصل؛ ما يعني نشوء قوة دافعة كهربائية حثية (Induced electromotive force). عند انتقال الشحنة

الكهربائية الموجبة من الطرف (ب) إلى الطرف (أ) للموصل فإن القوة المغناطيسية تبذل عليها شغلاً، وبما أن الشغل = القوة × الإزاحة، فإن الشغل الذي تبذله القوة المغناطيسية يعطى بالعلاقة الرياضية:

$$W = (q\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{L} \times \text{جتا صفر}$$

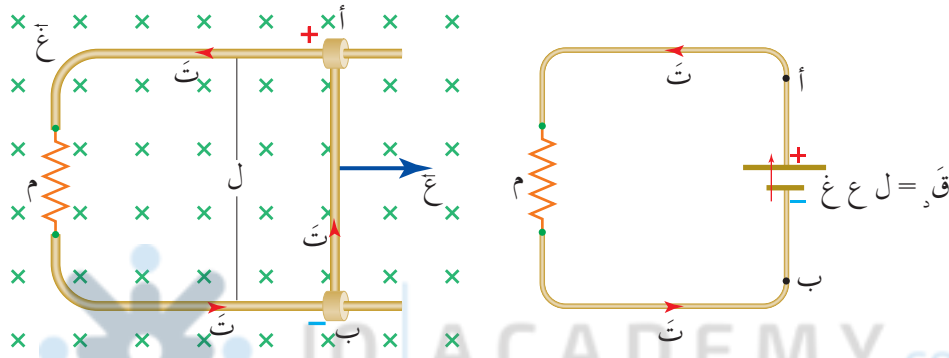
وبقسمة الطرفين على (q) وبمعرفة أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة ($\mathcal{E}$) = $\frac{W}{q}$ ، فإن:

$$\mathcal{E} = B L v \quad \text{..... (٦-٣)}$$

وإذا كان الموصل (ل) جزءاً من مسار مغلق وموصول بمقاومة (م)، فإن القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة تصبح مصدراً للطاقة الكهربائية، فيمر عبر مقاومة الدارة تيار كهربائي حثي كما في الشكل (٦-١٠)، ويمكن حساب التيار الحثي من العلاقة الرياضية الآتية: $\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt}$

$$\mathcal{E} = \frac{L \frac{dI}{dt}}{M} \quad (٦-٤)$$

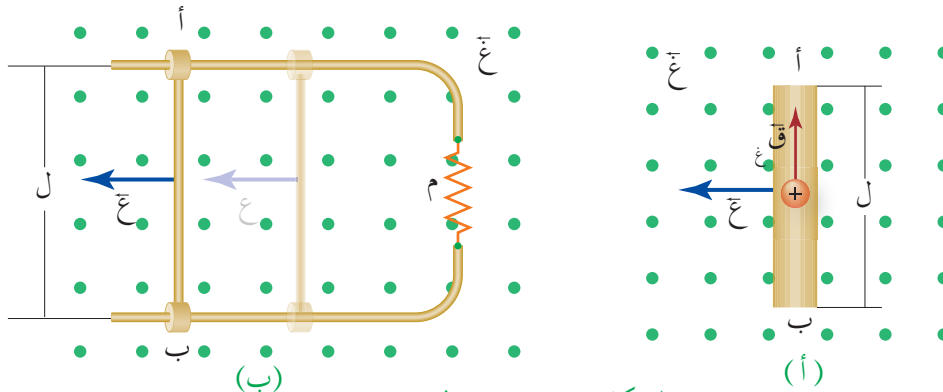
كيف نحدد اتجاه التيار الحثي في الدارة الكهربائية في الشكل (٦-١٠)؟ بما أن الطرف (أ) اكتسب شحنة موجبة، والطرف (ب) اكتسب شحنة سالبة، فإن اتجاه التيار عبر الدارة في المسار المغلق من الطرف الموجب إلى الطرف السالب؛ أي بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة.



الشكل (٦-١٠): القوة الدافعة الكهربائية الحثية واتجاه التيار الحثي.

مثال (٦-٤)

يوضح الشكل (٦-١١ أ) موصلاً مستقيماً طوله (٤٠) سم؛ ويتعامد طوله مع مجال مغناطيسي منتظم مقداره (٢) تسلا، إذا تحرك الموصل بسرعة ثابتة مقدارها (٨٠) سم/ث عمودياً على طوله وعلى المجال المغناطيسي. فأجب عما يأتي:



الشكل (٦-١١): مثال (٦-٤).

- ١ احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الموصل.
- ٢ احسب التيار الكهربائي الحثي المار في الموصل إذا كان جزءاً من دائرة كهربائية مقاومتها (٠,٨) أوم كما في الشكل (٦-١١/ب)، وحدد اتجاهه.

الحل:

١ نحسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية في موصل مستقيم من العلاقة:

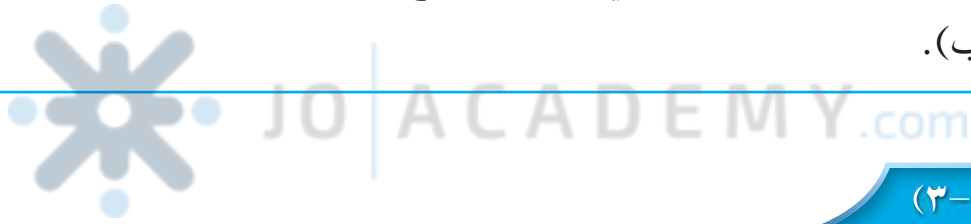
$$ق_د = ل ع غ$$

$$ق_د = ٠,٤ \times ٠,٨ \times ٢ = ٠,٦٤ \text{ فولت}$$

$$٢ ت = \frac{ق_د}{م}$$

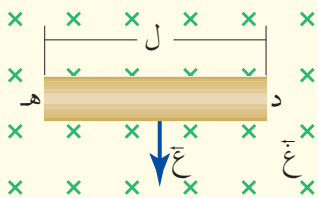
$$ت = \frac{٠,٦٤}{٠,٨} = ٠,٨ \text{ أمبير}$$

وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى نجد أن الطرف (أ) يكتسب شحنة موجبة والطرف (ب) يكتسب شحنة سالبة، فيكون اتجاه التيار الحثي عبر الدارة مع عقارب الساعة من الطرف (أ) إلى الطرف (ب).



مراجعة (٦-٣)

١ ما العوامل التي يعتمد عليها متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في موصل مستقيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم، موضحاً العلاقة بين متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة وكل عامل من تلك العوامل.



الشكل (٦-١٢): سؤال (٣).

٢ يتحرك موصل مستقيم في مجال مغناطيسي منتظم كما هو

موضح في الشكل (٦-١٢)، إذا علمت أن قوة دافعة كهربائية حثية تولدت بين طرفي الموصل، فأجب عن الأسئلة الآتية:

أ حدد أي طرفي الموصل المتحرك (هـ) أم (د) يكون أعلى جهداً.

ب حدد اتجاه المجال الكهربائي داخل الموصل.

تعلمت أن تياراً كهربائياً حثياً يتولد في دائرة مغلقة عندما يتغير التدفق المغناطيسي عبرها، وقمت بحساب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في ملف نتيجة للتغير في التدفق المغناطيسي عبره. كما لاحظت أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية سالبة في أثناء زيادة التدفق المغناطيسي، وموجبة في أثناء تناقصه. فما دلالة ذلك؟ وكيف نحدد اتجاه التيار الحثي في الملف؟ هذه الأسئلة أجاب عنها العالم لنز من خلال توصله لقانون سمي باسمه. ولتعرف هذا القانون وأهميته وكيفية استخدامه في تحديد اتجاه التيار الحثي الذي يتولد في ملف نفذ النشاط الآتي.

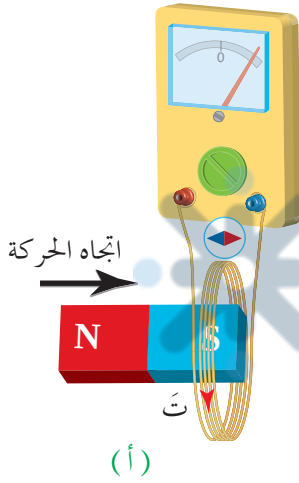
قانون لنز

نشاط (٦ - ٢)

الهدف: التحقق عملياً من قانون لنز.

المواد والأدوات: ملف دائري أو لولبي، وغلفانوميتر، ومغناطيس مستقيم، وأسلاك توصيل، وإبرة مغناطيسية.

خطوات تنفيذ النشاط:



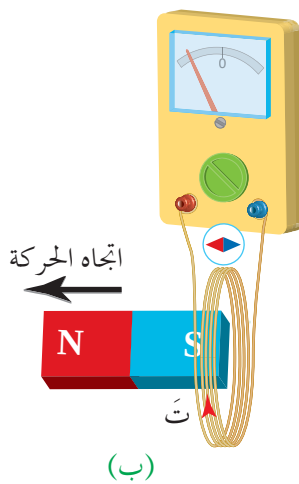
١. صل طرفي الملف بغلفانوميتر.

٢. قرب قطباً مغناطيسياً وليكن جنوبياً من الملف كما في الشكل (٦-١٣/أ)، ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر ولحركة المغناطيس في أثناء اقترابه من الملف.

٣. حدد القطب الشمالي للملف المستخدم لحظة انحراف مؤشر الغلفانوميتر مستخدماً الإبرة المغناطيسية.

٤. أبعد القطب الجنوبي عن الملف كما في الشكل (٦-١٣/ب). ولاحظ ما يحدث لمؤشر الغلفانوميتر، ولحركة المغناطيس، في أثناء ابتعاده عن الملف.

٥. حدد القطب الشمالي للملف المستخدم لحظة انحراف مؤشر الغلفانوميتر مستخدماً الإبرة المغناطيسية.



الشكل (٦-١٣): حركة مغناطيس بالنسبة إلى ملف.

هل لاحظت عند تنفيذك للنشاط وجود مقاومة لحركة المغناطيس في أثناء اقترابه من الملف وابتعاده عنه؟ وهل لاحظت أن اتجاه حركة مؤشر الغلفانوميتر قد تغير في أثناء اقتراب المغناطيس من الملف وفي أثناء ابتعاد المغناطيس عنه؟ ما تفسير ذلك؟

في أثناء اقتراب القطب الجنوبي للمغناطيس من الملف يزداد التدفق المغناطيسي الذي يخترقه، فتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية تولد تياراً كهربائياً حثياً في الملف ينتج منه مجال مغناطيسي حثي اتجاهه معاكس لاتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف؛ ما يجعل طرف الملف المقابل للقطب الجنوبي للمغناطيس قطباً مغناطيسياً جنوبياً وهو ما دلت عليه الإبرة المغناطيسية، فتتولد قوة تنافر بينهما تقاوم اقتراب المغناطيس منه. ولتحديد اتجاه التيار الكهربائي الحثي المتولد في الملف نستخدم قاعدة اليد اليمنى، حيث يشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف (القطب الشمالي)، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه التيار الحثي في لفات الملف، لاحظ الشكل (٦-١٣ أ).

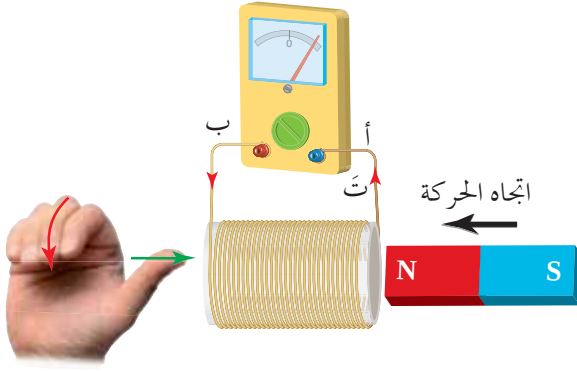
أما في أثناء ابتعاد القطب الجنوبي عن الملف فيقل التدفق المغناطيسي عبره، وتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية تولد تياراً كهربائياً حثياً في الملف ينتج منه مجال مغناطيسي حثي اتجاهه مع اتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف؛ ما يجعل طرف الملف المقابل للقطب الجنوبي للمغناطيس قطباً مغناطيسياً شمالياً وهو ما دلت عليه الإبرة المغناطيسية، فتتولد قوة تجاذب بينهما تقاوم ابتعاد المغناطيس عنه، فينعكس اتجاه التيار الحثي المتولد في الملف، لاحظ الشكل (٦-١٣ ب)، وهذا يفسر انحراف مؤشر الغلفانوميتر في الاتجاه المعاكس عند ابتعاد المغناطيس عن الملف.

يتبين مما سبق أن المجال المغناطيسي الحثي الناتج من تولد التيار الحثي في الملف يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له وهو ما يفسر الإشارة السالبة في قانون فارادي، ويمكن التعبير عن هذا الاستنتاج **بقانون لنز (Lenz's Law)** الذي ينص على أن:

«اتجاه التيار الحثي في ملف يكون؛ بحيث ينتج منه مجال مغناطيسي حثي يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له».

مثال (٦-٥)

حدد اتجاه التيار الحثي المتولد في لفات الملف نتيجة حركة المغناطيس بالاتجاه الموضح في الشكل (٦-٤).



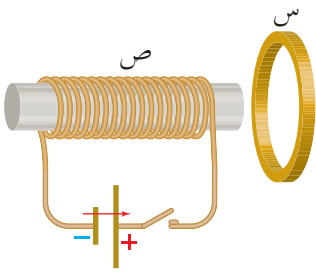
الحل:

الشكل (٦-٤): مثال (٥-٦).

لاحظ حركة المغناطيس بالنسبة إلى الملف، فأتثناء اقتراب القطب الشمالي للمغناطيس من الملف يزداد التدفق المغناطيسي عبره، وتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية في الملف تولد تياراً حثياً ووفقاً لقانون لنز ينتج منه مجال مغناطيسي حثي اتجاهه معاكس لاتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي يقاوم الزيادة فيه، ما يجعل طرف الملف المقابل للقطب الشمالي للمغناطيس قطباً مغناطيسياً شمالياً. وباستخدام قاعدة اليد اليمنى، يشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف، وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه التيار الحثي في لفات الملف على النحو المبين في الشكل (٦-٤) أي من النقطة (أ) إلى النقطة (ب) عبر الغلفانوميتر.

مثال (٦-٦)

حدد اتجاه التيار الحثي المتولد في لفات الملف الدائري (س) لحظة إغلاق المفتاح في دائرة المغناطيس الكهربائي (ص) كما في الشكل (٦-٥/أ).

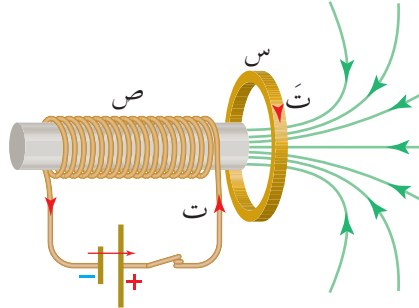


الشكل (٦-٥/أ): مثال (٦-٦).

الحل:

لحظة إغلاق مفتاح دائرة المغناطيس الكهربائي (ص) يتولد في لفاته تيار كهربائي في الاتجاه المبين، وينتج منه مجال مغناطيسي يخترق الملف (س)، فيزداد التدفق المغناطيسي داخل الملف (س)، وتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية في الملف (س) تولد تياراً حثياً ووفق قانون لنز ينتج منه مجال مغناطيسي حثي يعاكس اتجاه المجال المغناطيسي المسبب للتغير في التدفق المغناطيسي،

بحيث يقاوم الزيادة فيه ما يجعل طرف الملف (س) المقابل للقطب الجنوبي للمغناطيس الكهربائي قطبًا مغناطيسيًا جنوبيًا. وبتطبيق قاعدة اليد اليمنى، يشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي وتشير باقي الأصابع إلى اتجاه التيار الحثي في الملف حيث يكون مع اتجاه دوران عقارب الساعة عند النظر للملف الدائري من اليسار كما في الشكل (٦-١٥/ب).

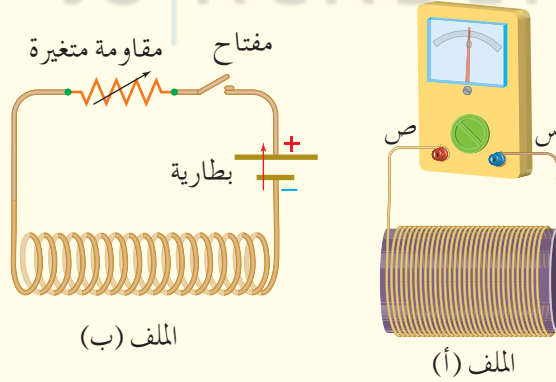


الشكل (٦-١٥/ب): مثال (٦-٦).

مراجعة (٦-٤)

١ اذكر نص قانون لنز، وبين أهميته؟

٢ حدد نوع كل من القطبين المتقابلين، واتجاه التيار الحثي في الملف (أ) في الشكل (٦-١٦) في الحالات الآتية:



الشكل (٦-١٦): سؤال (٢).

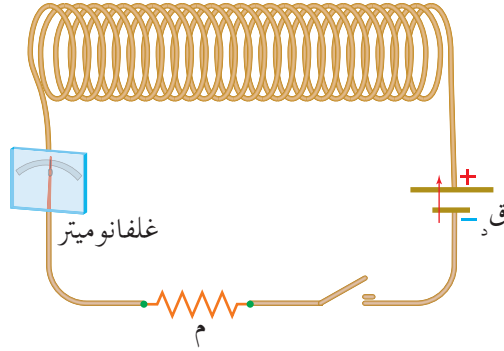
أ لحظة إغلاق دائرة الملف (ب).

ب في أثناء زيادة المقاومة المتغيرة في دائرة الملف (ب) والدائرة مغلقة.

ج في أثناء إدخال قلب حديد في الملف (ب) والدائرة مغلقة.

٣ إذا حركت مغناطيس داخل ملف، فستشعر بمقاومة لهذه الحركة. لماذا تكون هذه المقاومة أكبر في ملف عدد لفاته أكبر؟

درست أن التغير في التدفق المغناطيسي عبر ملف ينتج من مسبب خارجي مثل تقريب مغناطيس من ملف أو إبعاده عنه. فهل يمكن توليد قوة دافعة كهربائية حثية في دائرة ملف ذاتيًا دون مسبب خارجي للتغير في التدفق المغناطيسي عبره؟



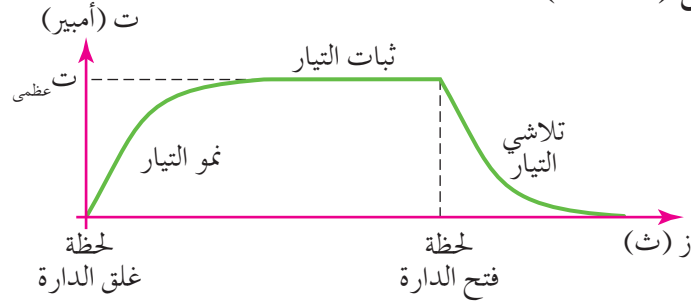
الشكل (٦-١٧): دائرة تحتوي على ملف لولبي.

عند تركيب دائرة كهربائية تحوي ملفًا لولبيًا وتوصيلها مع غلغانوميتر كما في الشكل (٦-١٧)، فإنه لحظة إغلاق الدارة الكهربائية يلاحظ من حركة مؤشر الغلغانوميتر أن التيار الكهربائي لا يصل لحظيًا من الصفر إلى قيمته العظمى. فلو تخيلت أن مصباحًا موصولًا في هذه الدارة وراقبته لرأيت أن شدة إضاءته تبدأ قليلة ثم تزداد ثم تثبت عندما يصل التيار إلى قيمته العظمى؛ ويعزى ذلك إلى ظاهرة الحث الذاتي؛ إذ إن المجال المغناطيسي الناتج من التيار الكهربائي الذي يمر في الملف اللولبي يزيد التدفق المغناطيسي عبر هذا الملف، فتنشأ قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في الملف وفق قانون لنز تقاوم الزيادة في التيار، وتسمى قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية عكسية.

ويسمى الملف اللولبي في هذه الحالة محثًا. وتعرف ظاهرة الحث الذاتي (Self-Inductance) بأنها تولد قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في ملف بسبب تغير التدفق المغناطيسي من الملف ذاته.

أما لحظة فتح الدارة الكهربائية فإن التيار في الدارة لا يصل لحظيًا إلى الصفر. فلو راقبت مصباحًا مضيئًا في الدارة فإن شدة إضاءته تتناقص حتى تختفي بعد مدة زمنية بسبب تناقص المجال المغناطيسي الناتج من التيار تدريجيًا في المحث، فيسبب تناقصًا في التدفق المغناطيسي عبره، وتنشأ فيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية وفق قانون لنز تقاوم النقصان في التيار تسمى قوة دافعة

كهربائية حثية ذاتية طردية. ويمكن تمثيل علاقة التيار الكهربائي المار في دائرة تحوي محثًا مع الزمن بيانيًا كما في الشكل (٦-١٨).



الشكل (٦-١٨): نمو التيار وتلاشيهِ في المحث.

وقد أثبت التجارب أن التغير في التدفق المغناطيسي الناشئ في المحث ($\Delta \Phi$) يتناسب طرديًا مع التغير في التيار الكهربائي المسبب له (ΔI) أي أن: $\Delta \Phi \propto \Delta I$

$$\Delta \Phi = \text{ثابت} \times \Delta I$$

ويسمى الثابت في الطرف الأيسر محاثّة المحث، ويرمز له بالرمز (ح)، أي أن:

$$\Delta \Phi = H \times \Delta I$$

وبقسمة الطرفين على الفترة الزمنية (Δt) التي حصل فيها التغير في التدفق نجد أن:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \times H = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

ولعدد (ن) من لفات المحث:

$$N \times \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \times H = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

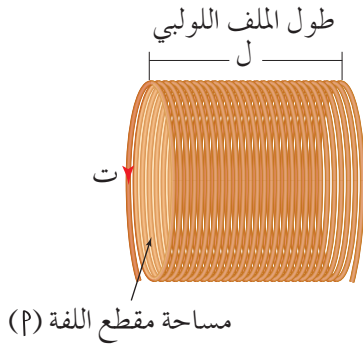
يمثل الطرف الأيمن سالب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية من قانون فارادي، وبما أنها متولدة في المحث فإنها تمثل متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية ($\mathcal{E}$) الذي يمكن حسابه من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \times H \dots \dots \dots (٦-٥)$$

حيث ($\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$): المعدل الزمني للتغير في التيار الكهربائي المار في المحث.

وتشير الإشارة السالبة إلى أن متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية يقاوم التغير في التدفق المغناطيسي المسبب له وفقًا لقانون لنز.

وتمثل **محاثة المحث** (ح) نسبة متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة فيه إلى المعدل الزمني للتغير في التيار الكهربائي المار في المحث، وتسمى المحاثة أيضًا معامل الحث الذاتي للمحث، ومن العلاقة السابقة يمكن استنتاج أن محاثة المحث تقاس بوحدة (فولت.ث / أمبير)، وتعرف هذه الوحدة في النظام العالمي للوحدات باسم (هنري). ويُعرف **الهنري** بأنه محاثة محث تتولد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية مقدارها (١) فولت عندما يكون المعدل الزمني لتغير التيار المار فيه (١) أمبير/ث.



الشكل (٦-١٩): العوامل التي تعتمد عليها محاثة المحث.

وللتوصل إلى العوامل التي تعتمد عليها محاثة محث، انظر إلى الشكل (٦-١٩) الذي يبين محثًا طوله (ل) ومساحة مقطعه (P) وعدد لفاته (ن). عندما يتصل المحث في دائرة كهربائية يتغير التيار الكهربائي المار فيه من (صفر) إلى (ت) فيتغير التدفق المغناطيسي الناتج منه من (صفر) إلى (Ø) في الفترة الزمنية ذاتها، أي أن: $\Delta \times \text{ح} = \Delta \times \text{ت} = \text{Ø}$ ولأن (ت = Ø، Ø = ٠) فإن:

$$\text{ح} \times \text{ت} = \text{Ø} \Leftrightarrow \frac{\text{Ø} \times \text{ن}}{\text{ت}} = \text{ح}$$

ونعبر عن التدفق المغناطيسي عبر المحث بالعلاقة: $\text{Ø} = \text{غ} \times \text{P}$.

$$\text{وبتعويض قيمة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي: غ} = \frac{\mu \times \text{ن} \times \text{ت}}{\text{ل}}$$

$$\text{يكون التدفق المغناطيسي: } \text{Ø} = \text{P} \times \frac{\mu \times \text{ن} \times \text{ت}}{\text{ل}}$$

وعليه تكون المحاثة:

$$\text{ح} = \text{P} \times \frac{\mu \times \text{ن}^2}{\text{ل}} \dots \dots \dots (٦-٦)$$

أي أن محاثة المحث تعتمد على طوله (ل)، ومساحة مقطعه (P)، وعدد لفاته (ن)، والنفاذية المغناطيسية لمادة قلب المحث، فإذا كانت هواء تكون النفاذية المغناطيسية (μ)، وتعد المحاثة ثابتة للمحث الواحد.

محث محاثته (٠,٤) هنري وعدد لفاته (٢٠٠) لفة، أغلقت دارته فاستغرق التيار زمناً مقداره (٠,٠٤) ثانية للوصول إلى قيمته العظمى، وخلال هذه المدة الزمنية تولدت قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية عكسية مقدارها (٢) فولت.

١ احسب القيمة العظمى للتيار الذي يمر فيه.

٢ المعدل الزمني للتغير في التدفق المغناطيسي خلال تلك المدة.

الحل:

$$١ \text{ ق د عكسية} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$٢- = - \frac{\Delta \Phi}{٠,٠٤} \times ٠,٤$$

(لاحظ أن متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية العكسية تكون إشارتها سالبة)

$$\Delta \Phi = \frac{٢}{٠,٢} = ١٠ \text{ أمبير}$$

$$\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = ١٠ - ٠ = ١٠ \text{ أمبير}$$

$$٢ \text{ ق د} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{\text{ق د}}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{١٠}{٠,٠١} = - ١٠٠ \text{ وبيير / ث}$$

١ ماذا نعني بقولنا إن محاثة محث تساوي (٢) هنري؟

٢ يبين الشكل (٦-٢٠) دارتين كهربائيتين، اعتمادًا على مكونات كل دائرة، صف إضاءة

المصباح في كل من الدارتين، مفسرًا إجابتك، في الحالات الآتية:

أ لحظة إغلاق الدارتين.

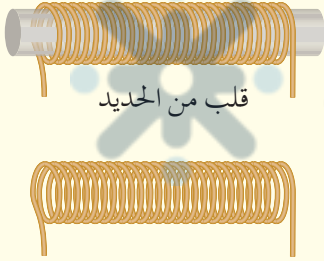
ب بعد مرور مدة زمنية كافية على إغلاق الدارتين.



الشكل (٦-٢٠): سؤال (٢).

٣ فسر: عدم وصول التيار إلى قيمته العظمى فور إغلاق الدارة التي تحوي محثًا، وعدم تلاشيهِ لحظيًا

فور فتحها.



٤ لديك ملفان لولبيان متماثلان، لفات أحدهما لفت

حول قلب من الحديد، انظر الشكل (٦-٢١)، بين

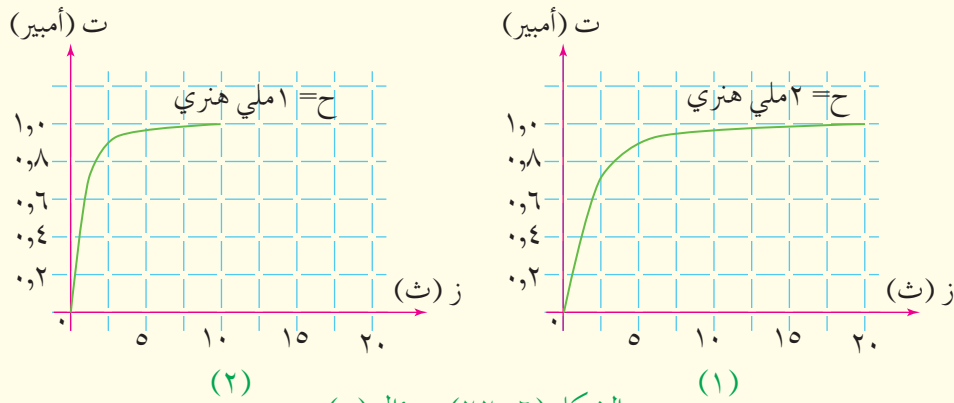
أثر نوع مادة القلب في مقدار محاثة المحث علمًا بأن

($\mu_{\text{الحديد}} = 5000 \mu$) تقريبًا.

الشكل (٦-٢١): سؤال (٤).

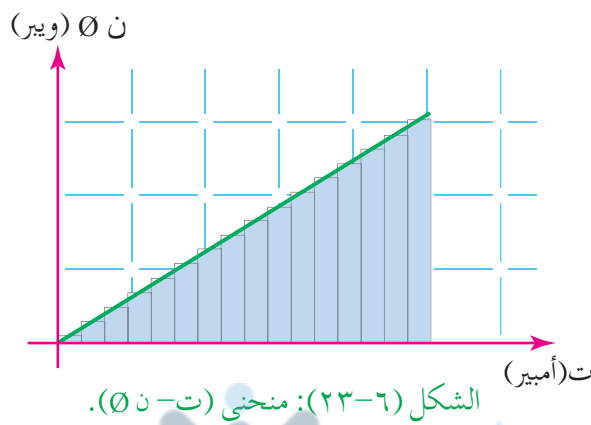
٥ يبين الشكل (٦-٢٢) تمثيلًا بيانيًا لتغير التيار الكهربائي بالنسبة إلى الزمن في دارتين تحوي كل

منهما محثًا، بين أثر محاثة المحث في المعدل الزمني لتغير التيار فيه.



الشكل (٦-٢٢): سؤال (٥).

تعرفت مما سبق أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة في المحث تمنع نمو التيار المار فيه لحظة إغلاق الدارة، وعليه فإن البطارية مصدر القوة الدافعة الكهربائية في الدارة تتغلب على هذه الممانعة فتبذل شغلاً يخزن كله على شكل طاقة مغناطيسية في المجال المغناطيسي الحثي للمحث إذا أهملت مقاومته الكهربائية (المحث مثالي). ولحساب الطاقة المغناطيسية المخزنة في المجال المغناطيسي



الحثي للمحث لاحظ الشكل (٦-٢٣) الذي يبين العلاقة بين التدفق المغناطيسي عبر المحث بوحدة ويبر، والتيار الكهربائي المار في الدارة بوحدة أمبير، حيث تمثل المساحة تحت المنحنى البياني الطاقة المغناطيسية المخزنة في المجال المغناطيسي الحثي، تأمل الشكل، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

- ما نوع العلاقة البيانية في الشكل؟
- عبّر عن ميل منحنى العلاقة بدلالة الكميات الفيزيائية في الشكل.
- ما الكمية الفيزيائية التي يمثلها الميل؟
- أثبت أن الطاقة المغناطيسية تعطى بالعلاقة الرياضية:

$$ط_{\text{مغناطيسية}} = \frac{1}{2} ح ت^2.$$

لا بد أنك لاحظت أن العلاقة البيانية في الشكل (٦-٢٣) خطية، ويمكن حساب ميل الخط المستقيم الذي يمثل محاذة المحث فيكون: $ح = \frac{\Phi}{ت}$.

والمساحة تحت منحنى (ت - Φ) تمثل مساحة مثلث طول قاعدته (ت) وارتفاعه (Φ) أي أن:

$$\text{مساحة المثلث} = \frac{1}{2} \times \text{القاعدة} \times \text{الارتفاع}$$

$$ط_{\text{مغناطيسية}} = \frac{1}{2} ت \times \Phi$$

$$\text{ومن الميل نجد أن: } \frac{ح}{ن} = \Phi$$

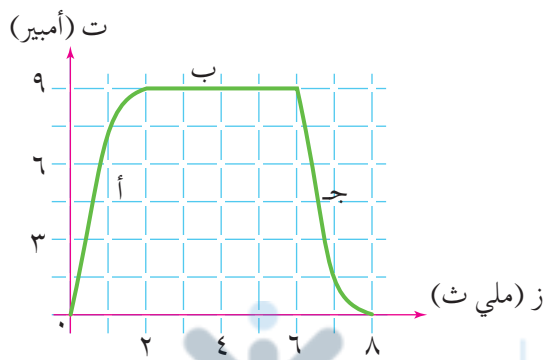
وعليه فإن الطاقة المغناطيسية المخزنة في المحث يمكن حسابها من العلاقة الرياضية الآتية:

$$ط_{مغناطيسية} = \frac{1}{2} ح ت^2 \dots\dots\dots (٦-٧)$$

عملياً لحظة فتح الدارة نتيجة تولد قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية طردية تتحول الطاقة المغناطيسية المخزنة في المحث إلى طاقة كهربائية تظهر على شكل شرارة كهربائية.

مثال (٦-٨)

يتغير التيار الكهربائي في دائرة محث محاثته (٢, ٠) هنري من لحظة غلق دارته حتى تلاشي التيار فيها بعد فتح الدارة وفق المنحنى في الشكل (٦-٢٤). مستعيناً بالشكل أجب عن الأسئلة الآتية:



١ ماذا تمثل كل فترة من الفترات (أ، ب، ج)؟

٢ احسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية

الذاتية المتولدة في كل من الفترات (أ، ب، ج).

٣ احسب الطاقة المغناطيسية العظمى المخزنة في المحث. الشكل (٦-٢٤): مثال (٦-٨).

٤ احسب الطاقة المغناطيسية المخزنة في المحث عندما يكون التيار الكهربائي في المحث ثلث قيمته العظمى.

الحل:

١ الفترة (أ) تمثل مرحلة نمو التيار، والفترة (ب) تمثل مرحلة ثبات التيار، بينما الفترة (ج) تمثل مرحلة تلاشي التيار.

٢ نحسب متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية المتولدة في المحث بتطبيق العلاقة:

$$ق_ـ = - ح \times \frac{\Delta ت}{\Delta ز}$$

الفترة (أ)

$$ق_ـ = - ٠,٢ \times \frac{(٠ - ٩)}{(٠ - ٣ - ١٠ \times ٢)}$$

$$ق_ـ = ٩٠٠ - \text{فولت}$$

الفترة (ب)

$$Q_2 = \frac{(9-9)}{(3-10 \times 2 - 3-10 \times 6)} \times 0,2 = \text{صفر}$$

الفترة (ج)

$$Q_2 = \frac{(9-0)}{(3-10 \times 6 - 3-10 \times 8)} \times 0,2 =$$

$$Q_2 = 900 \text{ فولت}$$

٣ تكون للطاقة المغناطيسية المخزنة في المحث قيمة عظمى عندما يصل التيار إلى قيمته العظمى:

$$P_{\text{مغناطيسية عظمى}} = \frac{1}{2} C T^2 \text{ عظمى (من الشكل تظهر القيمة العظمى للتيار = ٩ أمبير)}$$

$$= \frac{1}{2} \times 0,2 \times 9^2 =$$

$$= 8,1 \text{ جول}$$

$$٤ T = \frac{1}{3} T \text{ عظمى}$$

$$T = 9 \times \frac{1}{3} = 3 \text{ أمبير.}$$

$$P_{\text{مغناطيسية}} = \frac{1}{2} C T^2 =$$

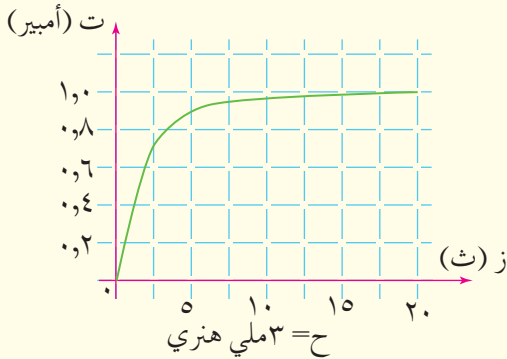
$$= \frac{1}{2} \times 0,2 \times 3^2 =$$

$$= 0,9 \text{ جول}$$



JO ACADEMY.com

مراجعة (٦-٦)



١ فسر: تظهر شرارة كهربائية لحظة فتح دائرة تحوي محثًا.

٢ مستعينًا بالتمثيل البياني في الشكل (٦-٢٥) الذي يبين

تغير التيار بالنسبة إلى الزمن في دائرة تحوي محثًا، احسب الطاقة المغناطيسية العظمى المخزنة في المحث.

الشكل (٦-٢٥): سؤال (٢).

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ محاثة المحث الذي تتولد فيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية مقدارها فولت واحد عندما يتغير

فيه التيار بمعدل أمبير واحد كل ثانية تسمى:

أ تسلا ب هنري ج فولت د وبير

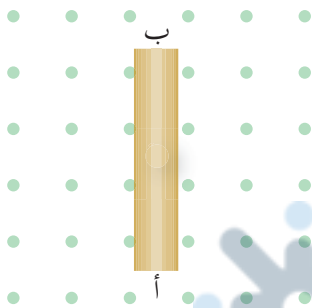
٢ لحظة فتح دائرة تحتوي على محث تنشأ قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في الملف تكون:

أ طردية، فينمو التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًا.

ب عكسية، فيتلاشى التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًا.

ج طردية، فيتلاشى التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًا.

د عكسية، فينمو التيار الكهربائي في الدارة تدريجيًا.



٣ موصل مستقيم (أب) موضوع في مجال مغناطيسي منتظم

كما في الشكل (٦-٢٦)، إذا أردنا أن يكون الطرف (أ)

أعلى جهدًا بالنسبة إلى الطرف (ب)، فإنه يتعين التأثير

بقوة خارجية لتحريك الموصل باتجاه:

الشكل (٦-٢٦): سؤال (١) فقرة (٣).

أ (+س). ب (-س). ج (+ص). د (-ص).

٤ في أثناء اقتراب قطب مغناطيسي جنوبي من طرف ملف لولبي في دائرة مغلقة، يتولد في

الملف تيار كهربائي حثي ينتج منه مجال مغناطيسي حثي يقاوم:

أ زيادة التدفق المغناطيسي؛ ولذا يصبح طرف الملف المقابل للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًا شماليًا.

ب نقصان التدفق المغناطيسي؛ ولذا يصبح طرف الملف المقابل للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًا شماليًا.

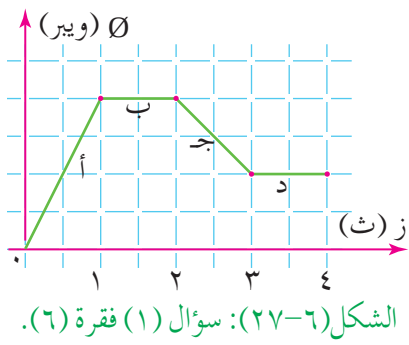
ج زيادة التدفق المغناطيسي؛ ولذا يصبح طرف الملف المقابل للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًا جنوبيًا.

د نقصان التدفق المغناطيسي؛ ولذا يصبح طرف الملف المقابل للمغناطيس قطبًا مغناطيسيًا جنوبيًا.

٥ الطاقة المغناطيسية المخزنة في المحث تتناسب تناسبًا:

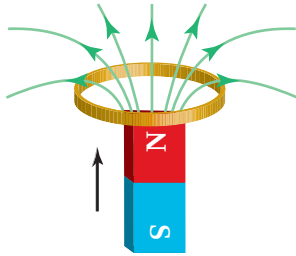
أ طرديًا مع مربع التيار المار فيه. ب طرديًا مع التيار المار فيه.

ج عكسيًا مع مربع التيار المار فيه. د عكسيًا مع التيار المار فيه.



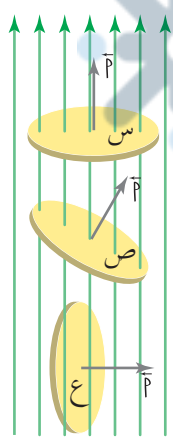
٦. مثل التدفق المغناطيسي مع الزمن بيانًا كما في الشكل (٦-٢٧)، لحركة مغناطيس بالنسبة إلى ملف. نستنتج من التمثيل البياني أن قوة دافعة كهربائية حثية ستولد في أثناء:
- أ. الفترتين (أ) و (ب). ب. الفترتين (ب) و (د). ج. الفترتين (أ) و (ج). د. الفترتين (ج) و (د).

٢. دائرة كهربائية تحوي محثًا ومقاومة متغيرة، فإذا أنقص تيار الدارة الكهربائي إلى النصف، فكيف تتغير الطاقة المغناطيسية المخزنة في المحث في أثناء ذلك؟



٣. حدد اتجاه التيار الكهربائي الحثي المتولد في الحلقة المبينة في الشكل (٦-٢٨) في أثناء اقتراب المغناطيس منها. موضحًا ذلك.

الشكل (٦-٢٨): سؤال (٣).

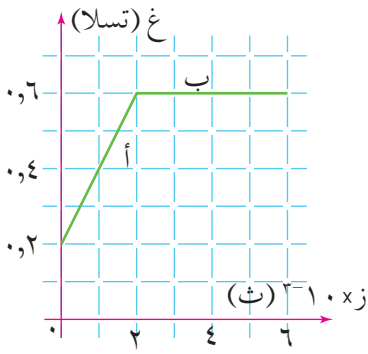


٤. ثلاثة سطوح (س، ص، ع) متماثلة، مساحة كل منها (٦، ٠) سم^٢ مغمورة في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (٨، ٠) تسلا، لاحظ الشكل (٦-٢٩)، ثم أجب عن الأسئلة الآتية:

- أ. أي السطوح الثلاثة يكون التدفق المغناطيسي عبره أكبر؟ فسر إجابتك.
 ب. أي السطوح الثلاثة يكون التدفق المغناطيسي عبره صفرًا؟ فسر إجابتك.
 ج. احسب التدفق المغناطيسي الذي يخترق السطح (ص) إذا كانت الزاوية بين متجه المساحة واتجاه المجال المغناطيسي (٣٧°).

الشكل (٦-٢٩): سؤال (٤).

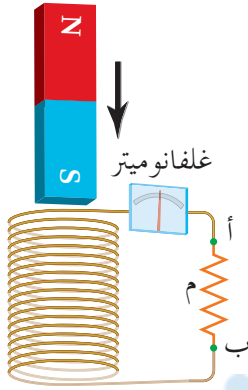
٥. موصل مستقيم طوله (٥، ٠) م، في وضع أفقي، يتحرك باتجاه المحور الصادي السالب بسرعة (٢٠) سم/ث في مجال مغناطيسي منتظم مقداره (٨، ٠) تسلا باتجاه المحور الزيني الموجب. احسب:
- أ. متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة فيه.
 ب. إذا كان الموصل جزءًا من دائرة كهربائية مغلقة مقاومتها (٢) أوم. فاحسب التيار الحثي الذي يمر فيها.



الشكل (٦-٣٠): سؤال (٦).

٦ يمثل الشكل (٦-٣٠) الرسم البياني لتغير المجال المغناطيسي بالنسبة إلى الزمن، فإذا كان هذا المجال يخترق ملفاً عدد لفاته (٢٠٠) لفة، ومساحة اللفة الواحدة (4×10^{-2}) م^٢، بحيث يكون متجه مساحة الملف موازياً لاتجاه المجال المغناطيسي. فاحسب:

- أ) التغير في التدفق المغناطيسي عبر الملف في كل من الفترتين (أ، ب).
 ب) متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في كل من الفترتين (أ، ب).



الشكل (٦-٣١): سؤال (٧).

٧ أسقط طالب مغناطيساً داخل ملف كما في الشكل (٦-٣١)، فتحرك المغناطيس بتسارع أقل من تسارع السقوط الحر، فافترض الطالب أنه توجد قوة معاكسة لقوة الجاذبية الأرضية تؤثر في حركة المغناطيس. أثبت صحة هذه الفرضية.

٨ تغير التيار المار في دائرة محث من (٣) أمبير إلى (٧) أمبير خلال (٠,٢) ثانية. فإذا كانت محاثة المحث (٢٠) هنري، وعدد لفاته (١٠٠٠) لفة. فاحسب في أثناء المدة الزمنية التي تغير فيها التيار الكهربائي:

- أ) القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية العكسية المتولدة في المحث.
 ب) التغير في الطاقة المغناطيسية المخزنة في المحث.
 ج) التغير في التدفق المغناطيسي عبر المحث.

٩ ملف عدد لفاته (٢٠٠) لفة، ومساحة مقطع كل لفة من لفاته (٨,٠) سم^٢، موضوع في مجال مغناطيسي مقداره (٢٠) تسلا، فإذا كان متجه مساحة الملف باتجاه المجال المغناطيسي فاحسب:

- أ) التدفق المغناطيسي عبره.
 ب) متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية الذاتية الطردية المتولدة فيه إذا تلاشى المجال المغناطيسي في مدة زمنية مقدارها (٠,٢) ثانية.

- ١ ملف لولبي يتكون من (٤٥٠) لفة، ومساحة مقطعه (١٥٠) سم^٢، وطوله (٢٠) سم، يمر فيه تيار كهربائي مقداره (٤٠) ملي أمبير.
أولاً: احسب:

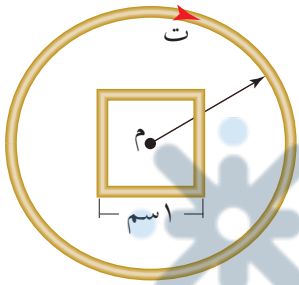
أ مقدار المجال المغناطيسي الناشئ داخل الملف اللولبي.

ب مقدار التدفق المغناطيسي عبر الملف.

ج محاطة الملف اللولبي.

ثانياً: أثبت أن الطاقة المخزنة في الملف اللولبي يمكن أن تعطى بالعلاقة الآتية:

$$ط = \frac{\mu \cdot \frac{1}{2} I^2 \cdot L}{2}$$



- ٢ بين الشكل مقطعاً لملف لولبي مكون من (١٠٠) لفة، طوله (٢٠) سم، ومساحة مقطعه (٣٠) سم^٢، ويمر فيه تيار كهربائي (٣) أمبير باتجاه دوران عقارب الساعة، وُضع في مركزه ملف مربع الشكل طول ضلعه (١) سم وعدد لفاته لفة واحدة. جد:

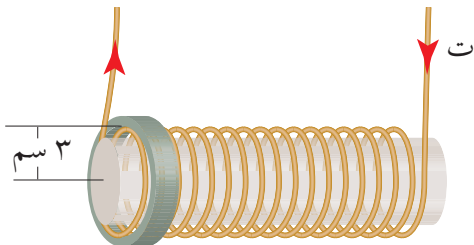
أ المجال المغناطيسي الناشئ داخل الملف اللولبي، مقداراً واتجهاً.

ب التدفق المغناطيسي عبر الملف المربع.

ج متوسط القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف المربع، إذا تلاشى التيار الكهربائي في الملف اللولبي خلال (٣) ثوان.

د التيار الكهربائي الحثي المتولد في الملف المربع مقداراً واتجهاً، إذا كانت مقاومته (٢, ٠) أوم.

- ٣ حلقة من الألمنيوم مساحتها $(\pi \cdot 9 \times 10^{-4})$ م^٢ ومقاومتها (٣, ٠) ملي أوم، موضوعة حول

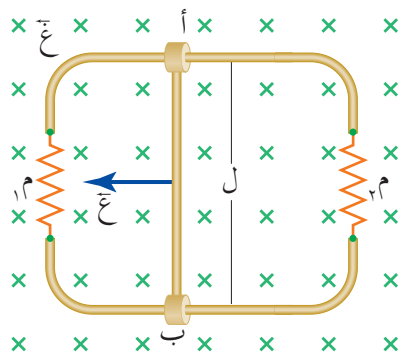


أحد طرفي ملف لولبي يحتوي على (١٠٠٠) لفة/م كما في الشكل. يمر فيه تيار كهربائي فيتولد مجال مغناطيسي عند أحد طرفي الملف اللولبي مقداره نصف

مقدار المجال المغناطيسي المتولد داخله، إذا كان المعدل الزمني لتغير التيار الكهربائي عبر الملف اللولبي (٢٧٠) أمبير/ث، فجد:

أ) التيار الحثي المتولد في الحلقة مقداراً واتجاهاً.

ب) المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الحثي في مركز الحلقة مقداراً واتجاهاً.

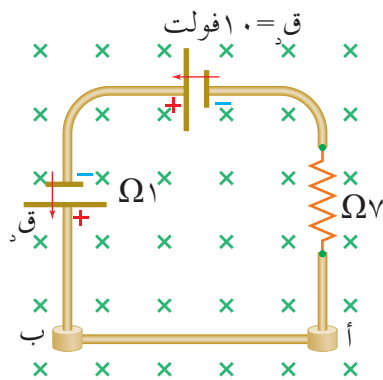


٤ في الشكل المجاور، موصل مستقيم (أ ب) طوله (٣٥) سم، قابل للانزلاق دون احتكاك على مجرى فلزي، مغمور داخل مجال مغناطيسي مقداره (٢,٥) تسلا باتجاه المحور الزيني السالب فإذا كان طرفا المجرى متصلين بمقاومتين (م = ٢ ملي أوم، م = ٥ ملي أوم)، وسُحب الموصل باتجاه (-س) بسرعة ثابتة مقدارها (٨) مم/ث، فاحسب:

أ) فرق الجهد الكهربائي بين طرفي الموصل (أ ب). ما علاقته بجهد كل من المقاومتين؟

ب) التيار الحثي في كل من المقاومتين.

ج) القدرة الكهربائية المستهلكة في كل من المقاومتين.



٥ مجال مغناطيسي منتظم مقداره (١٠) تسلا، يخترق دائرة كهربائية باتجاه المحور الزيني السالب كما في الشكل، فإذا كان الموصل (أ ب) في الدارة قابلاً للانزلاق على امتداد محور الصادات دون احتكاك، وكتلة وحدة الأطوال منه (٢٠) غ/سم، فاحسب القوة الدافعة الكهربائية (ق) التي تجعل الموصل (أ ب) ساكناً.

مقدمة إلى فيزياء الكم

الفصل السابع

Introduction to Quantum Physics

قدّمت الفيزياء الكلاسيكية، ممثلة بالميكانيكا، والحرارة، والكهرمغناطيسية، التي طُورت على مدى ما يقرب قرن من الزمن، العديد من القوانين والنظريات التي أسهمت إلى حدّ كبير في تفسير الظواهر الطبيعية المختلفة وفهمها، والتي كان لها أثر في ظهور الكثير من الاكتشافات العلمية. وقد اعتقد العلماء في نهاية القرن التاسع عشر أنهم توصلوا إلى معظم ما عليهم معرفته في الفيزياء. ثم بدأت نتائج التجارب التي أجريت على المادة وعلاقتها بالإشعاع تكشف عن ظواهر جديدة لم تنجح الفيزياء الكلاسيكية في تفسيرها، ومع بداية القرن العشرين توصل ماكس بلانك إلى فرضه الشهير في تكمية الطاقة، الذي كان بداية لحقبة جديدة حوّلت أنظار العلماء نحو مفاهيم وطرائق جديدة في معالجة النتائج التجريبية، أدى إلى ظهور فيزياء الكم. فما المقصود بتكمية الطاقة؟ وما أهم الظواهر التي شكلت تحدياً للفيزياء الكلاسيكية؟ ولماذا لم تنجح في تفسيرها؟ وبماذا تختلف الفيزياء الكلاسيكية عن فيزياء الكم؟ هذه الأسئلة وغيرها ستتمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

في هذا الفصل

(١-٧)

تكمية الطاقة.

(٢-٧)

الظاهرة الكهرضوئية.

(٣-٧)

ظاهرة كومبتون.

(٤-٧)

الأطياف الذرية للغازات

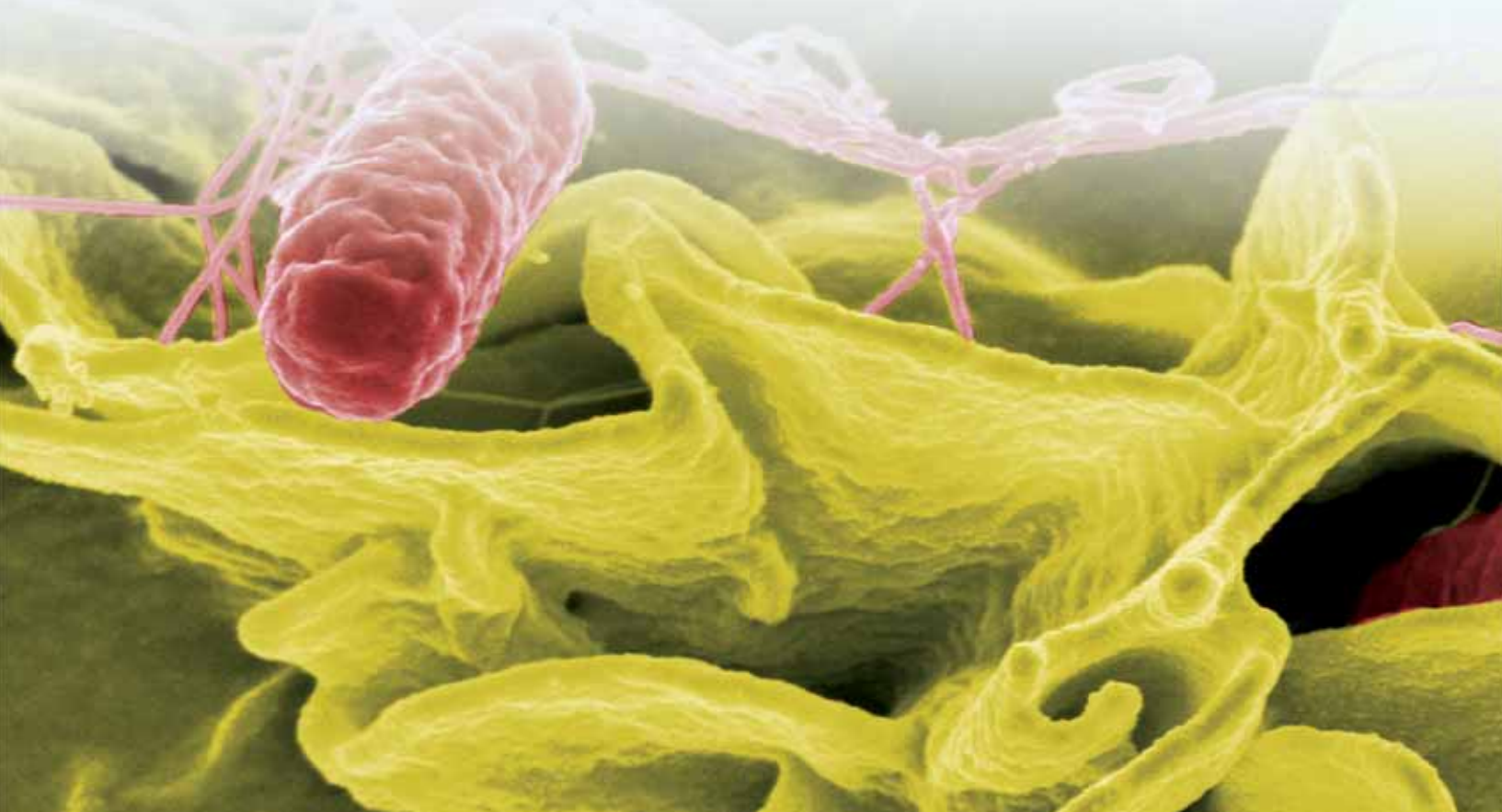
(٥-٧)

الطبيعة المزدوجة للإشعاع والمادة.

ينتج المجهر الإلكتروني الماسح صوراً ثلاثية الأبعاد، تبين الصورة من مجهر إلكتروني بكتيريا السالمونيلا المسببة للتسمم الغذائي.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- * توضح مبدأ تكمية الطاقة لبلاك، وتعبر عنه رياضياً.
- * تتعرف بعض الظواهر التي لم تتمكن الفيزياء الكلاسيكية من تفسيرها.
- * توضح الظاهرة الكهروضوئية، والخلية الكهروضوئية وعناصرها.
- * توضح مفاهيم: اقتران الشغل، وتردد العتبة، وتيار الإشباع، وجهد القطع.
- * تقارن بين الفيزياء الكلاسيكية وفيزياء الكم من حيث تفسيرهما للظاهرة الكهروضوئية.
- * تحلل علاقات بيانية بين الطاقة الحركية العظمى للإلكترون الضوئي وتردد الضوء الساقط.
- * تذكر العلاقات الرياضية المرتبطة بمفاهيم: جهد القطع، والطاقة الحركية العظمى، واقتران الشغل.
- * تطبق العلاقات الرياضية للظاهرة الكهروضوئية في حل مسائل حسابية.
- * تستقصي تردد العتبة.
- * تصف ظاهرة كومتون.
- * تذكر فروض بور الأربعة المتعلقة بذرة الهيدروجين (نموذج بور الذري).
- * تطبق فروض بور لذرة الهيدروجين في حساب: (نصف قطر مدار الإلكترون، طاقة المستوى، طاقة التأين، فرق الطاقة بين مستويين).
- * تذكر نص فرض دي بروي، وتمثل علاقة طول الموجة المصاحبة للإلكترون بزخمه الخطي رياضياً، وتطبقها في حل مسائل حسابية.
- * توضح أن طول محيط مدار الإلكترون يساوي عددًا صحيحًا من طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون.



تصدر عن الأجسام في الطبيعة إشعاعات كهرومغناطيسية عندما تكون درجة حرارتها فوق الصفر المطلق، ويعتمد إشعاع الجسم على درجة حرارته وعلى طبيعة سطحه، وهذا الإشعاع من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية يتألف من موجات كهرومغناطيسية يصدر عن الأجسام على هيئة سيل متصل (مستمر) من الطاقة؛ نتيجة اهتزازات جسيمات مشحونة داخلها، ويمكن للجسيم المهتز عند تردد اهتزازة معين أن يبعث مقداراً غير محدد من الطاقة أو يمتصه، عندما يتغير اتساع اهتزازته. وتناسب طاقة الإشعاع طردياً مع شدته، التي تتناسب مع اتساع اهتزازات الجسيمات المهتزة. هذه النظرة لطبيعة الإشعاع جعلت الفيزياء الكلاسيكية تواجه صعوبة في تفسير ظواهر فيزيائية كثيرة، مثل: الظاهرة الكهروضوئية، وظاهرة كومبتون، وغيرهما من الظواهر.

في العام (١٩٠٠) قدّم العالم ماكس بلانك (Max Planck) تصوّراً جديداً للإشعاع؛ إذ افترض أن الإشعاع وحدات منفصلة ليست متصلة تسمى كمّات مفردة كمّة، لكل منها طاقة محددة كمّاة تتناسب طردياً مع تردد الإشعاع؛ أي أن:

$$E = hf \quad (1-7)$$

حيث (ط): طاقة الكمّة الواحدة، و(ت): تردد الإشعاع، و(هـ): ثابت بلانك، ويساوي تقريباً $(6.63 \times 10^{-34} \text{ جول. ثانية})$.

وفرضية بلانك للإشعاع باتت تعرف بمبدأ **تكمية الطاقة** الذي ينص على أن الطاقة الإشعاعية المنبعثة أو الممتصة تساوي عدداً صحيحاً من مضاعفات الكمّة (هـ ت).

سخن جسم حتى توهج باللون الأحمر، إذا كان أحد الترددات الإشعاعية الصادرة عنه يساوي (4×10^{14}) هيرتز، فاحسب طاقة الكمية الواحدة لهذا الإشعاع.

الحل:

$$ط = ه \cdot ت$$

$$= 6,63 \times 10^{-34} \times 4 \times 10^{14}$$

$$= 2,65 \times 10^{-19} \text{ جول}$$

وهذا المقدار من الطاقة صغير جدًا مقارنة بوحدة قياس الطاقة في النظام العالمي للوحدات (جول)، لذلك استخدمت وحدة أخرى لقياس الطاقة تسمى **الإلكترون فولت (eV)**، وهي الطاقة الحركية التي يكتسبها إلكترون عندما يتسارع عبر فرق جهد كهربائي مقداره (١) فولت. ومن العلاقة (٢-١):

$$ط = e \cdot ج$$

يمكن التوصل إلى أن (١) إلكترون فولت يساوي $(1,6 \times 10^{-19})$ جول، وعليه فإن طاقة الكمية الواحدة للإشعاع الصادر عن الجسم:

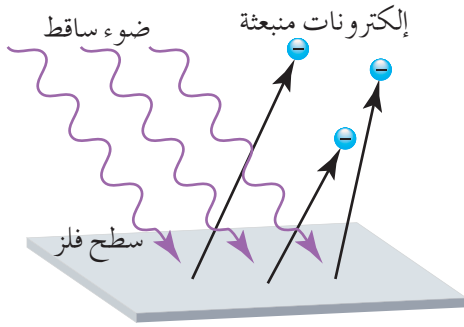
$$ط = \frac{2,65 \times 10^{-19}}{1,6 \times 10^{-19}}$$

$$= 1,66 \text{ إلكترون فولت.}$$

١- وضح المقصود بتكمية الطاقة، والإلكترون فولت.

٢- ما الفرضية التي وضعها بلانك لتفسير الإشعاع الصادر عن الأجسام؟

٣- ما الفرق بين تفسير بلانك للإشعاع الصادر عن الأجسام، وتفسير الفيزياء الكلاسيكية؟

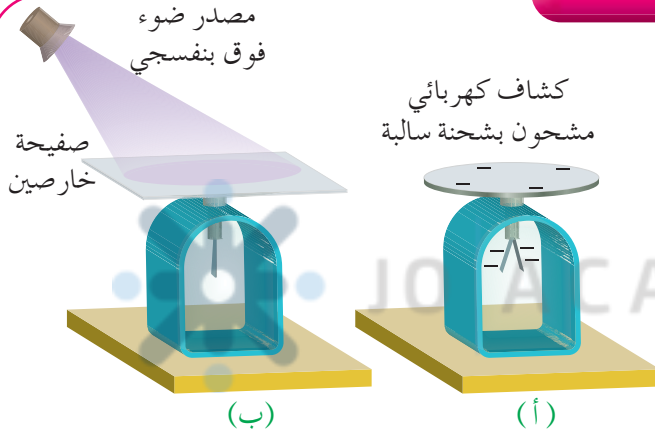


الشكل (٧-١): الظاهرة الكهروضوئية.

دلت التجارب على أن سقوط ضوء على سطح فلز يؤدي أحياناً إلى انبعاث إلكترونات منه، وقد أطلق على هذه الظاهرة اسم **الظاهرة الكهروضوئية**، وأطلق على الإلكترونات المنبعثة اسم إلكترونات ضوئية (photoelectrons)، أي إلكترونات تنبعث بفعل الضوء، كما في الشكل (٧-١). ولتعرف الظاهرة الكهروضوئية ادرس النشاط الآتي.

الظاهرة الكهروضوئية

نشاط (٧-١)



الشكل (٧-٢): توضيح الظاهرة الكهروضوئية.

الهدف: توضيح الظاهرة الكهروضوئية.

المواد والأدوات: صفوحة خارصين، وكشاف كهربائي، ومصدر ضوء فوق بنفسجي (القوس الكربوني)، وقضيب زجاج، وقطعة حرير، وورق زجاج (سنفرة).

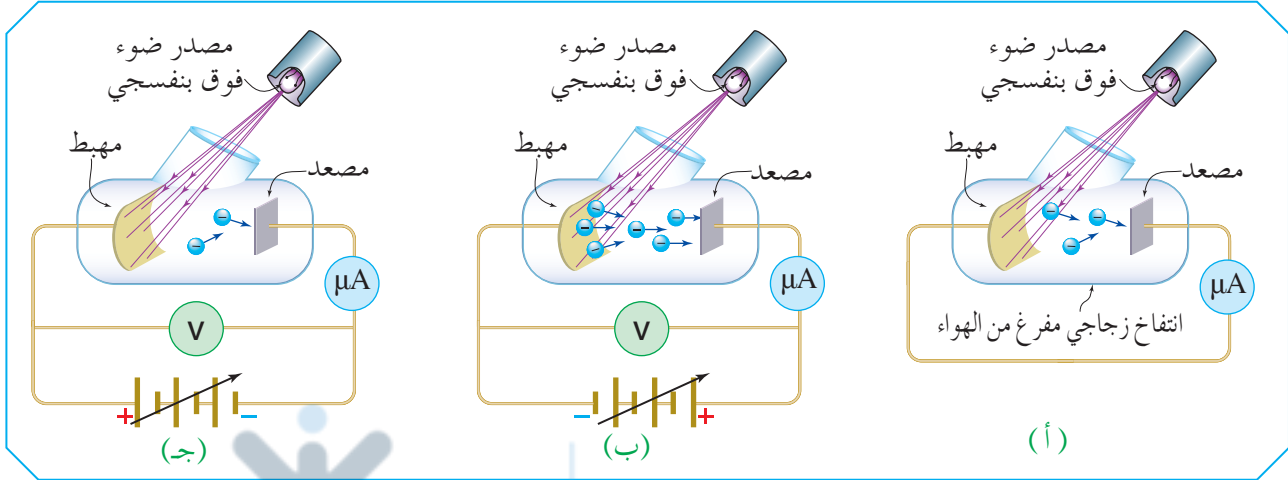
خطوات تنفيذ النشاط:

- ١ اصقل صفوحة الخارصين حتى تصبح لامعة مستخدماً ورق الزجاج.
- ٢ اشحن الكشاف الكهربائي بالحث بشحنة سالبة مستخدماً قضيب الزجاج وقطعة الحرير، ولاحظ انفراج ورقتي الكشاف كما في الشكل (٧-٢/أ).
- ٣ صل صفوحة الخارصين بالكشاف الكهربائي، أو ضعها على قرص الكشاف.
- ٤ سلط مصدر الضوء فوق البنفسجي على صفوحة الخارصين، كما في الشكل (٧-٢/ب). وراقب ما يحدث لورقتي الكشاف، ماذا تلاحظ؟

لا شك في أنك شاهدت انطباق ورقتي الكشاف عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية على سطح الخارصين، فما تفسير ذلك؟ نستنتج أن الكشاف فقد شحنته بتأثير سقوط الأشعة فوق البنفسجية على الخارصين، ما يدل على فقدان هذا السطح للإلكترونات وتفرغ شحنة الكشاف.

■ (٧-٢-١) تجربة لينارد (Lenard Experiment)

يعد العالم لينارد (Lenard) أول من درس الظاهرة الكهروضوئية تجريبياً، مستخدماً الدارة المبينة في الشكل (٧-٣)، التي تحتوي على خلية كهروضوئية تتكوّن من انتفاخ زجاجي مفرغ من الهواء؛ لكي لا تعيق جزيئات الهواء حركة الإلكترونات المنبعثة، ويوجد داخل الانتفاخ صفيحتان فلزيتان، الأولى تنبعث منها الإلكترونات عند سقوط الضوء عليها تسمى المهبط، والثانية تجمع الإلكترونات المنبعثة تسمى المصعد.

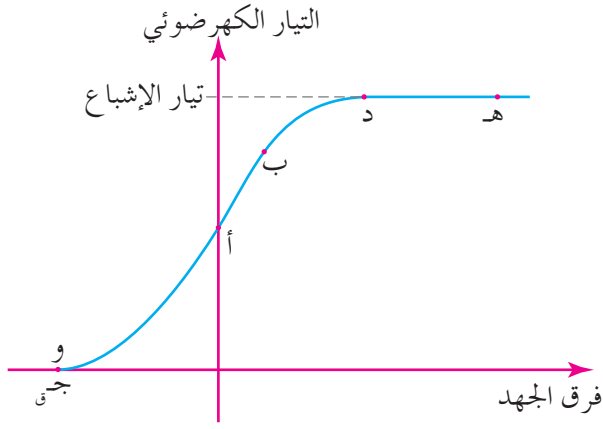


الشكل (٧-٣): الدارة المستخدمة في تجربة لينارد.

وصل لينارد الخلية الكهروضوئية مع ميكروأميتر بغياب مصدر فرق جهد كهربائي كما في الشكل (٧-٣/أ)، ثم أضاف مصدر فرق جهد كهربائي متغير، كما في الشكلين (٧-٣/ب، ج)، ومثلت العلاقة بين فرق الجهد بين المصعد والمهبط والتيار الكهربائي المار في الخلية الكهروضوئية كما في الشكل (٧-٤).

لاحظ لينارد عند سقوط ضوء بتردد مناسب على مهبط الخلية الكهروضوئية أن الميكروأميتر يكشف عن مرور تيار كهربائي بغياب مصدر فرق الجهد، فاستنتج أن مصدر هذا التيار هو إلكترونات ضوئية تحررت من المهبط ووصلت إلى المصعد. لاحظ النقطة (أ) في الشكل (٧-٤)؛ ما يدل على أن هذه الإلكترونات تمتلك قدرًا كافيًا من الطاقة الحركية مكّنتها من الوصول إلى المصعد، ويسمى التيار الناتج من حركة الإلكترونات المنبعثة من المهبط والمتجهة إلى المصعد **تيارًا كهروضوئيًا**.

أضاف لينارد إلى الدارة مصدر فرق جهد كهربائي متغير؛ حيث كان جهد المصعد موجبًا والمهبط سالبًا، كما في الشكل (٧-٣/ب)، فلاحظ زيادة التيار الكهروضوئي، فاستنتج أن الفرق في الجهد بين



الشكل (٧-٤): العلاقة البيانية بين فرق الجهد بين المصعد والمهبط والتيار الكهروضوئي في الخلية الكهروضوئية .

المصعد والمهبط يبذل شغلاً موجباً على الإلكترونات ناقلًا إليها طاقة حركية، ويجذب المزيد منها نحو المصعد، انظر النقطة (ب) في الشكل (٧-٤).

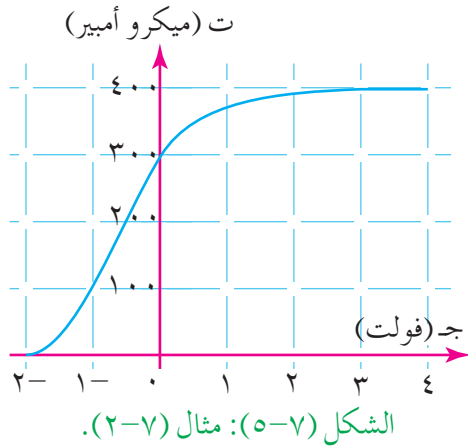
ومع زيادة فرق الجهد الموجب يزداد التيار الكهروضوئي إلى أن يصل إلى قيمة معينة يثبت عندها. انظر النقطة (د) في الشكل (٧-٤).

ولاحظ ثبات التيار الكهروضوئي بين النقطتين (د، هـ)، بالرغم من الاستمرار في زيادة فرق

الجهد بين المصعد والمهبط؛ وهذا يعني أن الإلكترونات المتحررة من المهبط جميعها قد وصلت إلى المصعد، وتسمى القيمة العظمى للتيار الكهروضوئي **تيار الإشباع**، وهو التيار الكهروضوئي الناتج من حركة الإلكترونات الضوئية جميعها المتحررة من المهبط والواصلة إلى المصعد.

أعاد لينارد وصل مهبط الخلية الكهروضوئية بالقطب الموجب والمصعد بالقطب السالب، فأصبح فرق الجهد الكهربائي عكسيًا، كما في الشكل (٧-٣/ج)، وهذا الفرق في الجهد يبذل شغلاً سالبًا؛ أي يسحب طاقة حركية من الإلكترونات، ويعيق وصول بعض الإلكترونات المنبعثة إلى المصعد؛ ما يسبب تناقص عدد الإلكترونات التي تمتلك قدرًا كافيًا من الطاقة الحركية يمكنها من التغلب على قوة التنافر مع المصعد السالب؛ لذا لاحظ لينارد أن التيار الكهروضوئي يتناقص تدريجيًا مع الاستمرار في زيادة فرق الجهد العكسي، انظر الشكل (٧-٤) بين النقطتين (أ، و)، وهذا يدل على أن الإلكترونات تنبعث مملوكة طاقات حركية مختلفة؛ إذ كلما زادت الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة احتاجت إلى فرق جهد عكسي أكبر لإيقافها؛ لذا ينعدم التيار الكهروضوئي عندما يكون فرق الجهد العكسي كافيًا لإيقاف الإلكترونات الضوئية التي تمتلك أكبر طاقة حركية (ط عظمى)، ويسمى فرق الجهد الكهربائي العكسي اللازم لجعل التيار الكهروضوئي صفرًا، (أو فرق الجهد الكهربائي العكسي اللازم لإيقاف أسرع الإلكترونات الضوئية) **جهد القطع (Cutoff Potential)**، ويرمز له بالرمز (ج) وتمثله النقطة (و) في الشكل (٧-٤)، ويرتبط جهد القطع مع الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$ط \text{ عظمى} = e \cdot \text{ج} \quad \dots\dots\dots (٧-٢)$$



يبين الشكل (٥-٧) تمثيلًا بيانيًا للعلاقة بين فرق الجهد

(جـ) في خلية كهروضوئية والتيار الكهروضوئي (ت).

مستعينًا بالبيانات المثبتة في الشكل، أجب عما يأتي:

١ ما قيمة تيار الإشباع؟

٢ ما قيمة أقل فرق جهد بين طرفي الخلية الكهروضوئية

عندما يصل التيار إلى قيمته العظمى؟

٣ ما قيمة جهد القطع؟

٤ احسب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بوحدة إلكترون فولت.

٥ احسب السرعة العظمى للإلكترونات الضوئية.

الحل:

١ نرسم امتدادًا نحو اليسار من النقطة التي أصبح عندها المنحنى أفقيًا، فنجد أنه يتقاطع مع محور التيار

الكهروضوئي عند القيمة ٤.٠ ميكرو أمبير، أي أن تيار الإشباع = ٤.٠ ميكرو أمبير.

٢ ننزل عمودًا على محور فرق الجهد من النقطة التي أصبح عندها التيار مشبعًا، حتى يتقاطع العمود

مع المحور عند النقطة ٣ فولت، أي أن جـ = ٣ فولت.

٣ جهد القطع هو الجهد الذي ينعدم عنده التيار الكهروضوئي، ويمثل نقطة تقاطع المنحنى مع محور

فرق الجهد (ت = صفر) ومن الرسم البياني جـ = -٢ فولت.

٤ ط ح عظمى = $h\nu - \phi$ جـ

$$= 1.6 \times 10^{-19} \times 3.2 - 2 \times 10^{-19} = 1.2 \times 10^{-19} \text{ جول}$$

= ٢ إلكترون فولت.

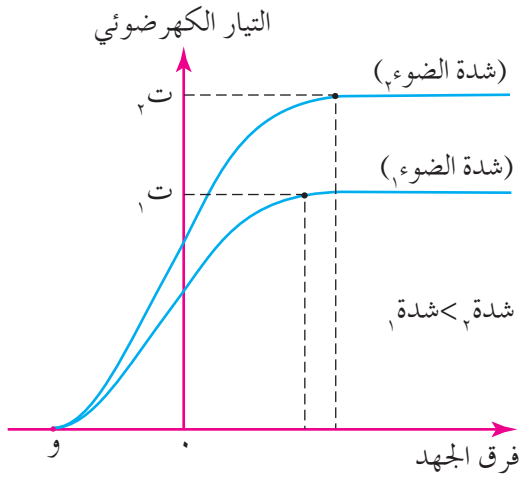
يلاحظ أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بوحدة إلكترون فولت تساوي عددًا القيمة

المطلقة لجهد القطع بوحدة فولت.

٥ ط ح عظمى = $\frac{1}{2} m_e v_{\text{عظمى}}^2$

$$1.2 \times 10^{-19} = \frac{1}{2} \times 9.11 \times 10^{-31} \times v_{\text{عظمى}}^2$$

$$v_{\text{عظمى}} = 5.1 \times 10^5 \text{ م/ث} \leftarrow v_{\text{عظمى}} = 8.4 \times 10^5 \text{ م/ث}$$

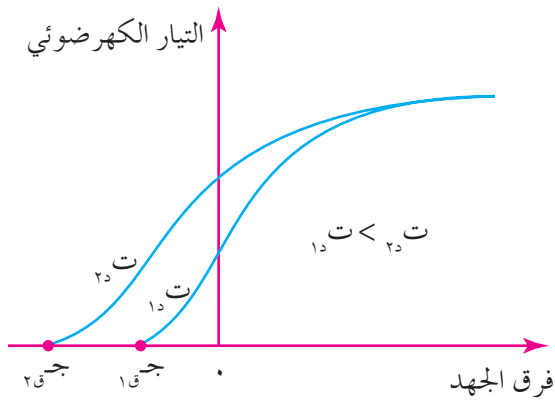


الشكل (٦-٧): أثر شدة الضوء عند تردد معين في الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية.

عند تكرار تجربة لينارد بعد زيادة شدة الضوء الساقط على المهبط عن طريق إضافة مصباح آخر (مع ثبات تردد الضوء الساقط)، وتمثيل العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهرضوئي بيانيًا، تم الحصول على منحنى آخر كما في الشكل (٦-٧). بينت النتائج التجريبية أن جهد القطع الذي تمثله النقطة (و) في الشكل لم يتغير، وهذا يعني أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لم تتغير وفق العلاقة (٢-٧)، ونستنتج من ذلك أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لا تعتمد على شدة الضوء الساقط.

ويُظهر المنحنيان في الشكل (٦-٧) أن التيار الكهرضوئي الناتج من شدة الضوء الثاني أكبر من التيار الكهرضوئي الناتج من شدة الضوء الأول، بما في ذلك تيار الإشباع عند ثبات فرق الجهد بين المهبط والمصعد؛ وهذا يعني زيادة العدد الكلي للإلكترونات الضوئية الواصلة إلى المصعد. ونستنتج من ذلك أن التيار الكهرضوئي يزداد بزيادة شدة الضوء الساقط عند ثبات فرق الجهد بين المهبط والمصعد.

أما عند زيادة تردد الضوء الساقط مع ثبات شدته في تجربة لينارد، وتمثيل العلاقة بين فرق الجهد والتيار الكهرضوئي بيانيًا كما في الشكل (٧-٧)، بينت النتائج التجريبية أن جهد القطع تزداد قيمته المطلقة بزيادة تردد الضوء الساقط، وهذا يعني زيادة الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات



الشكل (٧-٧): أثر تردد الضوء عند شدة معينة في الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية.

الضوئية وفق العلاقة (٢-٧)، ونستنتج من ذلك أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية تزداد بزيادة تردد الضوء الساقط، في حين أن تيار الإشباع لم يتغير؛ ما يدل على أن العدد الكلي للإلكترونات المنبعثة لا يعتمد على تردد الضوء الساقط.

ومن الملاحظات المهمة الأخرى في الظاهرة الكهرضوئية أن الإلكترونات تنبعث فور سقوط

الضوء على المهبط. وأن الإلكترونات لا تنبعث من المهبط إذا كان تردد الضوء الساقط أقل من قيمة معينة مهما بلغت شدته، وأقل تردد للضوء يلزم لتحرير إلكترونات من سطح فلز يسمى **تردد العتبة (Threshold Frequency)**، ويرمز له بالرمز (ν_0) ، ولكل فلز تردد عتبة، أي أنه خاصية مميزة للفلز. فمثلاً تردد العتبة للصدوديوم يساوي $(5,5 \times 10^{14})$ هيرتز، فإذا كان تردد الضوء الساقط على الصدوديوم أقل من هذه القيمة فإنه لن يتمكن من تحرير أي إلكترونات من سطح الصدوديوم.

■ (٧-٢-٢) تفسير الظاهرة الكهروضوئية

لفهم الظاهرة الكهروضوئية لجأ العلماء إلى تفسير النتائج التي رُصدت من الظاهرة الكهروضوئية. أولاً: تفسير الفيزياء الكلاسيكية

تفترض الفيزياء الكلاسيكية أن الضوء موجات كهرومغناطيسية تحمل طاقة، وأن هذه الطاقة تزداد بزيادة شدة الضوء، ولا تعتمد على تردد الضوء.

وفي ما يأتي مقارنة بين تنبؤات الفيزياء الكلاسيكية وفق النموذج الموجي للضوء الذي كان سائداً آنذاك والنتائج التجريبية للظاهرة الكهروضوئية:

١ وفقاً للفيزياء الكلاسيكية فإن الإلكترونات تمتص الطاقة من الموجات الكهرومغناطيسية على نحو مستمر. فمن المتوقع أن زيادة شدة الضوء الساقط تعني زيادة معدل امتصاص الإلكترونات للطاقة؛ ما يكسبها طاقة حركية أكبر، ولا علاقة بين تردد الضوء الساقط والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المتحررة. وهذا ما نقضته نتائج التجربة؛ إذ تبين أن الطاقة الحركية العظمى تعتمد على تردد الضوء الساقط ولا تعتمد على شدته.

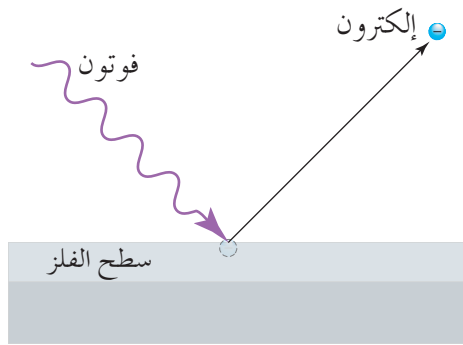
٢ وفقاً للفيزياء الكلاسيكية من المتوقع أن يحتاج الإلكترون إلى بعض الوقت لامتناس الطاقة الكافية وتجميعها ليتحرر من الفلز، خاصة عند سقوط ضوء خافت (شدته قليلة). إلا أن التجربة أثبتت أن الإلكترونات تنبعث فور سقوط الضوء على الفلز.

٣ وفقاً للفيزياء الكلاسيكية؛ فمن المتوقع عند سقوط ضوء ذي شدة عالية على فلز أن تتحرر منه إلكترونات، بغض النظر عن تردد الضوء الساقط عليه. وهذا لا يتفق مع التجربة؛ إذ تبين أنه لا تتحرر إلكترونات من الفلز إذا كان تردد الضوء الساقط أقل من تردد العتبة لهذا الفلز مهما بلغت شدة الضوء.

وبذا نلاحظ أن النتائج التجريبية للظاهرة الكهروضوئية تتعارض مع تنبؤات الفيزياء الكلاسيكية وفق النموذج الموجي للضوء، لذلك عجزت الفيزياء الكلاسيكية عن تفسير هذه النتائج.

ثانيًا: تفسير فيزياء الكم

في عام (١٩٠٥) م قدّم أينشتين (Einstein) تفسيرًا للظاهرة الكهروضوئية، مؤكدًا مفهوم كمية الطاقة الذي افترضه بلانك؛ إذ وسّع هذا المفهوم ليشمل الموجات الكهرومغناطيسية جميعها. فافترض أينشتين أن طاقة الضوء تتركز في حزم (bundles) منفصلة، أي كمّات، سميت في ما بعد



فوتونات (photons)، كل فوتون يحمل طاقة مقدارها (هـ ت). وعند سقوط الضوء على سطح فلز، فإن الفوتون الواحد يعطي طاقته كاملة إلى إلكترون واحد فقط، فيتحرر من ارتباطه بذرات الفلز بجزء من هذه الطاقة، وينطلق بما تبقى على صورة طاقة حركية عظمى، انظر الشكل (٧-٨)، أي أن:

الشكل (٧-٨): آلية انبعاث الإلكترون من سطح الفلز.

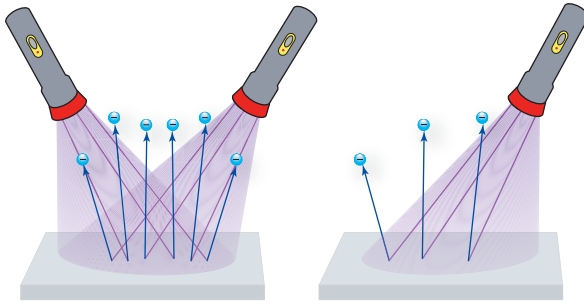
$$\text{هـ ت} = \Phi + \text{ط ح عظمى} \quad (٧-٣)$$

حيث (هـ ت): طاقة الفوتون الواحد، و (Φ) : أقل طاقة يمتلكها فوتون الضوء تلزم لتحرير إلكترون من سطح الفلز من غير إكسابه طاقة حركية، ويطلق عليها اسم اقتران الشغل للفلز (Work Function). والفوتون الذي تكون طاقته مساوية اقتران الشغل للفلز يحلّر إلكترونًا من السطح ولا يكسبه طاقة حركية، فيكون تردده مساويًا تردد العتبة، أي أن:

$$\Phi = \text{هـ ت} \quad (٧-٤)$$

وتسمى العلاقة (٧-٣) معادلة أينشتين الكهروضوئية، إذ عن طريقها فسر أينشتين النتائج التجريبية للظاهرة الكهروضوئية وفق الآتي:

١) زيادة شدة الضوء الساقط على سطح فلز، مع بقاء تردده ثابتًا، تعني أن عدد الفوتونات الساقطة في الثانية على وحدة المساحة يزداد، وحيث إن كل إلكترون يتحرر يمتص فوتونًا واحدًا فقط، فإن عدد الإلكترونات الضوئية المتحررة في الثانية يزداد كما في الشكل (٧-٩)



فيزداد تبعًا لذلك التيار الكهروضوئي ويزداد تيار الإشباع. إلا أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لا تتغير؛ ويدل على ذلك عدم تغير جهد القطع (ج_٢) في العلاقة (٧-٢) بسبب ثبات تردد الضوء الساقط (ت_٢).

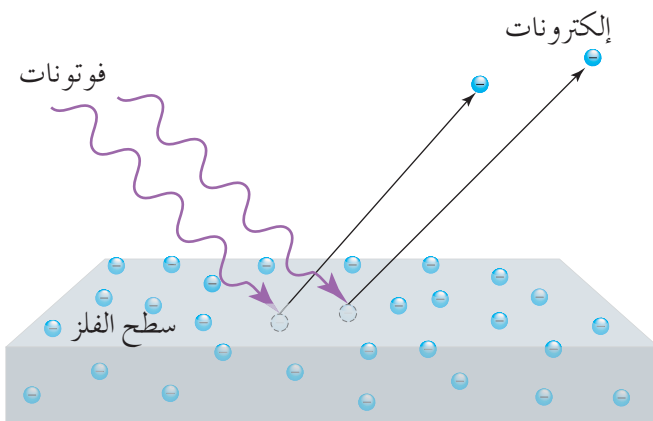
الشكل (٧-٩): علاقة عدد الإلكترونات الضوئية بشدة الضوء.

أما زيادة تردد الضوء الساقط على سطح الفلز مع بقاء شدته ثابتة فإنها تعني أن طاقة الفوتون الواحد تزداد (ط_٢ فوتون = ه_٢ ت_٢)، أي أن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية تزداد، فيزداد جهد القطع، إلا أن العدد الكلي للإلكترونات المتحررة لا يتغير؛ لأن عدد الفوتونات لم يتغير؛ فلا يتغير تيار الإشباع.

٢) فسر أينشتين الانبعاث الفوري للإلكترونات الضوئية بأنه إذا كانت طاقة الفوتون أكبر من اقتران الشغل للفلز (ط_٢ < Φ) فإن الإلكترون يتحرر وينبعث ممتلكًا طاقة حركية فور سقوط الفوتون.

٣) وفق معادلة أينشتين فإن أقل طاقة يمتلكها فوتون تلزم لتحرير إلكترون من سطح فلز، يجب أن تساوي اقتران الشغل للفلز؛ لذا وفقًا للعلاقة (٧-٤)، لن تتحرر إلكترونات من سطح الفلز إذا كان تردد الضوء الساقط أقل من تردد العتبة للفلز.

وفسر أينشتين انبعاث الإلكترونات الضوئية بسرعات مختلفة من سطح الفلز، مستندًا إلى أن سطح الفلز ينتهي على عمق عدة مئات من الذرات، انظر الشكل (٧-١٠)، وعند سقوط الضوء



الشكل (٧-١٠): اختلاف الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية تبعًا للعمق الذي تنبعث منه.

على سطح الفلز فإن بعض الفوتونات يصطدم بذرات السطح الخارجية، وبعضها الآخر يصل إلى الذرات الأعمق داخل السطح، وعليه فإن الإلكترونات المتحررة من ذرات السطح الخارجية جميعها تتحرر ممتلكة الطاقة الحركية نفسها (ط_٢ عظمى) وفق العلاقة (٧-٣)، أما الإلكترونات

الأخرى التي تتحرر من داخل السطح فإنها تصطدم بالذرات التي تقع في طريق خروجها فاقدة جزءاً من طاقتها الحركية، لذا تتفاوت الإلكترونات الضوئية في سرعة انبعائها من سطح الفلز، والسرعة التي تُحدَّد تجريبياً هي فقط السرعة العظمى (عظمى)، عن طريق قياس جهد القطع، كما تقدّم في تجربة لينارد.

مثال (٧-٣)

الجدول (٧-١): اقتران الشغل لبعض العناصر.

العنصر	Φ (إلكترون فولت)
صوديوم	٢,٢٨
ألنيوم	٤,٢٨
نحاس	٤,٦٥
خارصين	٤,٣١
فضة	٤,٣
رصاص	٤,٢٥
حديد	٤,٥٠
كربون	٥,٠٠
كاليسيوم	٢,٨٧

يبين الجدول (٧-١) قيم اقتران الشغل لبعض العناصر بوحدة إلكترون فولت، مستعيناً بالجدول، احسب تردد العتبة للحديد، ثم احسب طول موجة العتبة.

الحل:

بما أن اقتران الشغل للحديد يساوي (٤,٥) إلكترون فولت،

يجب تحويل وحدة الإلكترون فولت إلى وحدة جول:

$$\Phi = 4,5 \times 1,6 \times 10^{-19} = 7,2 \times 10^{-19} \text{ جول}$$

ومن العلاقة (٧-٤):

$$t_{\text{هـ}} = \frac{\Phi}{h}$$

$$= \frac{7,2 \times 10^{-19}}{6,63 \times 10^{-34}} = 1,1 \times 10^{15} \text{ هيرتز}$$

ولحساب الطول الموجي (λ) لضوء تردده ($t_{\text{هـ}}$) نطبق العلاقة: $t_{\text{هـ}} = \frac{c}{\lambda}$

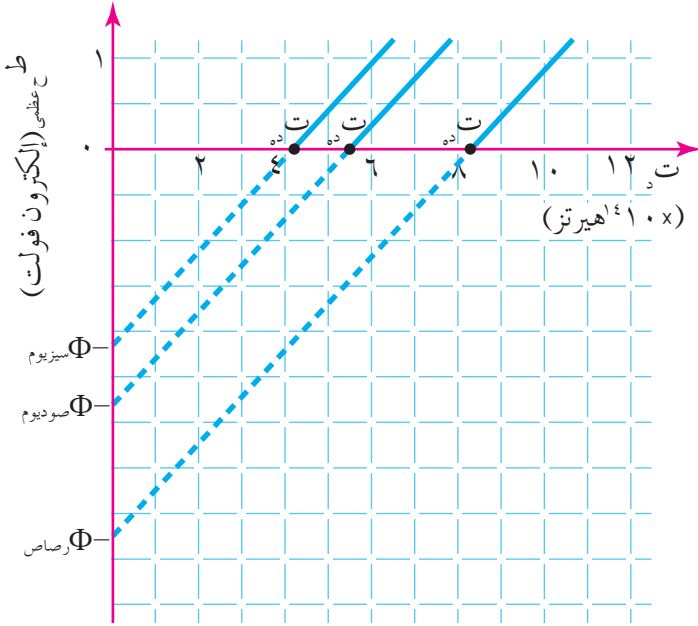
حيث (س): سرعة الضوء في الفراغ أو الهواء وتساوي 3×10^8 م/ث.

وعليه فإن:

$$\text{طول موجة العتبة } (\lambda) = \frac{c}{t_{\text{هـ}}}.$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1,1 \times 10^{15}} = 273 \times 10^{-9} \text{ م} = 273 \text{ نـم}$$

لم يتوقف أينشتين عند تفسير العلاقة بين تردد الضوء الساقط والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات، بل تعداه إلى التنبؤ بنوع العلاقة بينهما، فتبعًا للعلاقة (٧-٣) نلاحظ أن العلاقة



الشكل (٧-١١): العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لثلاثة فلزات مختلفة.

خطية. وقد أجرى ميليكان تجربة للتحقق من فرض أينشتين واستطاع إثبات صحته مستخدمًا فلزات مختلفة، فحصل على المنحنيات الموضحة في الشكل (٧-١١)، وكان الفضل لميليكان في قياس ثابت بلانك تجريبيًا.

نلاحظ أن الخطوط المستقيمة المرسومة متوازية، وهذا يعني أن ميلها متساوٍ، وهذا الميل مساوٍ ثابت بلانك (هـ)، ومن معادلة أينشتين يمكن التوصل إلى أن نقطة تقاطع

أي من هذه الخطوط مع المحور السيني تمثل تردد العتبة للفِلز (ت٠)، وأن نقطة تقاطع الخط نفسه مع محور الصادات تمثل اقتران الشغل للفِلز (Φ)، إذا كتبت على الصورة الآتية:

$$\text{ط عظمى} = \text{هـ} \cdot \text{ت} - \Phi$$

وهي على صورة العلاقة الرياضية الخطية ص = أ + ب، حيث (أ): الميل، و(ب): المقطع الصادي.

مثال (٧-٤)

سقط ضوء فوق بنفسجي طول موجته (٢٤٠) نـم على مهبط خلية كهروضوئية، فانطلقت منه إلكترونات باتجاه المصعد مكونة تيارًا كهروضوئيًا عبر دائرة مغلقة، وعندما أصبح فرق الجهد العكسي (٤,١) فولت انقطع التيار في الدارة. احسب ما يأتي:

١ طاقة فوتون الضوء الساقط .

٢ الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية.

٣ اقتران الشغل لفِلز المهبط.

الحل:

$$1 \text{ ط فوتون} = \text{هـ ت}_\gamma = \frac{\text{هـ س}}{\lambda}$$

$$= \frac{1.0 \times 10^{-19} \times 6.63 \times 10^{-34}}{1.0 \times 10^{-9} \times 240} = 8.29 \times 10^{-19} \text{ جول}$$

$$2 \text{ ط ح عظمى} = \text{هـ س} = e \text{ جـ ق}$$

$$= 1.6 \times 10^{-19} \times 1.4 =$$

$$= 2.24 \times 10^{-19} \text{ جول}$$

$$3 \text{ } \Phi = \text{هـ ت}_\gamma - \text{ط ح عظمى}$$

$$\Phi = 8.29 \times 10^{-19} - 2.24 \times 10^{-19} = 6.05 \times 10^{-19} \text{ جول}$$

مثال (٧-٥)

سقط ضوء على سطح صوديوم، فتحررت منه إلكترونات طاقتها الحركية العظمى (٠,٨٢) إلكترون فولت. أجب عما يأتي:

١ احسب تردد الضوء الساقط.

٢ إذا سقط ضوء طول موجته (٦٠٠) نـ م على سطح الفلز نفسه فهل تتحرر منه إلكترونات؟ وضح إجابتك.

الحل:

$$1 \text{ من الجدول (٧-١): } \Phi_{\text{الصوديوم}} = 2.28 \text{ إلكترون فولت}$$

ومن معادلة أينشتاين الكهرضوئية:

$$\text{هـ ت}_\gamma = \Phi + \text{ط ح عظمى}$$

$$\text{هـ ت}_\gamma = 2.28 + 0.82 = 3.1 \text{ إلكترون فولت}$$

$$= 3.1 \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$\text{هـ ت}_\gamma = 4.96 \times 10^{-19} \text{ جول}$$

$$ت_3 = \frac{19-10 \times 4,96}{34-10 \times 6,63}$$

$$= 1410 \times 7,48 \text{ هيرتز}$$

٢ نحسب أولاً تردد العتبة للصوديوم، ونقارنه بتردد الضوء الساقط، كما يأتي:

$$ت_0 = \frac{\Phi}{h}$$

$$= \frac{19-10 \times 1,6 \times 2,28}{34-10 \times 6,63} \quad (\text{لاحظ أننا حولنا اقتران الشغل إلى وحدة الجول})$$

$$= 1410 \times 5,5 \text{ هيرتز}$$

أما تردد الضوء الساقط فهو:

$$ت_3 = \frac{3 \times 10^8}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{600}$$

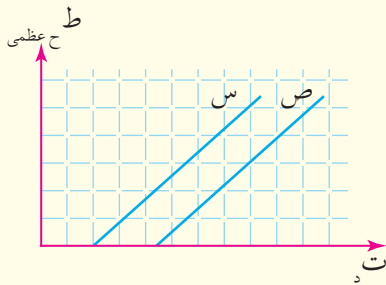
$$= 5 \times 10^{14} \text{ هيرتز}$$

بما أن $ت_3 > ت_0$ ، فإنه في هذه الحالة لن تتحرر أي إلكترونات من سطح فلز الصوديوم.

مراجعة (٧-٢)

١ سقطت حزمتان من الضوء بترددين مختلفين ($ت_3$ ، $ت_٢$) على سطحين فلزيين مختلفين (س، ص) على الترتيب، بحيث $\Phi_s < \Phi_v$ ، فإذا كانت الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة منهما متساوية، فأَي الحزمتين ترددها أكبر؟ وضح إجابتك.

٢ سقط ضوء تردده (١٠١٠) هيرتز على سطحين فلزيين مختلفين (أ، ب)، فتحررت إلكترونات ضوئية من السطح (أ) من غير طاقة حركية بينما لم تتحرر من السطح (ب) أي إلكترونات. ناقش هذه النتائج مستنداً إلى معادلة أينشتاين الكهروضوئية، ثم بين كيف تتغير النتيجة المتعلقة بالسطح (أ) إذا سقط عليه ضوء طول موجته أقصر.



الشكل (١٢-٧): سؤال (٣).

٣ يوضح الشكل (١٢-٧) العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط على فلزين مختلفين (س، ص) والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة. أجب عما يأتي:

أ) أي الفلزين (س، ص) طول موجة العتبة له أكبر؟ فسر إجابتك.

ب) إذا سقط ضوء له التردد نفسه على الفلزين، وانبعثت إلكترونات من كل منهما، فأَي الفلزين تنبعث منه إلكترونات مملوكة طاقة حركية أكبر؟ فسر إجابتك.

ج) فسر: يتساوى ميل المنحنيين الممثلين للفلزين.

٤ استخدمت الخلية الكهروضوئية في إجراء تجربة لقياس اقتران الشغل لفلز الكالسيوم، بإسقاط ضوء على سطح الفلز بأطوال موجية مختلفة، ثم تحديد فرق الجهد اللازم لقطع تيار الخلية في كل مرة يتم فيها تغيير الطول الموجي (لون الضوء الساقط)، فتم الحصول على البيانات الآتية:

٤٠٤,٧	٣٦٥,٠	٣١٣,٢	٢٥٣,٦	λ (نم)
٠,١٤	٠,٥٠	٠,٩٨	١,٩٥	ج (فولت)

معتمدًا على البيانات الواردة في الجدول أجب عما يأتي:

أ) ارسم العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط (على محور السينات) وجهد القطع (على محور الصادات).

ب) من الرسم البياني جد كلاً من: ثابت بلانك، وتردد العتبة، واقتزان الشغل لفلز الكالسيوم.

ج) قارن بين قيمة اقتران الشغل التي حصلت عليها وقيمة اقتران الشغل لفلز الكالسيوم من الجدول (١-٧).

افترض أينشتين أن الضوء سيل من الجسيمات النقطية (الفوتونات) وتأكيدها لتصوراته هذه؛ أدخل بعد عام من تفسيره للظاهرة الكهروضوئية مفهومًا على الفوتونات يرتبط بالأجسام المادية، وهو الزخم الخطي. إذ افترض أن الفوتون الواحد الذي طاقته (هـ ت_٠) يحمل زخمًا خطيًا (خ) باتجاه حركته يعطى مقداره بالعلاقة الآتية:

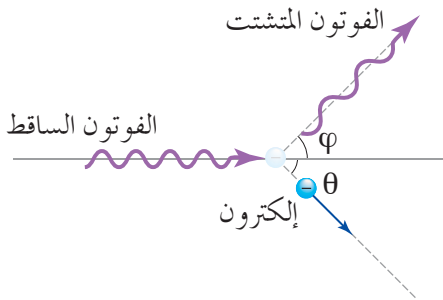
$$خ = \frac{هـ}{\lambda} \dots\dots\dots (٧-٥)$$

وقد أثبت التجارب التي أجراها كومبتون (Compton) في ما بعد أن الضوء يسلك سلوك الجسيمات المادية كما افترض أينشتين. وتعد ظاهرة كومبتون من الظواهر التي لم تنجح قوانين الفيزياء الكلاسيكية في تفسيرها.

في عام (١٩٢٣) م لاحظ كومبتون أن سقوط أشعة سينية ذات تردد عالٍ على هدف من الغرافيت (الكربون) يؤدي إلى انطلاق إلكترونات تمتلك طاقة حركية، وظهور أشعة سينية مشتتة ذات طاقة أقل، وطول موجي أكبر من الطول الموجي للأشعة السينية الساقطة على الهدف.

وقد فسر كومبتون ذلك، بأن الأشعة السينية تتكون من فوتونات، كل منها يحمل طاقة وزخمًا خطيًا، ولغايات دراسة تفاعل الفوتون مع إلكترون ذرة كربون، تعامل كومبتون مع الإلكترون كما لو كان حرًا ساكنًا، لأن طاقة فوتون الأشعة السينية عالية جدًا إذا ما قورنت باقتران الشغل

للكربون. وعندما يصطدم الفوتون بالإلكترون يحدث بينهما تصادم تام المرونة، كالذي يحدث بين الجسيمات، حيث يبقى مقدار طاقة النظام (فوتون - إلكترون) وزخمه محفوظين في هذا التصادم. وينتج من ذلك فوتون جديد يتشتت باتجاه يصنع زاوية (φ) مع اتجاه سير الفوتون الساقط، بينما ينطلق الإلكترون بزاوية (θ)، كما



الشكل (٧-١٣): ظاهرة كومبتون.

في الشكل (٧-١٣).

وبما أن الطول الموجي للفوتون المتشتت أكبر منه للفوتون الساقط، فإن طاقته تكون أقل. وحيث إن الطاقة محفوظة في أثناء التصادم، فإن الطاقة الحركية التي اكتسبها الإلكترون بعد التصادم تساوي فرق طاقة الفوتونين الساقط والمتشتت، أي أن:

$$(ط\ ح) \text{ إلكترون} = ه\ ت\ د - ه\ ت\ د \dots\dots\dots (٧-٦)$$

حيث (ط ح): الطاقة الحركية للإلكترون بعد التصادم، و(ه ت د): طاقة الفوتون الساقط، و(ه ت د): طاقة الفوتون المتشتت.

وانطلاق الإلكترون ممتلكاً طاقة حركية بعد التصادم يدل على أنه قد اكتسب زخمًا خطيًا باتجاه حركته؛ وقد برهن كومتون من قانون حفظ الزخم وعن طريق القياسات التجريبية أن الزخم الخطي للنظام محفوظ في هذا التصادم؛ ما يؤكد فرض أينشتين بأن الفوتون يحمل زخمًا.

مثال (٧-٦)

في الشكل (٧-١٣)، وعلى فرض أن الإلكترون ساكن قبل التصادم، إذا كان طول موجة الفوتون الساقط (٠,٢٤) nm، والطاقة الحركية للإلكترون بعد التصادم (٢٦) eV، فاحسب ما يأتي:

١ الزخم الخطي للفوتون الساقط.

٢ طاقة الفوتون الساقط بوحدة إلكترون فولت.

٣ طول موجة الفوتون المتشتت.

الحل:

١ بتطبيق العلاقة (٧-٥):

$$خ = \frac{ه}{\lambda}$$

$$خ = \frac{١٠^{-٣٤} \times ٦,٦٣}{٩ \times ١٠^{-٢٤}} \leftarrow خ = ٢,٧٦ \times ١٠^{-٢٤} \text{ كغ.م/ث.}$$

$$٢ ط = \text{الفوتون الساقط} = \text{هـ ت د}$$

$$= \frac{\text{هـ}}{\lambda} \text{ س}$$

$$= \text{خ س}$$

$$= ١٠ \times ٢,٧٦ - ١٠ \times ٣ \times ١٠^{-٢٤}$$

$$= ٨٢,٨٨ \times ١٠^{-١٧} \text{ جول} \Leftarrow \text{ط} = \text{الفوتون الساقط} = ٥١٨٠ \text{ إلكترون فولت.}$$

٣ نحسب أولاً طاقة الفوتون المتشتت:

$$(\text{ط ح}) \text{ إلكترون} = \text{ط} - \text{الفوتون الساقط} - \text{الفوتون المتشتت}$$

$$٢٦ = ٥١٨٠ - \text{ط} - \text{الفوتون المتشتت} \Leftarrow \text{ط} = \text{الفوتون المتشتت} = ٥١٥٤ \text{ إلكترون فولت.}$$

ومن العلاقة (ط فوتون = هـ ت د = $\frac{\text{هـ س}}{\lambda}$) نحسب طول موجة الفوتون المتشتت:

$$\text{ط} = \text{الفوتون المتشتت} = \frac{\text{هـ س}}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{\text{هـ س}}{\text{ط} = \text{الفوتون المتشتت}}$$

$$\lambda = \frac{١٠ \times ٣ \times ١٠^{-٢٤} - ١٠ \times ٦,٦٣}{١٩ - ١٠ \times ١,٦ \times ٥١٥٤} \quad (\text{لاحظ أننا حولنا طاقة الفوتون المتشتت إلى وحدة الجول})$$

$$\lambda = ١٠ \times ٢٤١ - ١٠^{-١٢} \text{ م} = ٠,٢٤١ \text{ نـم}$$

مراجعة (٧-٣)

١ صف ظاهرة كومبتون.

٢ كيف فسر كومبتون ظهور الأشعة السينية المتشتتة عندما يحدث تصادم فوتون مع إلكترون

حر ساكن؟

٣ قارن بين الفوتون الساقط والفوتون المتشتت في ظاهرة كومبتون من حيث: الطاقة، الزخم

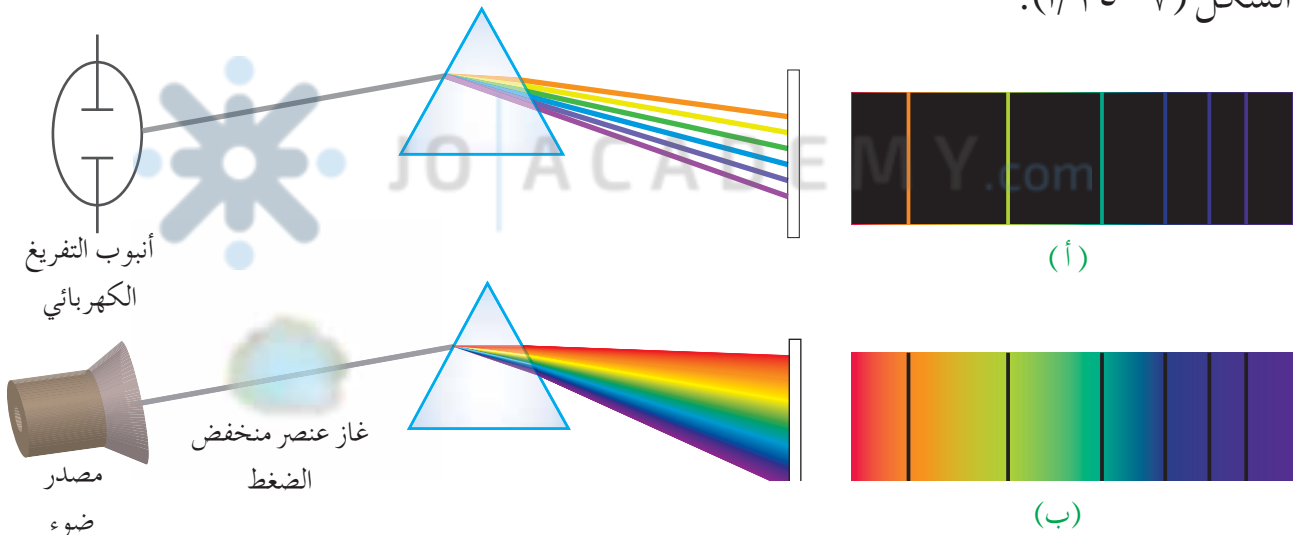
الخطي، التردد، الطول الموجي، السرعة.

تبعث الأجسام الساخنة المتوهجة إشعاعاً حرارياً مثل توهج فتيل مصباح التنغستن، فإذا حللنا هذا الإشعاع بواسطة منشور فإننا نحصل على طيف متصل (Continuous Spectrum) يضم الأطوال الموجية التي يقع بعضها في منطقة الطيف المرئي، انظر الشكل (٧-١٤)، ويقع بعضها الآخر خارج منطقة الطيف المرئي، وقد تعرفت سابقاً الطيف الكهرمغناطيسي كاملاً، المرئي وغير المرئي.



الشكل (٧-١٤): الطيف المتصل.

ويوجد نوع آخر من الإشعاع ينبعث من غاز عنصر منخفض الضغط في أنابيب التفريغ الكهربائي؛ فإذا حللنا هذا الإشعاع، فإننا نحصل على طيف يسمى طيف الانبعاث الخطي (Emission Line Spectrum)، يظهر على هيئة خطوط ملونة منفصلة على خلفية سوداء، كما في الشكل (٧-١٥/أ).



الشكل (٧-١٥): الطيف الخطي.

ويمكن الحصول على طيف خطي بعد مرور إشعاع متصل مثل الإشعاع الصادر عن الشمس عبر غاز عنصر منخفض الضغط ثم تحليله، لنحصل على طيف يظهر على هيئة خطوط سوداء تتخلل الطيف المتصل للضوء، في المناطق التي تقابل خطوط طيف الانبعاث للغاز نفسه، ويسمى هذا الطيف عندئذ طيف الامتصاص الخطي (Absorption Line Spectrum)، انظر الشكل (٧-١٥/ب). وهذا يعني أن الطيف الخطي (الانبعاث أو الامتصاص) يظهر عند أطوال موجية محددة تختلف باختلاف العنصر، إذ يعدّ الطيف الخطي صفة مميزة لغاز العنصر، فلا يوجد غازان لهما الطيف الخطي نفسه.

ولم يستطع العلماء باستخدام قوانين الفيزياء الكلاسيكية تفسير الأطياف الخطية للغازات، وفي العام (١٩١٣)م اقترح العالم الدنماركي بور (Bohr) نموذجاً للذرة عالج فيه الطيف الذري للهيدروجين، ولا بد لنا من تعرف طيف ذرة الهيدروجين، قبل دراستنا هذا النموذج.

■ (٧-٤-١) طيف ذرة الهيدروجين (Spectrum of Hydrogen Atom)

إن أبسط الأطياف الذرية دراسة وتحليلاً هو طيف ذرة الهيدروجين؛ ذلك أن ذرة الهيدروجين هي أبسط الذرات؛ لاحتوائها على بروتون واحد وإلكترون واحد، ويظهر طيف ذرة الهيدروجين على هيئة تجمعات عدة من الخطوط الطيفية التي يمكن حساب أطوالها الموجية باستخدام متسلسلات حسابية أشهرها خمس سميت بأسماء مكتشفها، وهي:

■ متسلسلة ليمان (Lyman)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الضوء فوق البنفسجي:

$$R_H = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 2, 3, 4, \dots \text{ (٧-٧)}$$

■ متسلسلة بالمر (Balmer)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الضوء المرئي:

$$R_H = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 3, 4, 5, \dots \text{ (٧-٨)}$$

■ متسلسلة باشن (Paschen)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الأشعة تحت الحمراء:

$$R_H = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 4, 5, 6, \dots \text{ (٧-٩)}$$

■ متسلسلة براكيت (Brackett)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الأشعة تحت الحمراء:

$$R_H = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 5, 6, 7, \dots \text{ (٧-١٠)}$$

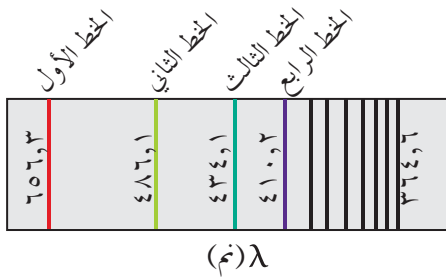
■ متسلسلة فوند (Pfund)، وتقع خطوطها الطيفية في منطقة الأشعة تحت الحمراء:

$$R_H = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 6, 7, 8, \dots \text{ (٧-١١)}$$

حيث (λ): طول موجة الخط الطيفي، و(R_H): ثابت فيزيائي يطلق عليه اسم ثابت ريديرغ، ويساوي (1.097×10^7) م^{-١}، و(n): عدد صحيح موجب.

يوضح الشكل (٧-١٦) مجموعة الخطوط الطيفية لذرة الهيدروجين التي تقع أطوالها الموجية في منطقة الطيف المرئي، وكان أول من لاحظ النمطية في الأطوال الموجية لهذه الخطوط هو معلم

الرياضيات السويسري بالمر في عام (١٨٨٥)م. عند تعويض (ن = ٣) في متسلسلة بالمر نحصل



الشكل (٧-١٦): متسلسلة بالمر لخطوط طيف ذرة الهيدروجين.

على طول موجة الخط الأول فيها، وعند تعويض (ن = ٤) نحصل على طول موجة الخط الثاني، وهكذا، ويظهر في الشكل أن الأطوال الموجية لهذه الخطوط تقل بالانتقال من الخط الطيفي الأول إلى الثاني إلى الثالث،...، فأكبرها طولاً موجياً هو الخط الأول، وأقصرها الخط الأخير (ن = ∞).

مثال (٧-٧)

احسب طول موجة الخط الطيفي الثالث في متسلسلة بالمر.

الحل:

نحصل على طول موجة الخط الطيفي الثالث بتعويض (ن = ٥) في العلاقة:

$$\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{2^2}\right) R_H = \frac{1}{\lambda}$$

$$0.10 \times 0.23037 = \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{2^2}\right) \times 0.10 \times 1.097 = \frac{1}{\lambda}$$

$$\lambda = 4341 \text{ Å} \times 10^{-10} \text{ م} = 4341 \text{ نم، وهو مطابق للرقم الموجود في الشكل (٧-١٦).}$$

مثال (٧-٨)

احسب أقصر طول موجي في متسلسلة براكتر.

الحل:

نحصل على أقصر طول موجي في أي من المتسلسلات عندما نعوض (ن = ∞) وباستخدام العلاقة:

$$\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{4^2}\right) R_H = \frac{1}{\lambda}$$

$$0.10 \times 6.86 = \left(\frac{1}{\infty^2} - \frac{1}{4^2}\right) \times 0.10 \times 1.097 =$$

$$\lambda = 4059 \text{ Å} \times 10^{-10} \text{ م} = 4059 \text{ نم}$$

■ (٧-٤-٢) نموذج بور لذرة الهيدروجين (Bohr's Model of the Hydrogen Atom)

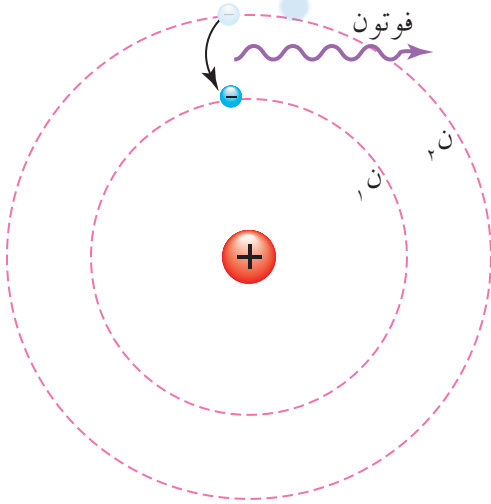
مهد بور الطريق لتفسير الأطياف الذرية، بوضعه نموذجًا لذرة الهيدروجين؛ لفهم طبيعة الذرة، وقد عدّ أينشتاين هذا النموذج من أعظم الإنجازات العلمية في ذلك الوقت.

استفاد بور في بناء نموذج له ذرة الهيدروجين من نموذج رذرفورد الذري، واستفاد من مفهوم الزخم الزاوي، فمن المعروف أن للجسم المتحرك في خط مستقيم زخمًا خطيًا، أما إذا تحرك الجسم حركة دائرية فيكون له زخم آخر يسمى زخمًا زاويًا يعطى بالعلاقة (زخم زاوي = ك ع نق)، واستفاد بور من مفاهيم بلانك وأينشتاين في كمية الطاقة أيضًا؛ وبهذا ربط بور بين فيزياء الكم والفيزياء الكلاسيكية، ووضع نموذجًا لذرة الهيدروجين، يركز على أربعة فروض أساسية هي:

١ يتحرك الإلكترون حول النواة في مدار دائري بتأثير قوة التجاذب الكهربائية بين الإلكترون السالب، والنواة الموجبة.

٢ يوجد الإلكترون في مدارات محددة، كل مدار له مقدار محدد من الطاقة يختلف عن غيره من المدارات، وتسمى هذه المدارات "مستويات الطاقة"، ولا يمكن للذرة أن تشع أو تمتص طاقة طالما بقي الإلكترون في مستوى طاقة معين (في مدار محدد).

٣ ينبعث الإشعاع من الذرة عندما ينتقل الإلكترون من مستوى طاقة عالٍ إلى مستوى طاقة منخفض، وتكون الطاقة الإشعاعية المنبعثة مكّمة على شكل فوتون طاقته تساوي فرق الطاقة بين المستويين اللذين انتقل بينهما، انظر الشكل (٧-١٧)، ولا ينتقل الإلكترون من مستوى طاقة منخفض إلى مستوى طاقة عالٍ إلا إذا امتص فوتونًا طاقته تساوي فرق الطاقة بين المستويين. ويمكن حساب طاقة الفوتون المنبعث أو الممتص من العلاقة الرياضية الآتية:



الشكل (٧-١٧): انبعاث فوتون من ذرة الهيدروجين نتيجة انتقال إلكترونها من مستوى طاقة عالٍ إلى آخر منخفض.

$$ط_{\text{الفوتون}} = ه ت د = |ط - ط_0| \dots\dots\dots (٧-١٢)$$

حيث (ط₀): طاقة المستوى الابتدائي الموجود فيه الإلكترون، و(ط): طاقة المستوى النهائي الذي ينتقل إليه الإلكترون، و(ه ت د): طاقة الفوتون المنبعث أو الممتص.

٤ المدارات المسموح للإلكترون أن يوجد فيها هي التي يكون زخمه الزاوي فيها من مضاعفات المقدار $(\frac{h}{\pi^2})$ أي أن:

$$خ \text{ زاوي} = n \frac{h}{\pi^2}$$

$$ك ع نق = n \frac{h}{\pi^2} \dots\dots\dots (٧-١٣)$$

حيث (ك): كتلة الإلكترون، و(ع): سرعة الإلكترون، و(نق): نصف قطر المدار الذي يوجد فيه الإلكترون، و(ن): رقم المدار (ن=١، ٢، ٣، ...)، أي أن زخم الإلكترون الزاوي له كمات محددة. وبناءً على هذه الفروض تمكن بور من تحديد أنصاف أقطار مدارات ذرة الهيدروجين وطاقتها.

أولاً: حساب أنصاف أقطار المدارات المسموح للإلكترون الوجود فيها يشير الفرض الأول لبور إلى أن الإلكترون يدور حول النواة في مدار دائري، كما في الشكل (٧-١٨)، لذا فهو يخضع لقوة مركزية (ق_م) هي قوة التجاذب الكهربائية (ق_ك) المؤثرة في الإلكترون من النواة.

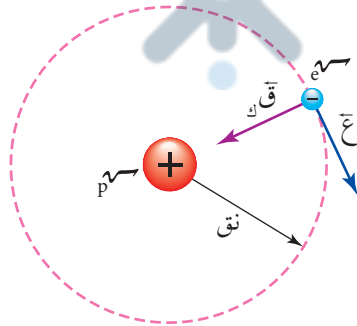
وفق القانون الثاني لنيوتن فإن:

$$ق_m = \frac{ك ع^2}{نق}$$

$$\frac{ق_m}{ق_k} = \frac{ك ع^2}{نق} = 1 \text{ ووفق قانون كولوم فإن: } ق_k = \frac{أ س_e س_p}{نق^2}$$

وبما أن شحنة البروتون تساوي شحنة الإلكترون فإن:

$$\frac{ك ع^2}{نق} = \frac{أ س_e س_p}{نق^2} \dots\dots\dots (٧-١٤)$$



الشكل (٧-١٨): مدار الإلكترون حول نواة الهيدروجين وفقاً لنموذج بور.

ومن الفرض الرابع لبور نجد أن: $\frac{n}{\pi^2 k^2} = e$

وبتعويض (ع) في العلاقة (٧-١٤) نتوصل إلى أن:

$$k = \left(\frac{n^2 h^2}{\pi^2 k^2 n^2} \right) = \frac{A_s^2}{n^2}$$

$$\text{وبإعادة ترتيب الكميات نتوصل إلى أن: } n = \left(\frac{h^2}{\pi^2 k A_s^2} \right)^{1/2}$$

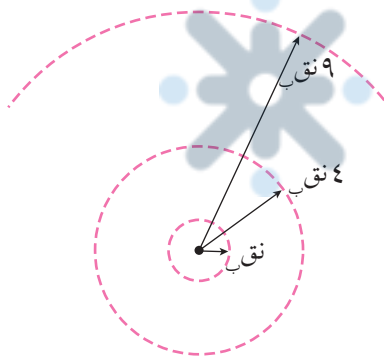
لاحظ أن الكميات بين القوسين جميعها مقادير ثابتة، وتعويض قيمها تصبح العلاقة السابقة على

$$\text{الصورة: } n = (5.29 \times 10^{-11})^{1/2}$$

فيكون نصف قطر المدار الأول للإلكترون عندما (ن = ١): $n = 5.29 \times 10^{-11} \text{ م}$.

ويسمى نصف قطر بور (نق)، وعليه يمكن حساب نصف قطر المدار ذو الرقم (ن) وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{نق}_n = \text{نق}_1 \times n^2 \quad \text{..... (٧-١٥)}$$



ويوضح الشكل (٧-١٩) أنصاف أقطار المدارات

الثلاثة الأولى لذرة الهيدروجين.

الشكل (٧-١٩): المدارات الثلاثة الأولى المسموح للإلكترون الوجود فيها.

مثال (٧-٩)

احسب نصف قطر المدار الثالث في ذرة الهيدروجين.

الحل:

للمدار الثالث (ن = ٣):

$$\text{نق}_3 = \text{نق}_1 \times n^2$$

$$\text{نق}_3 = 5.29 \times 10^{-11} \times 3^2 = 4.76 \times 10^{-10} \text{ م}$$

ثانيًا: حساب طاقة المستويات المسموح بها في ذرة الهيدروجين

يملك نظام (إلكترون - بروتون) في ذرة الهيدروجين طاقة وضع كهربائية، كما مر معك في فصل الجهد الكهربائي (راجع المثال (٢-٥))، تعطى بالعلاقة الآتية:

$$ط_ر = - \frac{e^2 \hbar^2}{2m_0 a_0^2}$$

ويملك الإلكترون نتيجة دورانه حول النواة من الفرض الأول لبور طاقة حركية يحسب مقدارها من العلاقة:

$$ط_ح = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

$$ط_م = ط_ح + ط_ر$$

$$= \frac{1}{2} m_0 v^2 - \frac{e^2 \hbar^2}{2m_0 a_0^2}$$

وبالرجوع إلى العلاقة (٧-١٤) يمكن كتابة الطاقة الحركية على الصورة:

$$ط_ح = \frac{1}{2} m_0 v^2 = \frac{1}{2} \frac{e^2 \hbar^2}{m_0 a_0^2}$$

وبتعويض هذه العلاقة في معادلة الطاقة الميكانيكية الكلية نجد أن:

$$ط_م = \frac{1}{2} \frac{e^2 \hbar^2}{m_0 a_0^2} - \frac{e^2 \hbar^2}{2m_0 a_0^2}$$

$$= - \frac{1}{2} \frac{e^2 \hbar^2}{m_0 a_0^2}$$

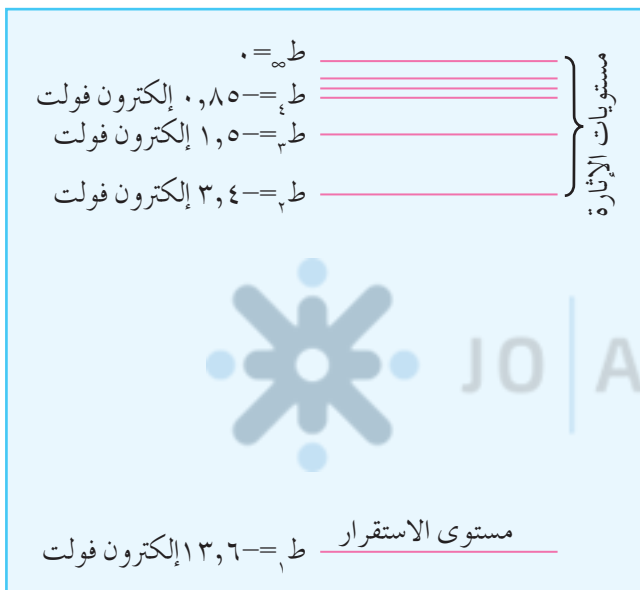
وبتعويض (نق) من العلاقة (٧-١٥) نجد أن:

$$ط_م = - \frac{1}{2} \frac{e^2 \hbar^2}{m_0 a_0^2}$$

وبتعويض قيم الثوابت (أ، س، هـ، نق) وقسمة الناتج على (١,٦ × ١٠^{-١٩})، نحسب الطاقة الميكانيكية الكلية لأي مستوى في ذرة الهيدروجين بوحدة الإلكترون فولت، وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$ط_n = - \frac{13,6}{n^2} \text{ (٧-١٦)}$$

حيث (ن): رقم مستوى الطاقة (المدار) الذي يمكن أن يوجد فيه الإلكترون، والإشارة السالبة تعني أنه يجب تزويد الإلكترون بكمية من الطاقة تساوي طاقة المدار الذي يوجد فيه ليتحرر من الذرة من غير إكسابه طاقة حركية، وطاقة التحرر هذه تسمى طاقة التأين. فعندما (ن = ١) يكون الإلكترون في مستوى الطاقة الأول (ط_١ = -١٣,٦ إلكترون فولت)، وهو أدنى مستوى طاقة لذرة الهيدروجين، ويسمى مستوى الاستقرار. وتسمى مستويات الطاقة التي تعلو مستوى الاستقرار مستويات الإثارة، وهي المستويات التي ينتقل إليها الإلكترون إذا امتص مقداراً محدداً من الطاقة. ويبين الشكل (٧-٢٠) رسماً تخطيطياً لمستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين، وتكون الذرة غير مستقرة إذا كانت في حالة إثارة، ولكي تصل إلى حالة الاستقرار على الإلكترون أن يعود



من مستوى الإثارة إلى مستوى الاستقرار. وقد تكون عودة الإلكترون مرة واحدة أو على مراحل، وفي كل مرة ينتقل الإلكترون من مستوى طاقة إلى مستوى طاقة أدنى منه يبعث فوتوناً طاقته تساوي فرق الطاقة بين هذين المستويين، وتظهر الفوتونات المنبعثة من الانتقالات المختلفة بعد تحليلها بالمطياف على هيئة خطوط تقع ضمن طيف الانبعاث الخطي لذرة الهيدروجين.

الشكل (٧-٢٠): رسم تخطيطي لمستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين.

مثال (٧-١٠)

مستعيناً بالشكل (٧-٢٠)، أجب عما يأتي:

- ١ ما أقل طاقة تلزم لتحرير إلكترون ذرة الهيدروجين عندما يكون في مستوى الاستقرار؟
- ٢ احسب طاقة الفوتون اللازمة لنقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الاستقرار إلى المستوى الرابع.

الحل:

- ١ بما أن الإلكترون يوجد في مستوى الطاقة الأول (مستوى الاستقرار)، فإنه يلزم تزويده

بكمية من الطاقة تساوي طاقة التأين ليتحرر من ذرة الهيدروجين، لذا يلزمه طاقة مقدارها ١٣,٦ إلكترون فولت ليتحرر من الذرة.

$$٢. ن = ١ ، ن = ٤$$

يحسب فرق الطاقة بين مستويي الطاقة الأول والرابع من العلاقة:

$$ط_{\text{الفوتون}} = |ط - ط_٤|$$

ومن الشكل نجد أن:

$$ط_{\text{الفوتون}} = |١٣,٦ - ٠,٨٥| = ١٢,٧٥ \text{ إلكترون فولت.}$$

مثال (٧-١١)

إلكترون ذرة هيدروجين في المستوى الأول، امتص فوتوناً فانتقل إلى مستوى الطاقة الثالث. مستعيناً بالشكل (٧-٢٠)، احسب ما يأتي:

١. طاقة الفوتون الممتص.

٢. إذا عاد الإلكترون إلى المستوى الأول، فاحسب قيم الطاقة للفوتونات التي يمكن أن تنبعث من الذرة.

الحل:

$$١. ن = ١ ، ن = ٣$$

نحسب طاقة الفوتون الممتص من العلاقة:

$$ط_{\text{الفوتون}} = ه ت_٣ = |ط_٣ - ط_١|$$

$$= |١٣,٦ - ١,٥| = ١٢,١ \text{ إلكترون فولت.}$$

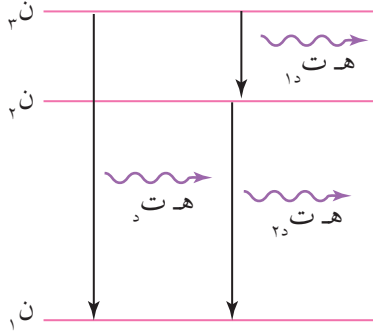
٢. يمكن للإلكترون أن يعود من المستوى الثالث إلى المستوى الأول مباشرة باعثاً فوتوناً طاقته تساوي طاقة الفوتون الممتص، أي (١٢,١) إلكترون فولت، أو أن يعود على مرحلتين: من المستوى الثالث إلى المستوى الثاني باعثاً فوتوناً طاقته (ه ت_٢)، ثم من المستوى الثاني إلى المستوى الأول باعثاً فوتوناً آخر طاقته (ه ت_١)، حيث:

$$هت_١د = |ط_٢ - ط_٣|$$

$$= |١,٥ - (٣,٤ -)| = ١,٩ \text{ إلكترون فولت.}$$

$$هت_٢د = |ط_١ - ط_٢|$$

$$= |٣,٤ - (١٣,٦ -)| = ١٠,٢ \text{ إلكترون فولت.}$$



الشكل (٧-٢١): مثال (٧-١١).

لاحظ أن مجموع طاقتي الفوتونين المنبعثين من عودة الإلكترون إلى المستوى الأول على مرحلتين يساوي طاقة الفوتون المنبعث من عودة الإلكترون مباشرة من المستوى الثالث إلى المستوى الأول. انظر الشكل (٧-٢١).

ثالثاً: نموذج بور ومتسلسلات طيف ذرة الهيدروجين

تعلمت مما سبق أن تحدد أنصاف أقطار المدارات المسموح للإلكترون ذرة الهيدروجين الوجود فيها من العلاقة (٧-١٥)، وأن تحسب طاقة المدارات في ذرة الهيدروجين عند وجود الإلكترون في أي من تلك المدارات من العلاقة (٧-١٦)، وقد اشتقت هاتان العلاقتان من قوانين الفيزياء الكلاسيكية بناء على الفروض النظرية لبور، لذا فالقيم التي نحصل عليها منهما هي قيم نظرية. وحتى يكون نموذج بور مقبولاً، يجب أن يتنبأ بالقيم التجريبية للأطوال الموجية للخطوط الطيفية في متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين الواردة سابقاً.

من الفرض الثالث لبور نجد أن طاقة الفوتون الممتص أو المنبعث تعطى بالعلاقة:

$$ط_{\text{فوتون}} = هت_د = |ط_ه - ط_و|$$

وبتعويض الطاقة من العلاقة (٧-١٦) بعد تحويلها إلى وحدة الجول، وتعويض (ت = $\frac{س}{\lambda}$)، نجد أن:

$$\frac{س_ه}{\lambda} = ١٣,٦ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩} \left| \frac{١}{ن_و} - \frac{١}{ن_ه} \right|$$

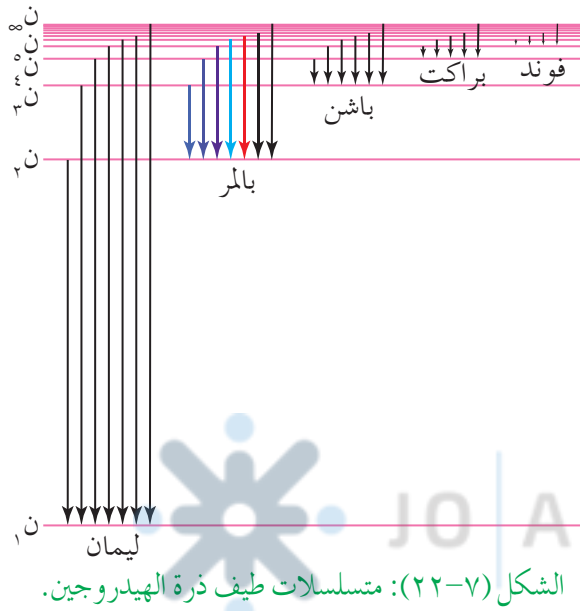
وبتعويض قيم (ه، س) وقسمة الطرفين عليهما، نجد أن:

$$\frac{١}{\lambda} = ١,٠٩٧ \times ١٠^{-٧} \left| \frac{١}{ن_و} - \frac{١}{ن_ه} \right|$$

لاحظ أن $(1,097 \times 10^7) \text{ م}^{-1}$ يساوي ثابت ريديرغ (R_H) ، وهي القيمة التجريبية التي تم التوصل إليها من متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين، لذا يمكن حساب الأطوال الموجية للخطوط الطيفية لطيف ذرة الهيدروجين من العلاقة الآتية :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad (٧-١٧)$$

وبتعويض $n = 1, 2, \dots, 5$ في العلاقة السابقة، نحصل على متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين، ابتداء



من متسلسلة ليمن عندما $(n = 1)$ وانتهاء بمتسلسلة فوند عندما $(n = 5)$ ، والموضحة في الشكل (٧-٢٢). وهذا يعني أن الفروض النظرية لبور قد اتفقت مع النتائج التجريبية لطيف ذرة الهيدروجين، فالمتسلسلات جميعها التي رُصدت لذرة الهيدروجين يمكن التوصل إليها من العلاقة (٧-١٧)، علاوة على التوصل إلى ثابت ريديرغ؛ ما أعطى نموذج بور قوة وقبولاً في الوسط العلمي.

مثال (٧-١٢)

انتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة الثاني إلى مستوى الطاقة الأول. احسب:

- ١ طاقة الفوتون المنبعث.
- ٢ تردد الفوتون المنبعث.
- ٣ طول موجة الفوتون المنبعث.

الحل:

$$n = 2, n' = 1$$

١ نحسب أولاً طاقة المستوى الأول وطاقة المستوى الثاني في ذرة الهيدروجين بتطبيق العلاقة:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}$$

$$E_1 = -\frac{13,6}{1^2} = -13,6 \text{ إلكترون فولت.}$$

$$ط_٢ = \frac{١٣,٦-}{٢٢} = ٣,٤- \text{ إلكترون فولت.}$$

ولحساب طاقة الفوتون المنبعث نطبق العلاقة:

$$ط_{\text{الفوتون}} = |ط_١ - ط_٢|$$

$$= |١٣,٦- - (٣,٤-)| = ١٠,٢ \text{ إلكترون فولت.}$$

٢ لحساب التردد نحتاج إلى طاقة الفوتون بوحدة الجول كما يأتي:

$$ط_{\text{الفوتون}} = ١٠,٢ \times ١,٦ \times ١٠^{-١٩} = ١,٦٣ \times ١٠^{-١٨} \text{ جول.}$$

$$ط_{\text{الفوتون}} = ه ت$$

$$١,٦٣ \times ١٠^{-١٨} = ٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤} \times ت \Leftrightarrow ت = ٢,٤٦ \times ١٠^{-١٥} \text{ هيرتز.}$$

$$\left| \frac{١}{ن_٢} - \frac{١}{ن_١} \right| R_H = \frac{١}{\lambda} \quad ٣$$

$$= \frac{١}{٢٢} - \frac{١}{٢١} \times ١٠^{-٧} \times ١,٠٩٧ = \frac{٣}{٤} \times ١٠^{-٧} \times ١,٠٩٧$$

$$= ٨,٢٣ \times ١٠^{-٦}$$

$$\lambda = ١,٢٢ \times ١٠^{-٧} \text{ م} = ١٢٢ \text{ نـم}$$

$$\lambda = ١,٢٢ \times ١٠^{-٧} \text{ م} = ١٢٢ \text{ نـم} \Leftrightarrow \frac{٣ \times ١٠^{-٨}}{٢,٤٦ \times ١٠^{-١٥}} = \frac{س}{ت} = \lambda \text{ أو}$$

مراجعة (٧-٤)

١ هل يمكن لذرة الهيدروجين أن تبعث فوتوناً طاقته (١٥) إلكترون فولت؟ فسر إجابتك.

٢ أي المدارات الممكنة لذرة الهيدروجين تكون فيه سرعة الإلكترون أكبر ما يمكن؟ وضح إجابتك.

٣ لماذا يتفق نموذج بور مع مبدأ بلانك في تكمية الطاقة؟

٤ إلى أي متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين ينتمي الخط الطيفي ذو الطول الموجي الأقصر؟

٥ ما الفرق بين طاقة التأين وطاقة الإثارة؟

تبين من تفسير أينشتين للظاهرة الكهروضوئية أن الضوء يسلك سلوك الجسيمات المادية (فوتونات)، وأثبت كومتون بالتجربة أن للفوتون زخمًا خطيًا كما الجسيمات المادية. واستند بور في بناء نموذج الذري، إلى أن الضوء يسلك سلوك الجسيمات لتفسير الأطياف الذرية.

لكن في المقابل، توجد ظواهر لا يمكن معالجتها بافتراض الطبيعة الجسيمية للضوء؛ فظاهرتا التداخل والحيود مثلاً، تحدثان للموجات فقط، وهما من الخصائص المعروفة للضوء، والفوتون له خواص موجية مثل التردد والطول الموجي، بالإضافة إلى خواص جسيمية. هذا التباين في سلوك الضوء جعل العلماء يفترضون أن للضوء طبيعة مزدوجة (موجية - جسيمية) (Wave-Particle Duality of Light)، وكتاهما ملازمان للضوء، إلا أن الضوء يسلك في حالات معينة سلوك الجسيمات، وفي حالات أخرى سلوك الموجات.

في عام (١٩٢٣)م قدم لويس دي بروي (Louis de Broglie) في أطروحته للدكتوراه فرضية نصها "بما أن للفوتونات خواص موجية وجسيمية، فمن المحتمل أن يكون لأشكال المادة جميعها خواص موجية كما لها خواص جسيمية". وتشير هذه الفرضية إلى أن الأجسام جميعها يصاحبها موجات في أثناء حركتها، تسمى موجات المادة أو موجات دي بروي، وهي ليست موجات كهرومغناطيسية كموجات الضوء مثلاً، ولا موجات ميكانيكية كموجات الصوت، إنما لها خواص ترتبط بخواص الجسم الذي تلازمه في الحركة وهذا يعني وفق فرضية دي بروي أن الأجسام المادية لها طبيعة مزدوجة (جسيمية - موجية) (Particle-Wave Duality of Matter). ووفقاً للعلاقة التي حددها أينشتين للزخم الخطي للفوتون ($\frac{h}{\lambda} = p$)، افترض دي بروي أن طول الموجة المصاحبة لحركة الجسم تتناسب عكسياً مع زخمه الخطي، أي أن: ($\lambda = \frac{h}{p}$)، وبما أن زخم الجسم الخطي ($p = mv$)، فإن:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (١٨-٧)$$

حيث (λ): طول الموجة المصاحبة لحركة الجسم (أو طول موجة دي بروي)، و(m): كتلة الجسم، و(v): سرعة الجسم.

احسب طول موجة دي بروي المصاحبة لكل مما يأتي:

١ رصاصة كتلتها (١٠) غ تتحرك بسرعة (٤٠٠) م/ث.

٢ إلكترون طاقته الحركية (٢) إلكترون فولت، علماً بأن كتلته (٩,١١ × ١٠^{-٣١}) كغ.

الحل:

١ نحسب طول موجة دي بروي من العلاقة:

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

$$3.4 \times 10^{-34} \times 1.66 = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 400}{10 \times 9.11 \times 10^{-31}}$$

٢ نحسب سرعة الإلكترون أولاً من العلاقة: ط_ح = $\frac{1}{2} mv^2$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times \text{ط}_ح}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 9.11 \times 10^{-31}}{2 \times 1.6 \times 10^{-19}}} = 8.4 \times 10^6 \text{ م/ث}$$

(لاحظ أننا حولنا الطاقة الحركية للإلكترون إلى وحدة الجول)

$$v = 8.4 \times 10^6 \text{ م/ث}$$

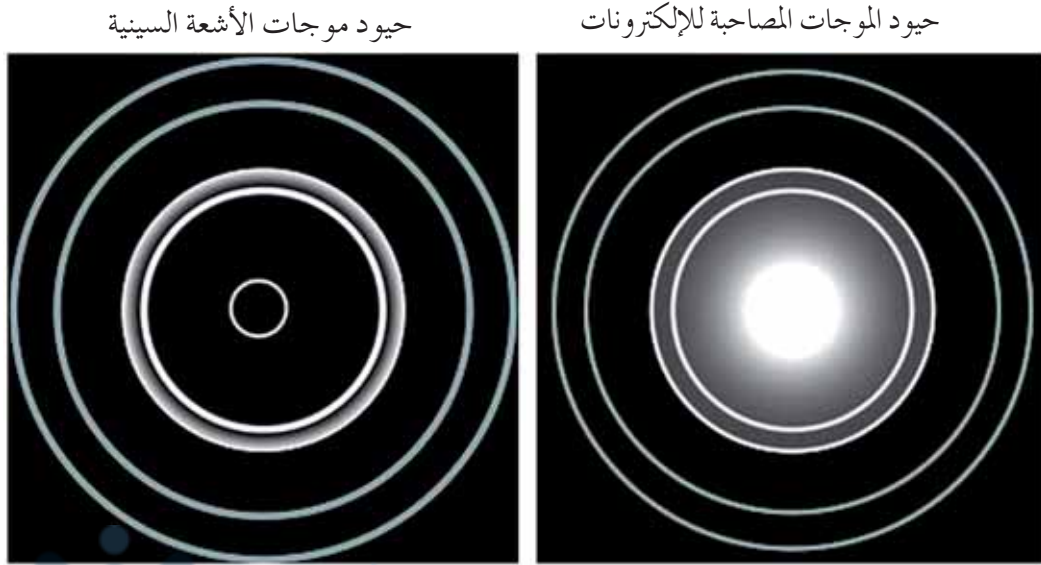
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{10 \times 8.4 \times 10^6 \times 9.11 \times 10^{-31}}$$

$$= 8.7 \times 10^{-10} \text{ م} = 0.87 \text{ ن.م.}$$

لاحظ أن الطول الموجي المصاحب للرصاصة صغير جداً وأصغر بكثير من أبعاد الرصاصة، لذا لا تظهر موجات المادة في حالة الأجسام الكبيرة (الجاهرية) (macroscopic)، ولم يتمكن العلماء من قياس الطول الموجي لها حتى الآن، في حين أن الطول الموجي المصاحب للإلكترون من رتبة الأطوال الموجية للموجات الكهرمغناطيسية، وأمكن قياسه عملياً. وتظهر هذه الموجات في حالة الدقائق الصغيرة (microscopic)، من إلكترونات، وبروتونات، ونيوترونات، ... وغيرها.

بعد ثلاث سنوات فقط من فرضية دي بروي أثبت دافسون (Davisson) وجيرمر (Germer)

بتجربتهما الشهيرة صحة فرضية دي بروي، حيث أثبتا أن للإلكترونات طبيعة موجية، وذلك عندما أسقطا حزمة من الإلكترونات على بلورة من النيكل، فلاحظا تشكّل نمط من الحيود يشبه حيود الأشعة السينية. ويظهر الشكل (٧-٢٣) حيود كل من الموجات المصاحبة للإلكترونات وموجات الأشعة السينية ذات الطول الموجي نفسه عند سقوطها على رقيقة من الألمنيوم.



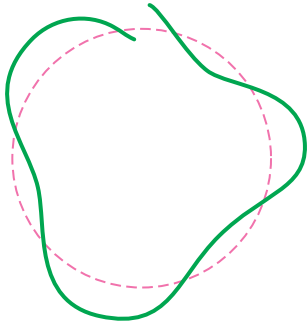
الشكل (٧-٢٣): حيود الموجات المصاحبة للإلكترونات مقارنة بحيود موجات الأشعة السينية.

وعند حساب الطول الموجي للموجات المصاحبة للإلكترونات تجريبياً تبين أنه يتفق مع فرضية دي بروي العلاقة (٧-١٨)، ما يؤكد الطبيعة الموجية للأجسام المادية، ثم توالت التجارب التي أجريت في ما بعد بإسقاط حزم من جسيمات أخرى مثل: بروتونات، ونيوترونات، على بلورات من مواد مختلفة، فتم الحصول على أنماط للحيود، تؤكد الطبيعة الموجية للمادة.

اقترح دي بروي تطبيق فرضيته على ذرة الهيدروجين وقدم فكرة لتفسير وجود الإلكترون على أبعاد محددة من النواة، وذلك بأن الإلكترون في أثناء دورانه حول النواة في مدار ما يصاحبه موجات مادية، ويجب أن يكون طول محيط المدار $(2\pi \text{ نق})$ مساوياً أعداداً صحيحة من الطول الموجي المصاحب له، أي أن: طول محيط المدار $= n\lambda$

$$2\pi \text{ نق} = n\lambda \dots\dots\dots (٧-١٩)$$

وعلّل ذلك بأنه ضروري لحدوث تداخل بناء بين الموجات المصاحبة للإلكترون، وحيث إن



الشكل (٧-٢٤): تداخل هدام.

الطول الموجي المصاحب للإلكترون يتناسب عكسيًا مع سرعته وفق العلاقة (٧-١٨) فإنه يجب أن تكون سرعة الإلكترون محددة، وإلا حدث تداخل هدام لهذه الموجات بحيث تلغي الموجات المصاحبة للإلكترون بعضها بعضًا، ويتلاشى المدار تبعًا لذلك، كما يظهر في الشكل (٧-٢٤).

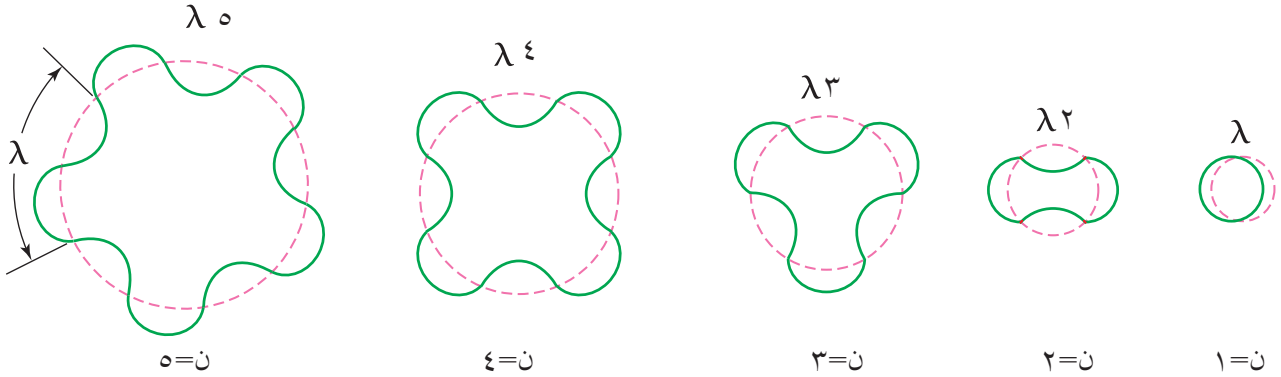
وبتعويض $(\lambda = \frac{h}{m_e v})$ في العلاقة (٧-١٩)، نجد أن:

$$2\pi n r = n \lambda$$

وبإعادة ترتيب الكميات نتوصل إلى أن:

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

وتمثل هذه العلاقة الفرض الرابع لبور الذي حدد فيه الزخم الزاوي للإلكترون، أي أنه يوجد توافق بين فرض بور وموجات الإلكترون لدي بروي، ويوضح الشكل (٧-٢٥) العلاقة بين عدد موجات الإلكترون لدي بروي والمدارات المسموح للإلكترون الوجود فيها في ذرة الهيدروجين.



الشكل (٧-٢٥): العلاقة بين عدد موجات دي بروي والمدارات المسموح للإلكترون الوجود فيها في ذرة الهيدروجين.

مثال (٧-١٤)

إلكترون في المدار الأول لذرة الهيدروجين، احسب:

١ طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون.

٢ سرعة الإلكترون في هذا المدار.

الحل:

$$١ \text{ ن} = ١, \text{ نق} = \text{نق} = ٥,٢٩ \times ١٠^{-١١} \text{ م}$$

يمكن حساب طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون من العلاقة:

$$\lambda = \text{نق} \times \pi$$

$$\lambda = ٥,٢٩ \times ١٠^{-١١} \times ٣,١٤ \times ٢ = ٣٣,٢ \times ١٠^{-١١} \text{ م}$$

٢ ولحساب سرعة الإلكترون نستخدم العلاقة:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$٣٣,٢ \times ١٠^{-١١} = \frac{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}{٩,١١ \times ١٠^{-٣١} \cdot v} \Rightarrow v = \frac{٦,٦٣ \times ١٠^{-٣٤}}{٣٣,٢ \times ١٠^{-١١} \cdot ٩,١١ \times ١٠^{-٣١}} = ٢,٢ \times ١٠^{-٦} \text{ م/ث.}$$

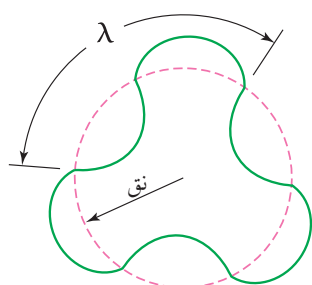
مثال (٧-١٥)

يمثل الشكل (٧-٢٦) موجة مصاحبة للإلكترون ذرة الهيدروجين في أحد المدارات. فإذا كان طولها الموجي (٩,٩٧ × ١٠^{-١٠}) م، ومستعينًا بالشكل أجب عما يأتي:

١ ما رقم المدار الموجود فيه الإلكترون؟

٢ احسب نصف قطر هذا المدار.

الحل:



الشكل (٧-٢٦): مثال (٧-١٥).

١ يظهر من الشكل أن عدد الموجات المصاحبة للإلكترون

ثلاث موجات، أي أن (٣ = ن).

٢ نجد نصف قطر المدار من العلاقة:

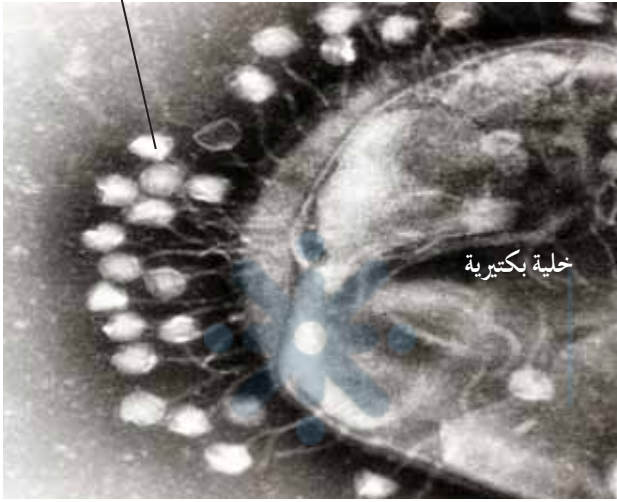
$$\text{نق} = \text{نق} \times \pi$$

$$\text{نق} = \frac{٩,٩٧ \times ١٠^{-١٠} \times ٣,١٤}{٢} = ١,٥٦ \times ١٠^{-١٠} \text{ م}$$

$$\text{نق} = ٤,٧٦ \times ١٠^{-١٠} \text{ م}$$

يعد المجهر الإلكتروني (The Electron Microscope) أحد التطبيقات العملية على الطبيعة الموجية للمادة، حيث يقوم مبدأ عمله على الموجات المصاحبة للإلكترونات تُسرّع عبر فرق جهد كهربائي، وتُسلّط على العينة المراد رؤية تفاصيلها. وتزداد قدرة المجهر بوجه عام على تمييز تفاصيل جسم ما بنقصان الطول الموجي للموجات المصاحبة للإلكترونات المستخدمة في المجهر، إذ يمكن رؤية تفاصيل الجسم التي تزيد أبعادها على الطول الموجي المستخدم، وحيث إن الطول الموجي المصاحب للإلكترونات يتناسب عكسيًا مع سرعتها ($\lambda = \frac{h}{mv}$)، فإنه يمكن زيادة سرعة الإلكترونات باستخدام مصدر فرق جهد كهربائي، ومن ثم الحصول على أطوال موجية قصيرة جدًا تناسب تفاصيل الجسم.

فيروس آكل البكتيريا



ويصل تكبير المجهر الإلكتروني الذي يسرّع الإلكترونات عبر فرق جهد (١٠٠) كيلو فولت إلى أكثر من مليون مرة، بقدرة على تمييز التفاصيل التي تزيد أبعادها على (٠,٢) ن.م. ويظهر الشكل (٧-٢٧) صورة من المجهر الإلكتروني تظهر فيها خلية بكتيرية تهاجمها مجموعة فيروسات آكلة بكتيريا، والصورة مكبرة (٢٥٠٠٠٠) مرة.

الشكل (٧-٢٧): فيروسات آكلة البكتيريا تهاجم خلية بكتيرية كما تظهر من خلال مجهر إلكتروني مكبرة (٢٥٠٠٠٠) مرة.

مراجعة (٧-٥)

١. وضح المقصود بالطبيعة المزدوجة للضوء؟ ما الذي دعا العلماء إلى افتراض هذه الطبيعة؟
٢. لماذا لا تظهر الطبيعة الموجية للمادة في حالة الأجسام الكبيرة (الجاهرية)؟
٣. كيف فسّر دي بروي وجود الإلكترونات على أبعاد محددة من نواة ذرة الهيدروجين؟
٤. ما مبدأ عمل المجهر الإلكتروني؟ وعلام تعتمد قدرته على التمييز؟

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ تزداد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المنبعثة في الخلية الكهروضوئية بزيادة:

أ شدة الضوء الساقط

ب تردد الضوء الساقط

ج اقتران الشغل للفلز

د تردد العتبة للفلز

٢ عند اصطدام فوتون بإلكترون حر ساكن في ظاهرة كومبتون، فإن الفوتون المشتت يماثل الفوتون الساقط في مقدار:

أ سرعته

ب تردده

ج زخمه الخطي

د طوله الموجي

٣ يعتمد مبدأ عمل المجهر الإلكتروني على:

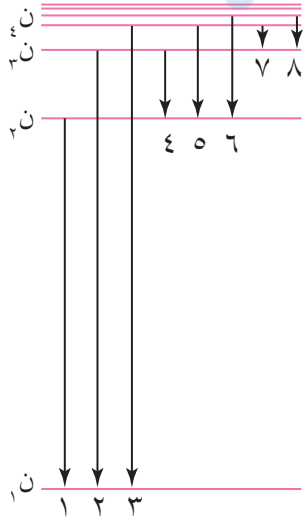
أ التأثير الكهروضوئي

ب تأثير كومبتون

ج الطبيعة الموجية للمادة

د الطبيعة الجسيمية للإشعاع

بين الشكل (٧-٢٨) بعضاً من خطوط طيف ذرة الهيدروجين. مستعيناً بالشكل أجب عن الفقرات (٤، ٥، ٦) الآتية.



٤ إلى أي المتسلسلات الطيفية الآتية ينتمي الخطان الطيفيان (٧، ٨):

أ ليمن

ب باشن

ج براك

د فوند

٥ رقم الخط الطيفي ذي الطول الموجي الأقصر في متسلسلة بالمر هو:

أ ١

ب ٣

ج ٤

د ٦

٦ رقم الخط الطيفي ذي التردد الأكبر في الخطوط جميعها هو:

أ ١

ب ٣

ج ٧

د ٨

الشكل (٧-٢٨): سؤال (١)،
الفقرات (٤، ٥، ٦).

٢ إذا علمت أن طاقة المستويات في ذرة الهيدروجين تعطى بالعلاقة: $E_n = -\frac{13.6}{n^2}$ إلكترون فولت. فأجب عما يأتي:

أ ما دلالة الإشارة السالبة في العلاقة؟

ب إلى ماذا يشير الرمز (ن) في العلاقة؟

ج هل يمكن أن تكون طاقة أحد مستويات ذرة الهيدروجين مساوية (-١) إلكترون فولت؟
فسر إجابتك.

٣ سقط ضوء طول موجته (٤٢٠) نـم على سطح من فلز الكالسيوم. إذا كان اقتران الشغل للكالسيوم يساوي (٢,٨٧) إلكترون فولت، فاحسب:

أ طاقة الفوتون الواحد للضوء الساقط بوحدة جول، ثم بوحدة إلكترون فولت.

ب الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة من سطح الكالسيوم.

ج جهد القطع.

د طول موجة العتبة للكالسيوم.

٤ عند سقوط ضوء طول موجته (٢٥٠) نـم على مهبط خلية كهروضوئية، يمر تيار كهروضوئي فيها، إذا علمت أن هذا التيار انقطع عند فرق جهد عكسي مقداره (٢,٩٢) فولت. فجد ما يأتي:

أ الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية بوحدة جول، ثم بوحدة إلكترون فولت.

ب اقتران الشغل للفلز الذي يتكون منه المهبط.

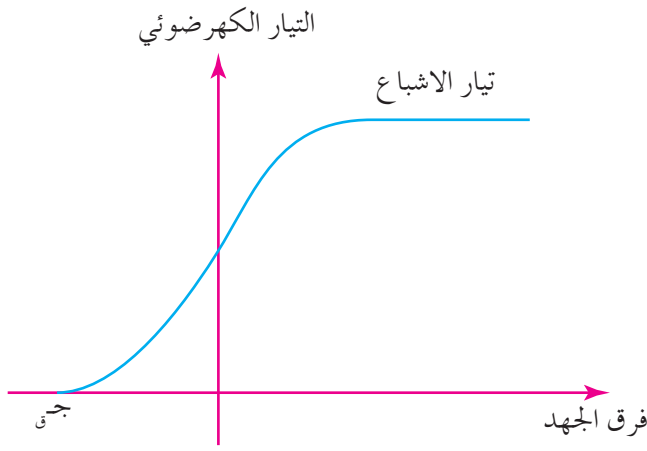
٥ إذا كان أقل طول موجي لفوتون في إحدى متسلسلات طيف ذرة الهيدروجين يساوي $(\frac{9}{R_H})$ م،

حيث (R_H) : ثابت ريديرغ، فأجب عما يأتي:

أ حدد المتسلسلة التي ينتمي إليها هذا الفوتون.

ب احسب طاقة الفوتون.

ج احسب أكبر طول موجي لفوتون ينتمي إلى هذه المتسلسلة.



الشكل (٢٩-٧): سؤال (٦).

٦. يبين الشكل (٢٩-٧) التمثيل البياني لفرق

الجهود بين المهبط والمصعد والتيار الكهروضوئي في خلية كهروضوئية. بين أثر ما يأتي على كل من تيار الإشباع وجهد القطع:

أ. إذا زاد تردد الضوء الساقط.

ب. إذا زادت شدة الضوء الساقط.

ج. إذا زاد الطول الموجي للضوء الساقط.

٧. احسب ما يأتي:

أ. طول موجة الخط الطيفي الثاني في متسلسلة ليمان.

ب. طول موجة الخط الطيفي الثالث في متسلسلة باشن.

ج. أقصر طول موجي في متسلسلة بالمر.

د. أكبر طول موجي في متسلسلة فوند.

٨. إذا كان الزخم الزاوي للإلكترون ذرة الهيدروجين في أحد المدارات يساوي (1.1×10^{-34})

كغ.م^٢/ث. فجد ما يأتي:

أ. رقم المدار الموجود فيه الإلكترون.

ب. نصف قطر المدار.

ج. طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون في هذا المدار.

د. طاقة المستوى في ذرة الهيدروجين عندما يكون الإلكترون في هذا المدار.

٩. أجب عما يأتي:

أ. بين لماذا نجحت النظرية الجسيمية في تفسير وجود تردد عتبة للفلات في الظاهرة

الكهروضوئية، في حين لم تنجح النظرية الموجية.

ب. أعط مثلاً على السلوك الموجي للمادة، وآخر على السلوك الجسيمي لها.

جـ إذا كان اقتران الشغل لفلز يساوي Φ ، هل يمكن لفوتونين طاقة كل منهما $(\frac{1}{\Phi})$ تحرير إلكترون واحد من سطح الفلز؟ وضح إجابتك.

١٠ انتقل إلكترون ذرة هيدروجين من المستوى الثالث إلى المستوى الثاني. احسب طاقة الفوتون المنبعث وتردده وطول موجته نتيجة هذا الانتقال.

١١ انبعث فوتون طول له الموجي $(1.02, 6)$ nm من ذرة هيدروجين، إذا كان هذا الفوتون يقع ضمن متسلسلة ليمان. فجد ما يأتي:

أ رقم المستوى الذي انتقل منه الإلكترون.

ب احسب طاقة الفوتون المنبعث وزخمه الخطي.



الفيزياء النووية

Nuclear Physics

تعود بدايات الفيزياء النووية إلى العام (١٨٩٦م) عندما اكتشف العالم الفرنسي هنري بيكرل النشاط الإشعاعي لبعض مركبات اليورانيوم، وتبع هذا الاكتشاف عدة دراسات لفهم طبيعة الإشعاعات المنبعثة من النوى المشعة، وكان من أبرزها اكتشاف رذرفورد الذي بين فيه أن الإشعاعات المنبعثة ثلاثة أنواع صنف في ما بعد وفق خصائصها، وفي عام (١٩١١م) أجرى رذرفورد وبعض طلابه تجارب مهمة، أبرز نتائجها أن كتلة الذرة تتركز في نواتها، وأن معظم الذرة فراغ.

إلا أن البداية الحقيقية للفيزياء النووية كانت عندما اكتشف شادويك النيوترون عام (١٩٣٢م)، حيث أعاد تجارب معلمه رذرفورد جميعها باستخدام أجهزة أحدث، فلاحظ انبعاث جسيمات متعادلة كهربائياً أطلق عليها اسم نيوترونات، عندما قذف صفيحة من البيريليوم بجسيمات ألفا. وتشهد العديد من مجالات الحياة اليوم كالطب والصناعة والزراعة تطبيقات واسعة للفيزياء النووية. فَمِمَّ تتكون النواة؟ ولماذا تنبعث الأشعة من بعض النوى؟ وكيف يتم الحصول على الطاقة النووية؟

هذه الأسئلة وغيرها ستمكن من الإجابة عنها بعد دراستك هذا الفصل.

الفصل الثامن

في هذا الفصل

(١-٨)

البنية النووية وبعض خصائص النواة.

(٢-٨)

استقرار النواة.

(٣-٨)

طاقة الربط النووية.

(٤-٨)

النشاط الإشعاعي.

(٥-٨)

الإشعاع النووي الطبيعي.

(٦-٨)

الإشعاع النووي الصناعي.

(٧-٨)

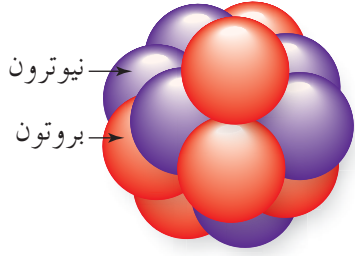
تطبيقات التفاعلات النووية.

تعد الشمس مصدر الطاقة على الكرة الأرضية، ويفسر العلماء مصدر الطاقة الشمسية بتفاعلات الاندماج النووي لنوى الهيدروجين.

ويتوقع منك أن تكون قادرًا على أن:

- * تبين تركيب النواة، وتذكر مكوناتها.
- * تتعرف القوة النووية، وتذكر خصائصها.
- * تحلل منحنى الاستقرار لنوى العناصر.
- * تقارن بين دقائق ألفا ودقائق بيتا وأشعة غاما من حيث الكتلة والشحنة والطبيعة والنفاذية والقدرة على التأين والسرعة).
- * تصف ما يحدث للنواة عندما تبعث دقائق ألفا أو دقائق بيتا.
- * توازن معادلات تتضمن انبعاث دقائق ألفا أو دقائق بيتا أو كليهما.
- * تفسر انبعاث أشعة غاما، وأثر ذلك في النواة الباعثة.
- * توضح المقصود بطاقة الربط النووية، وتفاعل الانشطار النووي والتفاعل المتسلسل.
- * تحلل المنحنى البياني لطاقة الربط النووية لكل نيوكلون.
- * تحسب طاقة الربط النووية لنوى بعض العناصر، وتحسب طاقة الربط النووية لكل نيوكلون.
- * تذكر مبادئ حفظ الكميات الفيزيائية في التفاعلات النووية.
- * توضح المقصود بسلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي، وتحسب عدد دقائق ألفا وبيتا المنبعثة لكل سلسلة.
- * تتعرف الإشعاعات النووية الصناعية واستخداماتها، والأخطار الناجمة عنها.
- * تذكر شروط حدوث التفاعل النووي المتسلسل.
- * توضح مبدأ عمل المفاعل النووي، وآلية التحكم في التفاعل المتسلسل فيه.
- * تتعرف المفاعل النووي بوصفه مصدرًا للطاقة.
- * توضح المقصود بتفاعل الاندماج، وتذكر أمثلة عليه.

■ (١-٨-١) البنية النووية (Nuclear Structure)



تتألف نوى الذرات من بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة كهربائياً، باستثناء نواة الهيدروجين، حيث تحتوي على بروتون واحد فقط، وتسمى البروتونات والنيوترونات معاً في النواة **النيوكليونات (Nucleons)**، ويوضح الشكل (١-٨) هذه النيوكليونات.

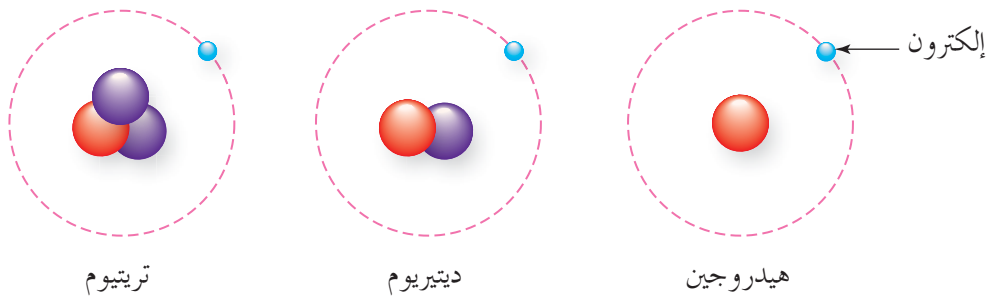
الشكل (١-٨): النيوكليونات.

يمثل عدد البروتونات في نواة الذرة **العدد الذري**، ويرمز له بالرمز (Z) ، ويساوي عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة، ويحدد العدد الذري نوع العنصر، فلكل عنصر عدد ذري خاص به. ويمثل مجموع عدد البروتونات والنيوترونات معاً **العدد الكتلي** لنواة الذرة، ويرمز له بالرمز (A) ، ويمكن التعبير عن العدد الذري والعدد الكتلي لنواة ذرة العنصر بالرموز كما يأتي:



ويمكن حساب عدد النيوترونات (N) في النواة من العلاقة: $(A = N + Z)$ ؛ فمثلاً يرمز لعنصر الصوديوم (Na) الذي عدده الذري $(Z = 11)$ وعدده الكتلي $(A = 23)$ بالرمز ${}^{23}_{11}Na$ فيكون عدد النيوترونات في نواة ذرة الصوديوم $(N = Z - A = 12)$.

ويوجد في الطبيعة ذرات للعنصر نفسه تتساوى أنويتها في العدد الذري، وتختلف في العدد الكتلي تسمى **نظائر (Isotopes)**، مثل نظائر الهيدروجين لاحظ الشكل (١-٨)، وهي الهيدروجين 1_1H ، والديتيريوم 2_1H يسمى الديتيريوم، والهيدروجين 3_1H يسمى التريتيوم.



الشكل (١-٨): نظائر الهيدروجين.

وتتفاوت النظائر في نسبة وجودها في الطبيعة، فقد وجد أن نظير الهيدروجين ^1_1H أكثر وجودًا في الطبيعة من نظيره الآخرين، وأن نظير الكربون $^{12}_6\text{C}$ أكثر وجودًا في الطبيعة من نظائره الأخرى $^{11}_6\text{C}$ ، $^{13}_6\text{C}$ ، $^{14}_6\text{C}$. وقد استطاع العلماء إنتاج نظائر لبعض العناصر صناعيًا. ونظرًا لصغر كتل الجسيمات الذرية فإنها تقاس بوحدة تسمى وحدة الكتلة الذرية، ويرمز لها بالرمز (و.ك.ذ.) وتكافئ $(\frac{1}{12})$ من كتلة ذرة نظير الكربون $^{12}_6\text{C}$ أي أن (و.ك.ذ. = 1.66×10^{-27} كغ) تقريبًا. ويبين الجدول (٨-١) كتل الجسيمات الذرية: البروتون والنيوترون والإلكترون بوحدة الكيلو غرام ووحدة الكتلة الذرية.

الجدول (٨-١): كتل الجسيمات الذرية.

الجسيم	الرمز	الكتلة (كغ)	الكتلة (و.ك.ذ.)
البروتون	ك _ب	1.6726×10^{-27}	١,٠٠٧٣
النيوترون	ك _ن	1.6749×10^{-27}	١,٠٠٨٧
الإلكترون	ك _ه	9.1094×10^{-31}	٥,٤٨٥٨ × ١٠ ^{-٤}

■ (٨-١-٢) بعض خصائص النواة (Some Properties of Nucleus)

درست سابقًا أن العالم رذرفورد عندما قذف صفائح فلزية مختلفة بجسيمات ألفا، افترض أن نوى ذرات الفلز كروية الشكل، وتوالت التجارب عقب رذرفورد التي أظهرت أن معظم نوى الذرات شكلها كروي، وأن نصف قطرها (نق) يمكن حسابه من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{نق} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad \text{..... (٨-١)}$$

حيث (A): العدد الكتلي للنواة، و(نق): ثابت يساوي 1.2×10^{-10} م.

مثال (٨-١)

احسب نصف قطر نواة الليثيوم ^8_3Li .

الحل:

بما أن العدد الكتلي لنواة الليثيوم (A = ٨) فإن:

$$\text{نق} = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{8}{\pi}} \times 1.2 \times 10^{-10} \text{ م}$$

$$= 2.4 \times 10^{-10} \text{ م}$$

وبما أن النواة كروية الشكل، لذلك يمكن حساب حجمها من حجم الكرة: $\text{ح} = \frac{4}{3}\pi \text{نق}^3$ وبتعويض قيمة (نق) من العلاقة (٨-١)، فإن حجم النواة يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{ح} = \frac{4}{3}\pi (\text{نق})^3 (A)$$

$$\text{ح} = \frac{4}{3}\pi \text{نق}^3 A$$

لاحظ أن حجم النواة يعتمد فقط على العدد الكتلي لها.

ومن الخصائص المهم دراستها للنواة كثافتها، إذ درست سابقاً أن كثافة أي مادة تحسب من العلاقة:

$$\text{ث} = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}}$$

بالرجوع إلى الجدول (٨-١)، نلاحظ أن كتلة البروتون تساوي كتلة النيوترون تقريباً، لذا يمكن أن نحسب كتلة تقريبية للنواة، حيث (كتلة النواة التقريبية = $A \times \text{ك.ب}$). ويمكن حساب الكثافة للنواة كما يأتي:



$$\text{ث}^{\text{نواة}} = \frac{A \times \text{ك.ب}}{\frac{4}{3}\pi \text{نق}^3 A}$$

$$\text{أي أن: ث}^{\text{نواة}} = \frac{\text{ك.ب}}{\frac{4}{3}\pi \text{نق}^3}$$

لاحظ أن الكميات جميعها ثوابت، فماذا تستنتج؟

مثال (٨-٢)

احسب كثافة كل من نواتي الهيليوم ${}^4_2\text{He}$ ، والحديد ${}^{56}_{26}\text{Fe}$.

الحل:

يمكن حساب كثافة المادة النووية من العلاقة:

$$\text{ث}^{\text{نواة}} = \frac{\text{ك.ب}}{\frac{4}{3}\pi \text{نق}^3}$$

وبتعويض قيم الكميات في هذه العلاقة نجد أن:

$$\text{ث نواة} = \frac{27-10 \times 1,6726}{3(10-10 \times 1,2) \times 3,14 \times \frac{4}{3}}$$

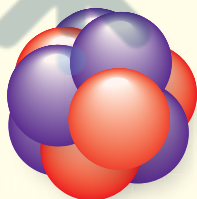
$$\text{ث نواة} = 2,3 \times 10^{17} \text{ كغ/م}^3$$

ما يعني أن كثافة نواة الهيليوم تساوي كثافة نواة الحديد، وبوجه عام فإن كثافة نوى العناصر جميعها ثابتة تقريباً؛ لأن مكونات النواة هي نفسها للعناصر جميعها. ولو تخيلنا أن حجم مادة نووية بحجم حبة حمص نصف قطرها ($\frac{1}{4}$ سم) لكانت كتلتها تقريباً (١٢٠ مليون طن).

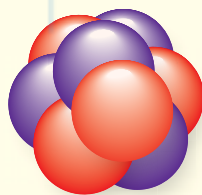
مراجعة (٨-١)

١ ما عدد البروتونات في نواة عنصر البوتاسيوم $^{39}_{19}\text{K}$ ؟ وما عدد النيوترونات فيها؟

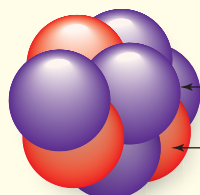
٢ يمثل الشكل (٨-٣) ثلاث نوى مختلفة ممثلة بالرموز (أ، ب، ج). أي النوى تشكل نظائر للعنصر نفسه؟ فسر إجابتك.



(ج)



(ب)



(أ)

نيوترون
بروتون

الشكل (٨-٣): سؤال (٢).

٣ (س، ص) نواتان، إذا علمت أن العدد الكتلي للنواة (س) يساوي ثلاثة أمثال العدد الكتلي للنواة (ص). فجد نسبة :

أ كثافة النواة (س) إلى كثافة النواة (ص).

ب قطر النواة (س) إلى قطر النواة (ص).

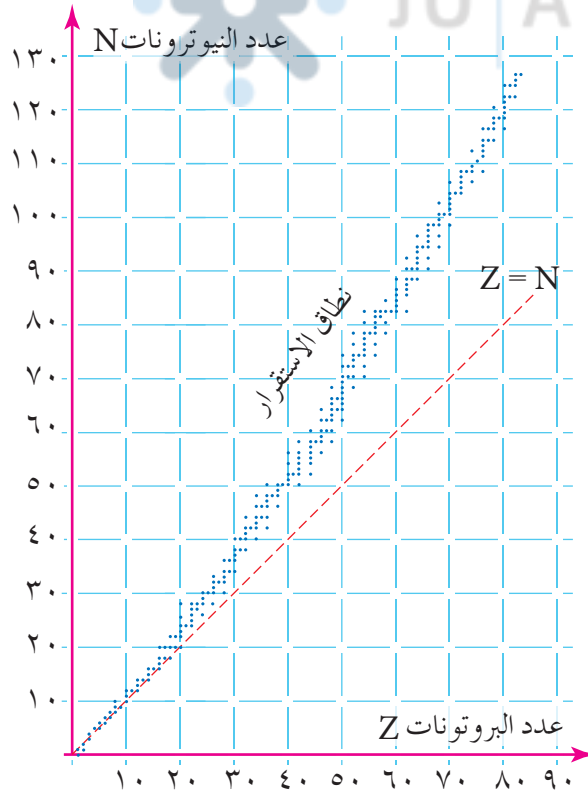
ج حجم النواة (س) إلى حجم النواة (ص).

تعد النواة تجمّعاً من نيوترونات متعادلة كهربائياً وبروتونات موجبة الشحنة في حيز صغير جداً، وكما تعلم فإن الشحنات المتشابهة تتنافر كهربائياً، فكيف تحافظ النواة على تماسكها بالرغم من وجود قوة تنافر كهربائية بين بروتوناتها؟

إن سبب ذلك وجود نوع آخر من القوى تربط مكونات النواة معاً تسمى **القوة النووية (Nuclear Force)** وهي قوة تجاذب ذات مدى قصير جداً تربط النيوكليونات المتجاورة في النواة. فكل نيوكليونين متجاورين يتجاذبان بغض النظر عن شحنة أي منهما سواء أكانا بروتونين أم نيوترونين أم بروتوناً ونيوترونًا؛ وهذا يعني أن البروتونات والنيوترونات تتجاذب بفعل القوة النووية بالإضافة إلى تنافر البروتونات بفعل القوة الكهربائية.

وتمتاز القوة النووية بكبر مقدارها وقصر مداها في حال كان النيوكليونان متجاورين، وتكون أكبر ما يمكن بين نيوكليونين متلاصقين عندما يكون البعد بينهما $(1.4 \times 10^{-15} \text{ م})$ تقريباً، وتصبح قوة التنافر الكهربائية بين بروتونين في نواة أكبر من القوة النووية إذا زاد البعد بينهما إلى أربعة أضعاف هذا المقدار.

ويشكل عدد النيوترونات في النواة عاملاً مهماً في استقرارها؛ وذلك لأن النيوترونات متعادلة كهربائياً فتتأثر بالقوة النووية فقط. وعند تصنيف النوى تجريبياً إلى مستقرة وغير مستقرة، وتمثيل العلاقة بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات بيانياً للنوى التي يقل عددها الذري عن (٨٣)، نحصل على الشكل (٨-٤)؛ إذ تشير النقاط الزرقاء في الشكل إلى النوى المستقرة، وتظهر في نطاق ضيق يسمى **نطاق الاستقرار**.



الشكل (٨-٤): منحني الاستقرار.

إذا تأملت المنحنى تجد أن النوى المستقرة ($Z \geq 20$) إما أن يكون عدد النيوترونات فيها مساوياً عدد بروتوناتها مثل نواة النروجين ${}^{14}_7\text{N}$ ، فتقع على الخط ($Z=N$)، أو يزيد عدد النيوترونات على عدد البروتونات ($Z < N$) مثل نواة الصوديوم ${}^{23}_{11}\text{Na}$.

أما النوى المستقرة التي يقع عددها الذري ضمن المدى ($20 < Z < 83$) فنلاحظ أن أنويتها تقع ضمن نطاق الاستقرار فوق الخط ($Z=N$). فوجود عدد كبير من البروتونات فيها، يزيد من قوى التنافر الكهربائية بين بروتوناتها بشكل كبير، إلا أن عدد النيوترونات في هذه النوى يفوق دائماً عدد البروتونات، لذلك تبقى قوى التجاذب النووية سائدة على قوى التنافر الكهربائية. فمثلاً، تعد نواة الزركونيوم ${}^{90}_{40}\text{Zr}$ من النوى المستقرة؛ إذ تحتوي على (٤٠) بروتوناً و (٥٠) نيوترونًا، وتحتوي نواة الذهب ${}^{197}_{79}\text{Au}$ على (٧٩) بروتوناً و (١١٨) نيوترونًا، وهي من النوى المستقرة أيضاً.

أما النوى التي عددها الذري يساوي ٨٣ أو يزيد عليه ($Z \leq 83$) فإنها غير مستقرة؛ نظراً لكبر حجم النواة، وتباعد النيوكليونات بعضها عن بعض؛ فتتعاظم قوى التنافر الكهربائية بين بروتونات النواة، عندئذ لا تستطيع القوى النووية أن تتغلب على قوى التنافر الكهربائية أو تجاريها مهما بلغ عدد النيوترونات في النواة.

مراجعة (٨-٢)

١) تمتاز القوة النووية بجملة من الخصائص، اذكرها.

٢) فسر ما يأتي:

أ) تعد نواة الثوريوم ${}^{234}_{90}\text{Th}$ من النوى غير المستقرة.

ب) نلاحظ انحراف نطاق الاستقرار نحو الأعلى مع زيادة العدد الذري في منحنى الاستقرار.

يُبين العالم أينشتاين في نظريته النسبية الخاصة تكافؤ الكتلة مع الطاقة، فالكتلة يمكن أن تتحول إلى طاقة، والطاقة يمكن أن تتحول إلى كتلة، ويمكن أيضاً حساب الطاقة المكافئة لمقدار من الكتلة (ΔK) وفقاً للعلاقة الرياضية الآتية:

$$ط = \Delta K \times س^2 \dots\dots\dots (٢-٨)$$

حيث (ط): الطاقة بوحدة الجول، و(ΔK): الكتلة بوحدة الكيلوغرام، و(س): سرعة الضوء في الفراغ، وتساوي (٣×١٠^8) م/ث.

وتسمى العلاقة الرياضية (٢-٨) معادلة أينشتاين في تكافؤ (الطاقة - الكتلة)، وتبين هذه العلاقة أنه يمكن الحصول على طاقة هائلة من مقدار صغير جداً من الكتلة؛ فالطاقة المكافئة لكتلة (١ و.ك.ذ.) تساوي (٩٣١,٥) مليون إلكترون فولت، وعليه يمكن حساب الطاقة بوحدة المليون إلكترون فولت المكافئة لكتلة (ΔK) مقيسة بوحدة الكتلة الذرية (و.ك.ذ.)، وفق العلاقة الرياضية الآتية:

$$ط = \Delta K \times ٩٣١,٥ \dots\dots\dots (٣-٨)$$

مثال (٣-٨)

احسب الطاقة المكافئة لكتلة البروتون بوحدة المليون إلكترون فولت.

الحل:

من الجدول (١-٨) نجد أن كتلة البروتون (١,٠٠٧٣) و.ك.ذ.، نحسب الطاقة المكافئة لكتلة البروتون من العلاقة الآتية:

$$ط = \Delta K \times ٩٣١,٥$$

$$= ٩٣١,٥ \times ١,٠٠٧٣$$

$$= ٩٣٨,٣ \text{ مليون إلكترون فولت.}$$

تمكن العلماء من تعيين كتل النوى وكتل مكوناتها بدقة كبيرة بعد اختراع جهاز مطياف الكتلة، ووُجد فرق بين كتلة النواة ومجموع كتل مكوناتها. وفي ما يأتي توضيح لكيفية حساب الفرق في الكتلة بين نواة منفردة ومكوناتها.

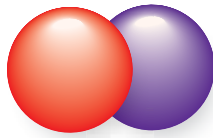
افترض أن لدينا بروتوناً واحداً ونيوترونًا واحدًا، وأردنا تكوين نواة ديتيريوم ${}^2_1\text{H}$ منهما، فإن كتلة مكونات نواة الديتيريوم تحسب من العلاقة الآتية:

$$K_{\text{المكونات}} = K_p \times Z + K_n \times N$$

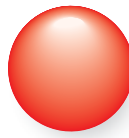
$$= 1,0073 \times 1 + 1,0087 \times 1$$

$$= 2,016 \text{ و.ك.ذ.}$$

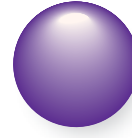
وتبين من الأبحاث العلمية أن كتلة نواة الديتيريوم ($K_{\text{نواة}}$) = 2,0136 و.ك.ذ.، لاحظ الشكل (٨-٥).



نواة الديتيريوم
2,0136 و.ك.ذ.



بروتون
1,0073 و.ك.ذ.



نيوترون
1,0087 و.ك.ذ.

الشكل (٨-٥): كتلة نواة الديتيريوم ومكوناتها.

والفرق في الكتلة بين نواة الديتيريوم منفردة ومكوناتها يمكن حسابه كالآتي:

$$\Delta K = K_{\text{المكونات}} - K_{\text{النواة}}$$

$$= 2,016 - 2,0136$$

$$= 0,0024 \text{ و.ك.ذ.}$$

فما تفسير هذا الفرق في الكتلة؟ لقد دلت الدراسات على أن كتلة النواة تكون دائماً أقل من مجموع كتل مكوناتها، وهذا الفرق في الكتلة (ΔK) يتحول إلى طاقة وفقاً لمعادلة أينشتاين في تكافؤ (الطاقة - الكتلة)، وهذا المقدار من الطاقة يمثل مقدار الطاقة الخارجية التي يجب أن تزود بها النواة لفصل مكوناتها عن بعضها نهائياً وتسمى **طاقة الربط النووية** (ط). ويمكن حسابها من العلاقة الرياضية الآتية:

$$P_r = \Delta K \times 931,5$$

$$P_r = (K_{\text{المكونات}} - K_{\text{النواة}}) \times 931,5$$

$$P_r = 931,5 \times \{K_{\text{النواة}} - (K_p \times Z + K_n \times N)\} \dots \dots \dots (٨-٤)$$

ويمكن حساب طاقة الربط النووية للنيوكليون الواحد من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\text{طاقة الربط النووية لكل نيوكليون} = \frac{\text{طاقة الربط النووية}}{\text{العدد الكتلي}} \dots \dots \dots (٨-٥)$$

احسب لنواتي البوتاسيوم $^{39}_{19}\text{K}$ واليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ ما يأتي:

أ) طاقة الربط النووية علمًا بأن كتلة نواة البوتاسيوم (٣٨,٩٦٣٧) و.ك.ذ، وكتلة نواة اليورانيوم (٢٣٥,٠٤٣٩) و.ك.ذ.

ب) طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

الحل:

أ) طاقة الربط النووية:

$$\blacksquare \text{ لنواة البوتاسيوم: } 19 = Z, 20 = N = 39 - 19$$

$$\Delta K = K_{\text{المكونات}} - K_{\text{النواة}}$$

$$= (Z \times K_{\text{ب}} + N \times K_{\text{ن}}) - K_{\text{النواة}}$$

$$= 38,9637 - (1,0073 \times 19 + 1,0087 \times 20)$$

$$= 38,9637 - 39,3127$$

$$\Delta K = 0,349 \text{ و.ك.ذ}$$

$$\text{ط} = \Delta K \times 931,5$$

$$= 0,349 \times 931,5 = 325,09 \text{ مليون إلكترون فولت.}$$

$$\blacksquare \text{ لنواة اليورانيوم: } 92 = Z, 143 = N = 235 - 92$$

$$\Delta K = K_{\text{المكونات}} - K_{\text{النواة}}$$

$$= (Z \times K_{\text{ب}} + N \times K_{\text{ن}}) - K_{\text{النواة}}$$

$$= 235,0439 - (1,0073 \times 92 + 1,0087 \times 143)$$

$$= 235,0439 - 236,9157$$

$$\Delta K = 1,8718 \text{ و.ك.ذ}$$

$$\text{ط} = \Delta K \times 931,5$$

$$= 1,8718 \times 931,5 = 1743,58 \text{ مليون إلكترون فولت.}$$

إن طاقة الربط النووية لنواة اليورانيوم أكبر منها لنواة البوتاسيوم، فهل تتوقع أن تكون نواة

اليورانيوم أكثر استقرارًا من نواة البوتاسيوم؟

ب) طاقة الربط النووية لكل نيوكليون:

■ لنواة البوتاسيوم:

$$\frac{\text{طاقة الربط النووية}}{\text{العدد الكتلي}} = \text{طاقة الربط النووية لكل نيوكليون}$$

$$\frac{325,09}{39} =$$

$$= 8,34 \text{ مليون إلكترون فولت/نيوكليون.}$$

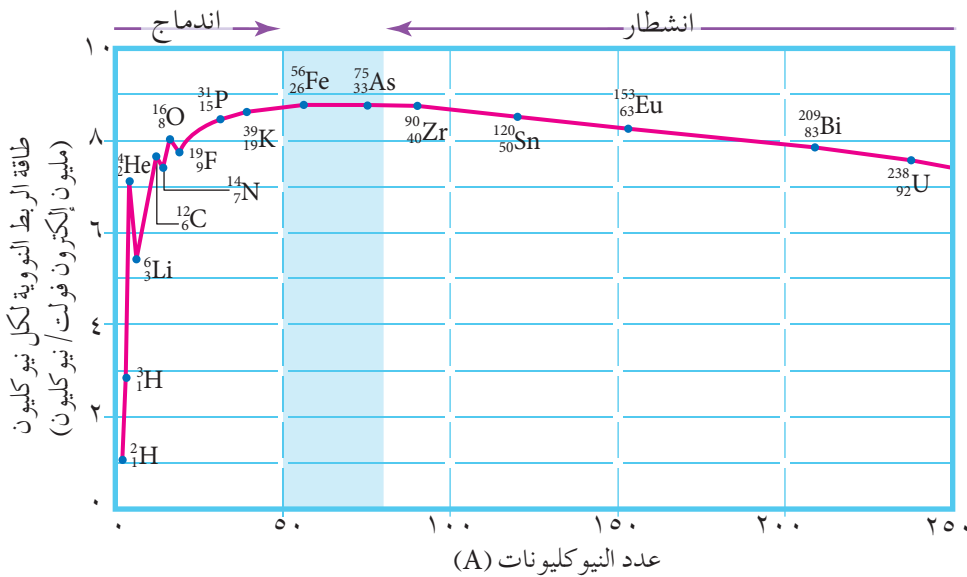
■ لنواة اليورانيوم:

$$\frac{\text{طاقة الربط النووية}}{\text{العدد الكتلي}} = \text{طاقة الربط النووية لكل نيوكليون}$$

$$\frac{1743,58}{238} =$$

$$= 7,42 \text{ مليون إلكترون فولت/نيوكليون.}$$

نلاحظ من المثال السابق أن الطاقة اللازمة لفصل أحد نيوكليونات نواة البوتاسيوم أكبر من تلك اللازمة لفصل أحد نيوكليونات نواة اليورانيوم؛ وهذا يعني أن نواة البوتاسيوم أكثر استقراراً من نواة اليورانيوم، وبوجه عام فإنه كلما كانت طاقة الربط النووية لكل نيوكليون أكبر كانت النواة أكثر استقراراً، ويوضح الشكل (٨-٦) علاقة طاقة الربط النووية لكل نيوكليون مع العدد الكتلي للنوى المختلفة.



الشكل (٨-٦): منحنى طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

نلاحظ من المنحنى أن النوى المتوسطة ($50 \leq A \leq 80$) لها أعلى طاقة ربط نووية لكل نيوكليون؛ ما يجعلها أكثر استقرارًا من غيرها؛ إذ يظهر من المنحنى أن القيمة العظمى لطاقة الربط النووية لكل نيوكليون ($8,8$) مليون إلكترون فولت/نيوكليون تكون لنواة الحديد $^{56}_{26}\text{Fe}$ إحدى النوى المتوسطة.

أما النوى الخفيفة ($A > 50$) فإن طاقة الربط النووية لكل نيوكليون فيها تكون أقل بالنسبة إلى النوى المتوسطة، لذلك يمكن دمجها في حال توافرت ظروف مناسبة لتكوين نوى كتلتها أقرب إلى كتلة نواة الحديد لتصبح أكثر استقرارًا، ويصاحب ذلك تحرر قدر من الطاقة. وكذلك النوى الثقيلة ($A < 80$) فإن طاقة الربط النووية لكل نيوكليون فيها تكون أقل بالنسبة إلى النوى المتوسطة؛ لذلك يمكن شطرها في حال توافرت ظروف مناسبة لتكوين نواتين أكثر استقرارًا، كتلة كل منهما أقرب إلى كتلة نواة الحديد، مع تحرر قدر من الطاقة.

مراجعة (٨-٣)

١ احسب الطاقة الناتجة من تحويل (1×10^{-3}) كغ من المادة إلى طاقة بوحدة الجول، ثم المليون إلكترون فولت.

٢ رتب تصاعديًا نوى العناصر الآتية: $^{56}_{26}\text{Fe}$ ، $^{208}_{82}\text{Pb}$ ، $^{238}_{92}\text{U}$ ، وفق طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

٣ فسر: "تكون كتلة النواة دائمًا أقل من مجموع كتل مكوناتها".

٤ (س، ص) نواتان ثقيلتان لهما العدد الكتلي نفسه، إذا علمت أن النواة (س) تمتلك طاقة ربط نووية أكبر من النواة (ص) فأى النواتين أكثر استقرارًا؟ فسر إجابتك.

توجد في الطبيعة نوى مستقرة وأخرى غير مستقرة، وتعد العناصر جميعها التي يزيد عددها الذري على (٨٣) غير مستقرة (Unstable)، وللوصول إلى حالة الاستقرار تتحول النواة غير المستقرة في الطبيعة إلى نواة أخرى عن طريق التخلص من جزء من طاقتها على شكل انبعاث إشعاعات أو جسيمات، فتتغير مكونات النواة؛ لذا توصف النوى غير المستقرة بأنها مشعة، وفي هذه الحالة نقول أن النواة اضمحلت وتسمى عملية الانبعاث التلقائي للإشعاع من النوى غير المستقرة

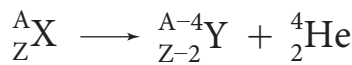
النشاط الإشعاعي (Radioactivity).

وفي أي اضمحلال أو تفاعل نووي يجب أن تتحقق أربعة مبادئ لحفظ الكميات الفيزيائية، وهي مبدأ حفظ العدد الذري، ومبدأ حفظ العدد الكتلي، ومبدأ حفظ الزخم الخطي، ومبدأ حفظ (الطاقة-الكتلة).

ويتألف الإشعاع المنبعث من نوى العناصر المشعة من ثلاثة أنواع هي أشعة ألفا (α)، وأشعة بيتا (β)، وأشعة غاما (γ)، وفي ما يأتي خصائص هذه الإشعاعات وانبعاثها.

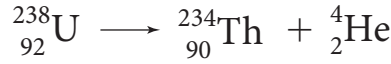
■ (٨-٤-١) اضمحلال ألفا (Alpha Decay)

يصدر عن بعض النوى المشعة أشعة تسمى أشعة ألفا (α-ray)، وهي دقائق (جسيمات) موجبة الشحنة، يتكون الجسيم الواحد منها من بروتونين ونيوترونين، لذا فهي نوى ذرات هيليوم ${}^4_2\text{He}$ ، وتمتاز دقائق ألفا بقدرتها العالية على تأيين ذرات المادة التي تصطدم بها؛ وذلك بسبب كبر كتلتها وكبر شحنتها؛ ما يجعل احتمال تصادمها مع ذرات المادة كبيراً عند مرورها في المادة، وعليه تفقد دقائق ألفا معظم طاقتها في التأيين، فتكون قدرتها على النفاذ ضعيفة؛ إذ لا تكاد تخترق صفحة من الورق. تطرأ تغيرات على النوى عندما تبعث دقائق ألفا، فإذا أطلقت نواة مشعة دقيقة ألفا فإنها تفقد بروتونين ونيوترونين؛ أي يقل عددها الذري بمقدار (٢)، ويقل عددها الكتلي بمقدار (٤)، وتنتج نواة جديدة أكثر استقراراً، يعرف هذا التحول باضمحلال ألفا (Alpha Decay)، ويعبر عنه بالمعادلة النووية الآتية:



حيث (X): النواة الأم (المشعة)، و(Y): النواة الناتجة، ويصاحب هذا الانبعاث فرق في الكتلة يظهر على شكل طاقة حركية للنواتج.

وتوضح المعادلة النووية السابقة أن مجموع الأعداد الكتلية للنواتج يساوي العدد الكتلي للنواة الأم، وهو ما يعرف بمبدأ حفظ العدد الكتلي، ويكون مجموع الأعداد الذرية للنواتج مساوياً العدد الذري للنواة الأم وهو ما يعرف بمبدأ حفظ العدد الذري الذي يعد صورة من صور قانون حفظ الشحنة، ويتضح ذلك من اضمحلال ألفا في المعادلة النووية الآتية:



ويجب أن يكون مجموع الطاقة والكتلة للنوى والجسيمات المتفاعلة أو المضمحلة مساوياً مجموع الطاقة والكتلة للنوى والجسيمات الناتجة من التفاعل أو الاضمحلال، وهذا ما يعرف بمبدأ حفظ (الطاقة-الكتلة)، بالإضافة إلى تحقق مبدأ حفظ الزخم الخطي الذي ينص على أن الزخم الخطي للنوى والجسيمات المتفاعلة أو المضمحلة يساوي الزخم الخطي للنوى والجسيمات الناتجة من التفاعل أو الاضمحلال.

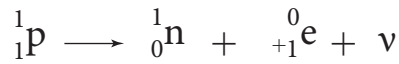
■ (٨-٤-٢) اضمحلال بيتا (Beta Decay)

يصدر عن بعض النوى المشعة أشعة تسمى أشعة بيتا (β -ray)، وهي إلكترونات سالبة الشحنة يعبر عنها بالرمز (${}_{-1}^0\text{e}$) وتسمى بيتا السالبة (β^-)، وتنتقل بسرعة عالية جداً، ولصغر شحنتها، فإن قدرتها على التأين قليلة في الأوساط التي تعبرها؛ ولصغر كتلتها يكون مدى نفاذيتها كبيراً. عندما نقول إن نواة مشعة بعثت دقيقة بيتا، فهذا يعني أن النواة بعثت إلكترونًا، فإذا كانت النواة تتكون من بروتونات ونيوترونات فقط؛ فمن أين جاء هذا الإلكترون؟ عندما يتحلل أحد نيوترونات النواة ينتج بروتون وإلكترون، وبسبب صغر كتلة الإلكترون، ووفق فرضية دي بروي يكون الطول الموجي المصاحب للإلكترون كبيراً مقارنة بأبعاد النواة، فتبعته النواة خارجها، بينما يبقى البروتون ذو الكتلة الكبيرة داخلها.

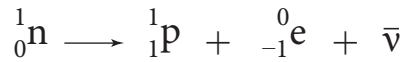
وقد وجد تجريبياً أن بعض النوى المشعة تبعث دقائق لها خصائص الإلكترونات نفسها إلا أنها تحمل شحنة موجبة أطلق عليها اسم بوزيترونات، ويعبر عنها بالرمز (${}_{+1}^0\text{e}$) وتسمى بيتا الموجبة (β^+). فعندما يتحلل أحد بروتونات النواة ينتج نيوترون وبوزيترون، فالبوزيترون تبعته النواة خارجها، للسبب ذاته الذي انبعث به الإلكترون، ويبقى النيوترون داخل النواة.

ويتحقق مبدأ حفظ العدد الكتلي ومبدأ حفظ العدد الذري في أي نشاط إشعاعي يبعث

أشعة بيتا. ولتحقق مبدأ حفظ الزخم الخطي ومبدأ حفظ (الطاقة-الكتلة) افترض العالم باولي انبعاث جسيم صغير مهمل الكتلة وغير مشحون يسمى النيوتريينو يعبر عنه بالرمز (ν) يصاحب دائماً انبعاث البوزيترون، ويمكن التعبير عن تحلل البروتون بالمعادلة الآتية:



أما انبعاث الإلكترون فيصاحبه انبعاث جسيم صغير آخر مهمل الكتلة وغير مشحون، يسمى ضد النيوتريينو ويعبر عنه بالرمز $\bar{\nu}$ ، وعليه يمكن التعبير عن تحلل النيوترون بالمعادلة الآتية:



ماذا عن النواة التي تبعث دقيقة بيتا؟ ما التغيرات التي تطرأ عليها؟ عندما تطلق نواة مشعة دقيقة بيتا السالبة (الإلكترون)، فإن عدد نيوتروناتها يقل بمقدار (١)، نتيجة تحللها، ويزداد تبعاً لذلك عدد بروتوناتها بمقدار (١)؛ أي يزداد العدد الذري بمقدار (١) بينما يبقى العدد الكتلي ثابتاً، وتنتج نواة جديدة أكثر استقراراً، ويعبر عن هذا التحول، الذي يعرف باضمحلال بيتا السالبة، بالمعادلة النووية الآتية:



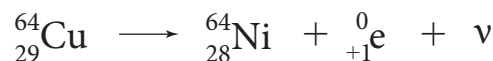
ومن الأمثلة على هذا الاضمحلال اضمحلال نواة نظير الكربون إلى نواة النتروجين، وفق المعادلة النووية الآتية:



أما إذا أطلقت نواة مشعة دقيقة بيتا الموجبة (البوزيترون) فإن عدد بروتوناتها يقل بمقدار (١)، نتيجة تحللها، ويزداد تبعاً لذلك عدد نيوتروناتها بمقدار (١)؛ أي يقل العدد الذري بمقدار (١) بينما يبقى العدد الكتلي ثابتاً، وتنتج نواة جديدة أكثر استقراراً، ويعبر عن هذا التحول، الذي يعرف باضمحلال بيتا الموجبة، بالمعادلة النووية الآتية:



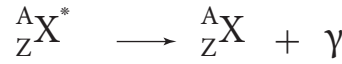
ومن الأمثلة على هذا الاضمحلال اضمحلال نواة نظير النحاس إلى نواة النيكل، وفق المعادلة النووية الآتية:



■ (٨-٤-٣) اضمحلال غاما (Gamma Decay)

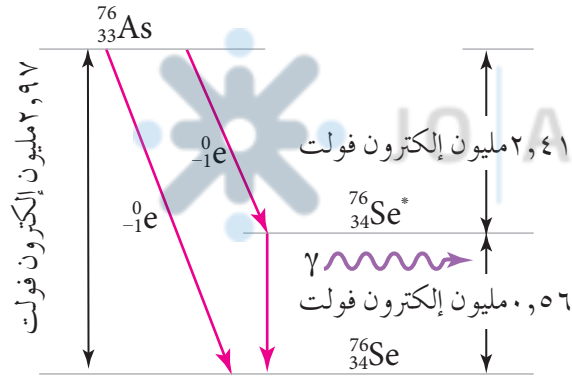
يصدر عن بعض النوى المشعة غير المستقرة أشعة تسمى أشعة غاما (γ -ray)، وهي أشعة كهرومغناطيسية (فوتونات)، ليس لها كتلة، وذات طاقة عالية جدًا، فتكون قدرتها على النفاذ هائلة، أما قدرتها على التأين فتكون منخفضة؛ لأنه لا شحنة لها.

عندما تبعث نواة ما دقائق ألفا أو بيتا فإن النواة الناتجة - غالبًا - تبقى مثارة؛ لامتلاكها طاقة زائدة عن الوضع الطبيعي لها، ولكي تستقر النواة تتخلص من هذه الطاقة باعثة أشعة غاما، ولا يحدث عندئذ أي تغيير في العددين الكتلي والذري للنواة الباعثة، ويمكن التعبير عن اضمحلال غاما (γ -ray) بالمعادلة النووية الآتية:



حيث (X^*): النواة المثارة.

ويبين الشكل (٨-٧)، اضمحلال نواة الزرنيخ ${}^{76}_{33}\text{As}$ المشعة، حيث يمكن أن تصل إلى حالة



الشكل (٨-٧): اضمحلال نواة الزرنيخ.

الاستقرار بإنتاج نواة جديدة بإحدى طريقتين:

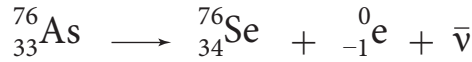
الطريقة الأولى: وتتم في مرحلة واحدة حيث

تبعث نواة الزرنيخ ${}^{76}_{33}\text{As}$ دقيقة بيتا سالبة

طاققتها (٢,٩٧) مليون إلكترون فولت، وتنتج

نواة السيلينيوم ${}^{76}_{34}\text{Se}$ في حالة الاستقرار وفق

المعادلة النووية الآتية:

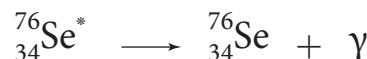
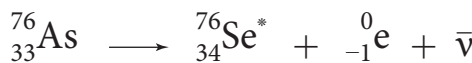


الطريقة الثانية: وتتم في مرحلتين حيث تبعث نواة الزرنيخ ${}^{76}_{33}\text{As}$ دقيقة بيتا سالبة طاقتها (٢,٤١)

مليون إلكترون فولت، فتنتج نواة السيلينيوم ${}^{76}_{34}\text{Se}^*$ المثارة، ولكي تصل الأخيرة إلى حالة الاستقرار

تبعث أشعة غاما (γ) على هيئة فوتون طاقته (٠,٥٦) مليون إلكترون فولت، والمعادلتان النوويتان

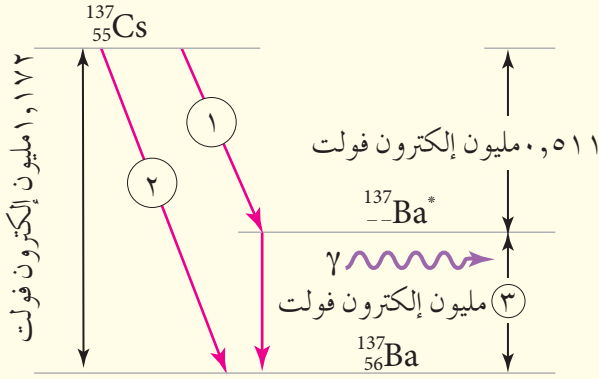
الآتيتان توضحان ذلك:



١ أي النوى الآتية تنتج عندما تضمحل نواة البولونيوم $^{210}_{84}\text{Po}$ باعثة دقيقة ألفا:

($^{210}_{82}\text{Pb}$ ، $^{208}_{82}\text{Pb}$ ، $^{206}_{82}\text{Pb}$) ؟

٢ يمثل الشكل (٨-٨) اضمحلال نواة السيزيوم، تأمل الشكل وأجب عن الأسئلة الآتية:



الشكل (٨-٨): سؤال (٢).

أ ما نوع الإشعاعات المنبعثة والمشار إليها بالرقم (١) والرقم (٢) ؟

ب احسب طاقة الفوتون المنبعث المشار إليها بالرقم (٣).

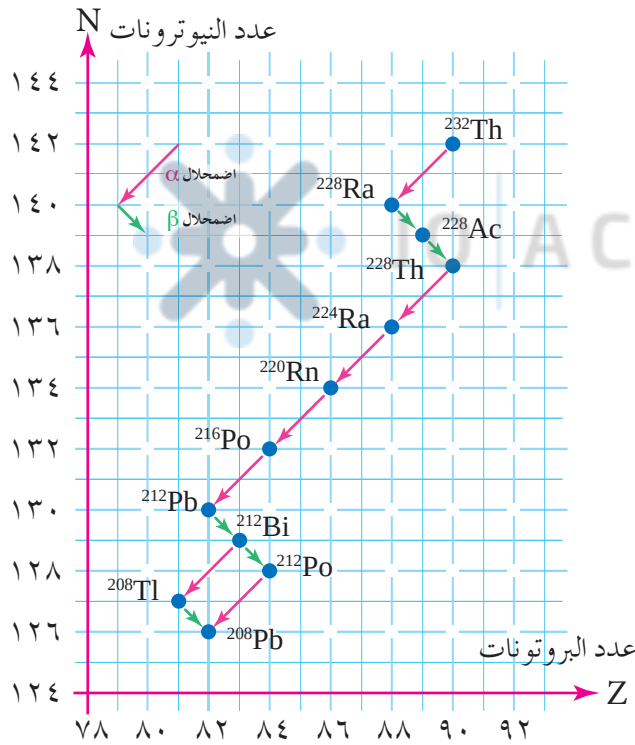
ج اكتب معادلة نووية موزونة تمثل اضمحلال نواة Cs إلى نواة Ba*

٣ فسر العبارة الآتية:

” تنبعث دقائق بيتا السالبة أو الموجبة من النواة بالرغم من أنها ليست من مكونات النواة“.

تضمحل النوى غير المستقرة تلقائيًا في الطبيعة وتبعث إشعاعًا يسمى إشعاعًا نوويًا طبيعيًا، ومن أبرز مصادر هذا الإشعاع **سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي (Natural Radioactive Decay Series)** وهي مجموعة التحولات المتتالية التلقائية التي تبدأ بنواة نظير مشع لعنصر ثقيل، وتنتهي بنواة نظير مستقر لعنصر آخر، ويصاحب كل تحول انبعاث دقائق ألفا أو دقائق بيتا.

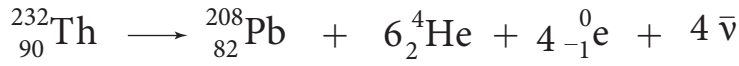
ومن أشهر سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي ثلاث سلاسل هي: سلسلة اليورانيوم تبدأ بنظير اليورانيوم $^{238}_{92}\text{U}$ ، وسلسلة الأكتينيوم تبدأ بنظير اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ ، وسلسلة الثوريوم تبدأ بنظير الثوريوم $^{232}_{90}\text{Th}$ ، إذ تسمى السلسلة باسم العنصر الأطول عمرًا فيها، وتبدأ هذه السلاسل بنواة نظير مشع، وتنتهي جميعها بنواة أحد نظائر الرصاص المستقر.



الشكل (٨-٩): سلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي
لنواة الثوريوم ٢٣٢.

يبين الشكل (٨-٩) سلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي لنواة الثوريوم $^{232}_{90}\text{Th}$. لاحظ أن نواة النظير $^{232}_{90}\text{Th}$ تبدأ بإشعاع دقيقة ألفا لتنتج نواة الراديوم $^{228}_{88}\text{Ra}$ والتي بدورها تضمحل إلى نواة أكتينيوم $^{228}_{89}\text{Ac}$ باعثة دقيقة بيتا السالبة، ويستمر الاضمحلال المتتابع للنوى حتى يصل إلى نواة البزموت $^{212}_{83}\text{Bi}$ ، حيث تواجه النواة أكثر من اضمحلال محتمل لها، وتنتهي هذه السلسلة بنواة نظير الرصاص المستقر $^{208}_{82}\text{Pb}$.

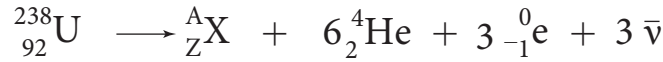
وبتأمل كامل اضمحلالات سلسلة الثوريوم نلاحظ أنه ينبعث (٦) دقائق ألفا و(٤) دقائق بيتا السالبة عبر أي مسار اضمحلال محتمل يتم اختياره، لذا يمكن التعبير عن اضمحلالات هذه السلسلة جميعها بالمعادلة النووية الآتية:



لاحظ أن مبدأ حفظ العدد الكتلي ومبدأ حفظ العدد الذري يتحققان في هذه المعادلة وفي المعادلات النووية السابقة جميعها، وكذلك يتحقق مبدأ حفظ (الطاقة - الكتلة) ومبدأ حفظ الزخم الخطي.

مثال (٨-٥)

تضمحل نواة اليورانيوم ${}_{92}^{238}\text{U}$ وفق المعادلة النووية الآتية:



أ) ما العدد الكتلي (A) للنواة الناتجة (X)؟

ب) ما العدد الذري (Z) للنواة الناتجة (X)؟

الحل:

أ) وفق مبدأ حفظ العدد الكتلي:

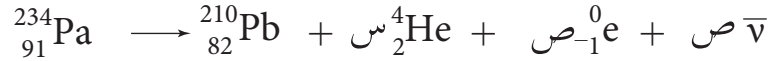
$$\begin{aligned} A_{\text{اليورانيوم}} &= A_{\text{ألفا}} + A_{\text{بيتا السالبة}} + A_X \\ 238 &= (4 \times 6) + (0 \times 3) + A_X \\ 214 &= A_X \end{aligned}$$

ب) وفق مبدأ حفظ العدد الذري:

$$\begin{aligned} Z_{\text{اليورانيوم}} &= Z_{\text{ألفا}} + Z_{\text{بيتا السالبة}} + Z_X \\ 92 &= (2 \times 6) + ((-1) \times 3) + Z_X \\ 92 &= 12 - 3 + Z_X \\ 83 &= Z_X \end{aligned}$$

وعليه تكون النواة الناتجة هي: ${}_{83}^{214}\text{X}$.

تمر نواة البروتكتينيوم $^{234}_{91}\text{Pa}$ في إحدى سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي بسلسلة اضمحلالات إشعاعية لتنتج نواة الرصاص $^{210}_{82}\text{Pb}$ كما في المعادلة النووية الآتية:



حيث (س): عدد دقائق ألفا المنبعثة، (ص): عدد دقائق بيتا السالبة المنبعثة أو عدد جسيمات ضد النيوترينو. احسب قيمة (س)، و(ص) في السلسلة السابقة.

الحل:

نبدأ بإيجاد عدد دقائق ألفا المنبعثة، وذلك بتطبيق مبدأ حفظ العدد الكتلي على معادلة الاضمحلال على النحو الآتي:

$$A_{\text{البروتكتينيوم}} = A_{\text{الرصاص}} + A_{\text{ألفا}} + A_{\text{بيتا السالبة}}$$

$$234 = 210 + (4 \times \text{س}) + (\text{ص} \times 0)$$

$$\text{س} = 6 \text{ دقائق ألفا.}$$

ولإيجاد عدد دقائق بيتا السالبة نطبق مبدأ حفظ العدد الذري على معادلة الاضمحلال على النحو الآتي:

$$Z_{\text{البروتكتينيوم}} = Z_{\text{الرصاص}} + Z_{\text{ألفا}} + Z_{\text{بيتا السالبة}}$$

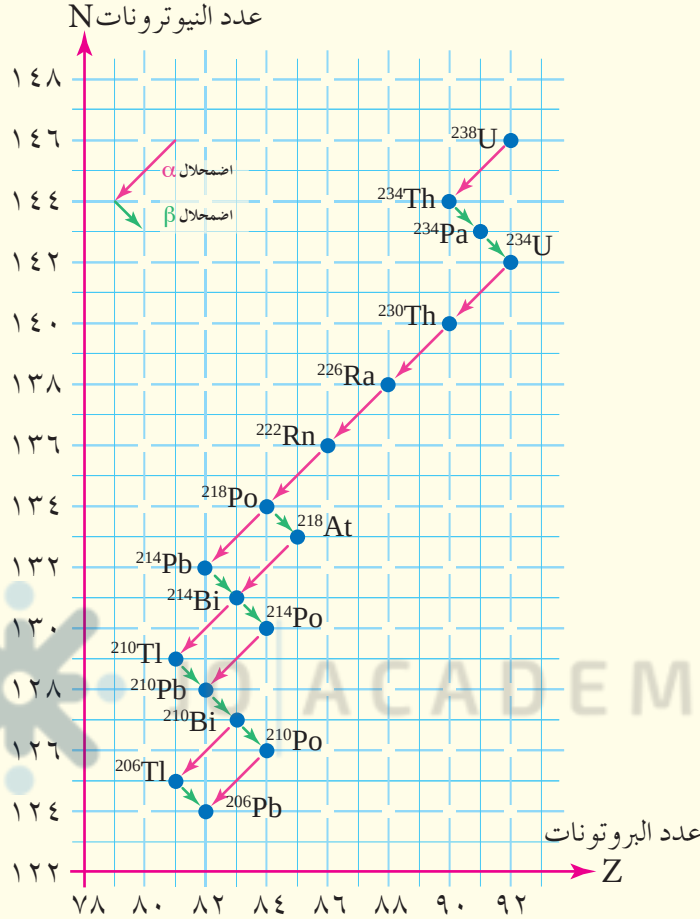
$$91 = 82 + (2 \times 6) + (\text{ص} \times (-1))$$

$$\text{ص} = 3 \text{ دقائق بيتا السالبة.}$$

١) وضح المقصود بسلسلة الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي.

٢) يوضح الشكل (٨-١٠) إحدى سلاسل الاضمحلال الإشعاعي الطبيعي، مستعيناً بالشكل

أجب عما يأتي:



الشكل (٨-١٠): سؤال (٢).

أ) ما اسم هذه السلسلة؟

ب) أي نظائر الرصاص الناتجة الآتية مستقر ($^{214}_{82}\text{Pb}$ ، $^{210}_{82}\text{Pb}$ ، $^{206}_{82}\text{Pb}$)؟ ولماذا؟

ج) كم عدد كل من دقائق ألفا ودقائق بيتا السالبة المنبعثة نتيجة اضمحلال نواة اليورانيوم

$^{238}_{92}\text{U}$ إلى نواة بولونيوم $^{218}_{84}\text{Po}$ ؟

د) اكتب معادلة نووية موزونة تعبر عن الاضمحلالات المذكورة في الفرع السابق.

هـ) ما العدد الكتلي والعدد الذري للنواة الناتجة من سلسلة تحولات تبدأ بنواة الراديوم

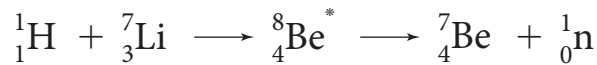
$^{226}_{88}\text{Ra}$ تنبعث فيها (٥) دقائق ألفا و (٣) دقائق بيتا السالبة؟

تتحول النواة المستقرة غالبًا إلى نواة مشعة عند إحداث أي تغيير في مكوناتها، وتسمى العملية التي يتم فيها إحداث تغيير في مكونات نواة ما **التفاعل النووي الصناعي**، ولإحداث تفاعل نووي بين نواة وجسيم يتم تسريع الجسيم (القذيفة) باستخدام أجهزة خاصة يطلق عليها اسم المسارعات النووية، تكسب القذيفة طاقة حركية كافية تمكنها من اختراق النواة، وإحداث التحولات النووية، ويمكن التعبير عن التفاعل النووي بالمعادلة النووية الآتية:



حيث (a): الجسيم القذيفة، و (X): النواة الهدف، و $(C.N)^*$: النواة المركبة (**Compound Nucleus**)، و (Y): النواة الناتجة، و (b): الجسيم الناتج.

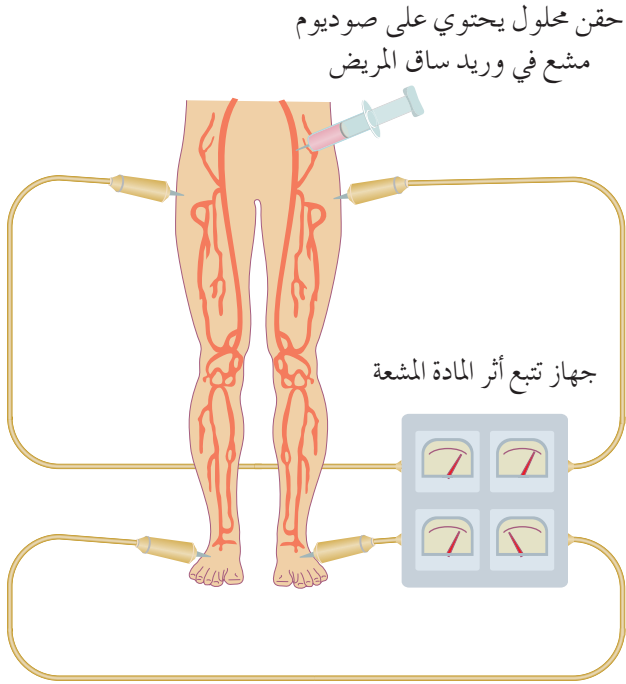
تمتص النواة الهدف القذيفة فتتشكل نواة مركبة تكون في حالة إثارة وعدم استقرار، ثم ما لبثت النواة المركبة أن تضمحل في مدة زمنية قصيرة جدًا؛ لذلك تعد النواة المركبة حالة انتقالية مؤقتة تتحلل سريعًا في التفاعل النووي، ويسمى الإشعاع الصادر عنها في هذه الحالة إشعاعًا نوويًا صناعيًا، ومن الأمثلة على القذائف في التفاعلات النووية: البروتون (${}^1_1\text{H}$)، دقائق ألفا (${}^4_2\text{He}$)، نواة الديتيريوم (${}^2_1\text{H}$). ومن أفضل القذائف النووية المستخدمة في إنتاج النظائر المشعة النيوترون (${}^1_0\text{n}$)؛ لأنه متعادل كهربائيًا، فلا يتفاعل مع النواة تجاذبًا أو تنافرًا. وتوضح المعادلات النووية الآتية بعض الأمثلة على التفاعلات النووية التي تنتج إشعاعات نووية صناعية:



وتكمن أهمية التفاعلات النووية الصناعية في إمكانية تحويل عنصر معين إلى عنصر آخر، وإنتاج النظائر المشعة، وكذلك الحصول على جسيمات أو أشعة ذات طاقة عالية. ولقد اتسع نطاق استخدام الأشعة النووية الصناعية والنظائر المشعة في الكثير من مجالات الحياة المختلفة ومنها المجال الطبي ومن الأمثلة على ذلك:

■ (١-٦-٨) التعقب (Tracing)

يتم الكشف عن وجود الانسدادات في الأوعية الدموية أو غيابها عن طريق تعقب الإشعاع في جسم المريض؛ إذ يحقن محلول يحتوي على صوديوم مشع في وريد ساق المريض، لمعرفة مدى نشاط الدورة الدموية لديه، لاحظ الشكل (٨-١١)، ويستطيع الطبيب باستخدام أجهزة خاصة أن يقتفي أثر المادة المشعة ويعرف ما إذا كان دم المريض ينساب بشكل طبيعي في الأوعية الدموية أم لا، ليتم تحديد موقع الانسداد بدقة ووصف العلاج اللازم.



الشكل (٨-١١): أحد استخدامات تعقب الإشعاع في الطب.

■ (٢-٦-٨) العلاج بالإشعاع (RadioTherapy)

يمكن أن يكون الإشعاع النووي مفيداً في الدرجة الأولى في قتل الخلايا السرطانية ذات الانقسامات السريعة، فعندما يتركز الورم في منطقة محددة من الجسم يتم القضاء عليه بتوجيه



الشكل (٨-١٢): جهاز علاج السرطان بالإشعاع.

حزمة ضيقة عالية التركيز من أشعة غاما نحو النسيج السرطاني، وتستخدم أشعة غاما المنبعثة من أحد النظائر المشعة، مثل الكوبالت $^{60}_{27}\text{Co}$ ، ويمكن استخدام الأشعة السينية أو البروتونات أو النيوترونات لهذا الأمر، وذلك باستخدام أجهزة خاصة كما في الشكل (٨-١٢).

وبالرغم من المنافع الكثيرة التي نجنيها من الأشعة النووية عند العلاج بها؛ إلا أن لها أضراراً وأخطاراً يصعب تجاهلها؛ لذلك عند العلاج بالإشعاع لا بدّ أولاً من تحديد نوع الإشعاع وطاقته والعضو المعرض له (الجلد، العظام، الكبد،...) بالإضافة إلى زمن التعرض للإشعاع ومدى قرب الجسم من مصدر الإشعاع لكي يكون الضرر أقل ما يمكن. ويعد الإشعاع مصدر خطر حقيقي على صحة الإنسان تبعاً لقدرة الإشعاع على التأين؛ فإذا كان مصدر الإشعاع داخل الجسم كأن يتناول الشخص طعاماً ملوثاً بالإشعاع، تكون دقائق ألفا في هذه الحالة أكثر خطورة من غيرها؛ إذ ينتج من عملية التأين التي تحدثها دقائق ألفا (α) تفاعلات كيميائية تؤدي إلى إتلاف خلايا الجسم وأنسجته وتحويل الخلايا السليمة التي تعرضت لها إلى خلايا سرطانية، وحدوث طفرات وتغيرات في المادة الوراثية قد تؤدي إلى ولادة أطفال مشوهين، أما إذا كان مصدر الإشعاع خارج الجسم فإن أشعة غاما تعد الأخطر لقدرتها العالية على النفاذ.

مراجعة (٨-٦)

- ١ وضع المقصود بالتفاعل النووي الصناعي.
- ٢ ما التغيرات التي تطرأ على النواة الهدف عند التحامها بقذيفة في أي تفاعل نووي؟
- ٣ حدد مع بيان السبب الأشعة النووية الأكثر خطورة على الإنسان عند التعرض لها:
 - أ من مصدر خارج جسم الإنسان.
 - ب من مصدر داخل جسم الإنسان.

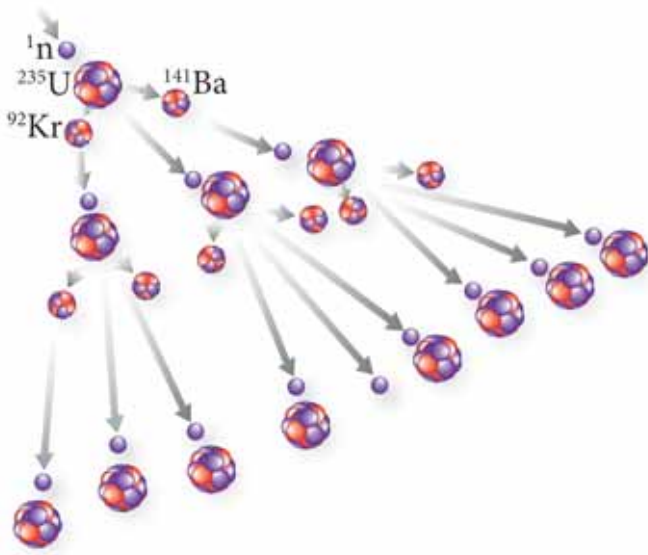
■ (١-٧-٨) الانشطار النووي (Nuclear Fission)

يعد الانشطار النووي أهم التفاعلات النووية الصناعية، ويعرف **الانشطار النووي** بأنه تفاعل نووي يحدث فيه انقسام نواة ثقيلة، عند قذفها بنيوترون، إلى نواتين متوسطتي الكتلة، ويصاحب ذلك نقص في الكتلة يتحول إلى طاقة وفقاً لمعادلة أينشتاين في تكافؤ الطاقة والكتلة. ويبدأ الانشطار النووي عندما تُقذف نواة ثقيلة كاليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ بنيوترون بطيء فتصبح في حالة إثارة لزمّن قصير جداً؛ ما يجعلها نشطة إشعاعياً، فتتنشط إلى نواتين مختلفتين منتجة نيوترونين أو ثلاثة نيوترونات سريعة مع كمية هائلة من الطاقة، كما في أحد الاحتمالات الآتية لتفاعل الانشطار:



وتكمن أهمية هذا التفاعل في كمية الطاقة الكبيرة المتحررة منه؛ إذ إن انشطار (١) كغ من اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ ينتج منه طاقة تبلغ $(٥,٣٢ \times ١٠^{٢٦})$ مليون إلكترون فولت، وهذه الطاقة تكفي لتشغيل مصباح قدرته (١٠٠) واط لمدة (٣٠٠٠٠) سنة تقريباً؛ وهذا ما حدا بالعلماء للاستفادة من هذه الطاقة في النواحي المختلفة في الحياة.

تتمكن النيوترونات الناتجة من انشطار نواة اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ من شطر نوّى أخرى من اليورانيوم



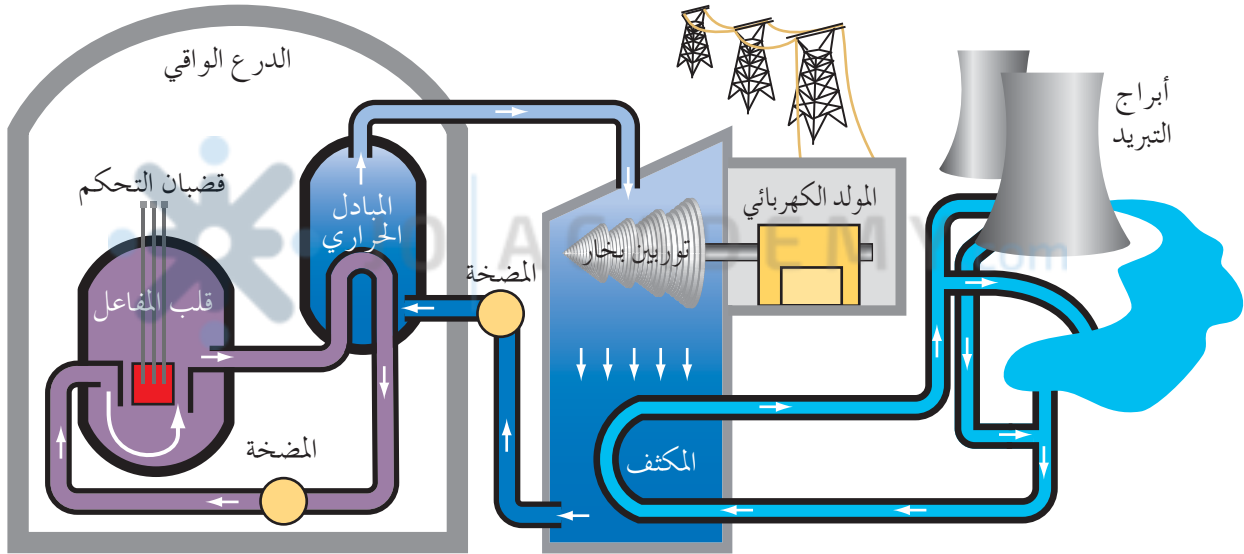
$^{235}_{92}\text{U}$ في كتلة من اليورانيوم، وبذا يقود كل تفاعل انشطار نووي إلى انشطارات نووية أخرى ويسمى تتابع انشطار النوى الثقيلة مثل اليورانيوم ($^{235}_{92}\text{U}$) نتيجة قذفها بنيوترونات تنبعث من نوى يورانيوم انشطرت سابقاً **التفاعل النووي المتسلسل (Nuclear Chain Reaction)**. ويوضح الشكل (٨-٣) التفاعل المتسلسل الذي يحدث عند قذف كتلة من اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ بنيوترون بطيء.

الشكل (٨-٣): التفاعل المتسلسل.

ويجب إبطاء سرعة النيوترونات الناتجة من كل انشطار حتى تتمكن من شطر نوى اليورانيوم الأخرى، ولضمان استمرار التفاعل المتسلسل يجب منع تسرب النيوترونات الناتجة من الانشطار خارج كتلة اليورانيوم، ويسمى الحد الأدنى من كتلة اليورانيوم اللازم لمنع تسرب النيوترونات وإدامة حدوث التفاعل المتسلسل **الكتلة الحرجة (Critical Mass)**.

■ (٢-٧-٨) المفاعل النووي (Nuclear Reactor)

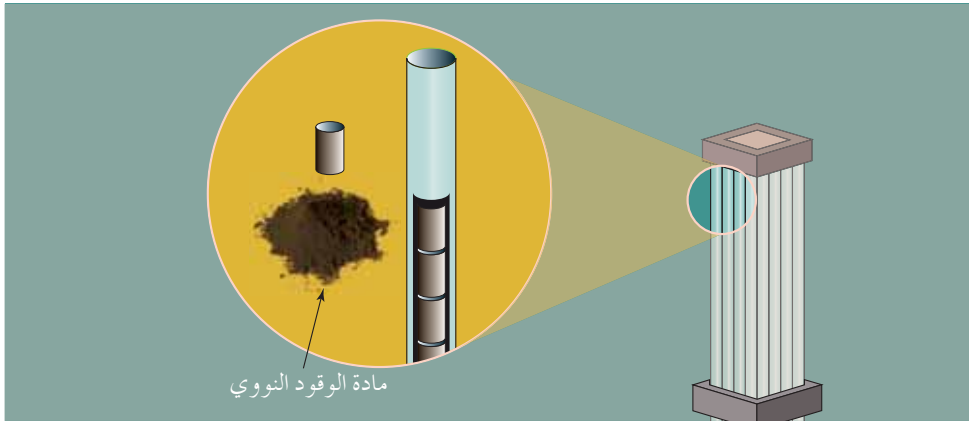
يسمى النظام الذي يعمل على توفير الظروف المناسبة لاستمرار تفاعل الانشطار النووي والسيطرة عليه **المفاعل النووي**، ويوجد عدة أنواع من المفاعلات تبعاً لطريقة التبريد المستخدمة فيها، ويبين الشكل (٨-٤١) أجزاء مفاعل الماء المضغوط.



الشكل (٨-٤١): أجزاء مفاعل الماء المضغوط.

١ قلب المفاعل، ويتكون من:

أ مادة الوقود النووي (يورانيوم ^{235}U أو بلوتونيوم ^{239}Pu): تُحَضَّر في صورة أقراص توضع فوق بعضها داخل أنابيب طويلة مشكلة ما يعرف بحزم الوقود النووي التي تظهر في الشكل (٨-١٥).



الشكل (٨-١٥): أقراص وحزم الوقود النووي.

ب) **قضبان التحكم**: قضبان من الكادميوم تتحكم في سرعة التفاعل المتسلسل وتعمل آلياً، ذات كفاءة عالية في امتصاص النيوترونات، حيث تفصل بين أنابيب حزم الوقود النووي فتحات مخصصة لإدخال عدد مناسب من قضبان التحكم لكي تمتص بعض النيوترونات عند الحاجة إلى إبطاء عملية الانشطار وإبقائها ضمن المعدل المطلوب، وتسمى هذه العملية التحكم.

ج) **المواد المهدئة للنيوترونات**: مواد ذات أعداد كتلية صغيرة كالماء العادي H_2O توضع في طريق النيوترونات السريعة الناتجة من تفاعلات الانشطار لتصطدم بها النيوترونات وتقل سرعتها، فتصبح قادرة على إحداث تفاعل انشطار جديد، وتعرف هذه العملية بالتهديئة، وفي أنواع أخرى من المفاعلات تستخدم مواد مهدئة مختلفة كالغرافيت والماء الثقيل D_2O .

٢) **المبادل الحراري**: يستخدم الماء الساخن جداً والمضغوط القادم من قلب المفاعل، في تسخين الماء الموجود في المبادل الحراري لإنتاج البخار اللازم لإدارة العنفات (التوربينات) المتصلة بمولدات الطاقة الكهربائية.

٣) **الدروع الواقية**: يحيط بقلب المفاعل وبالمبادل الحراري للوقاية من التسرب الإشعاعي.

٤) **المولدات الكهربائية**: تحول الطاقة الحرارية والحركية لبخار الماء إلى طاقة كهربائية.

٥) **المكثف**: يعمل على تحويل بخار الماء الفائض إلى ماء.

٦) **أبراج التبريد**: تعمل على تزويد المكثف والمبادل الحراري بالماء اللازم.

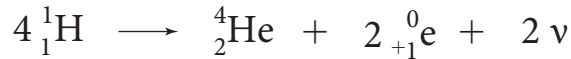
يبدأ تشغيل المفاعل برفع قضبان التحكم ببطء من قلب المفاعل، وعندئذ يبدأ التفاعل المتسلسل، وتظهر الطاقة المتحررة من تفاعلات الانشطار على شكل طاقة حرارية تعمل على تسخين الماء، وإنتاج البخار اللازم لإدارة العنفات (التوربينات) المتصلة بمولدات الطاقة الكهربائية.

وتكمن خطورة التعامل مع المفاعل النووي بفقدان السيطرة عليه أو انفجاره، لذا يجب مراعاة أمور قبل إنشاء المفاعل النووي منها: اختيار أماكن نائية بعيدة عن التجمعات السكانية، وفي الوقت ذاته قريبة من مصادر وافرة للمياه، وضرورة وجود هيئات دولية تضبط بناء المفاعلات وتشغيلها، وتعنى برقابة سلامة تصريف نفايات المواد المشعة عند استبدال وقود المفاعل، وتعنى أيضاً بفحص الحاويات المستخدمة في نقل الوقود النووي باستمرار.

■ (٣-٧-٨) الاندماج النووي (Nuclear Fusion)

درست في منحنى (طاقة الربط النووية لكل نيوكليون - العدد الكتلي) أن طاقة الربط النووية لكل نيوكليون للنوى الخفيفة تكون أقل منها للنوى المتوسطة المستقرة؛ وتحت ظروف معينة يمكن أن تندمج بعض النوى الخفيفة معاً مثل الهيدروجين لإنتاج نوى أثقل، ويصاحب ذلك نقص في الكتلة، ويظهر على شكل طاقة عالية جداً، وتعرف عملية اتحاد نواتين خفيفتين لتكوين نواة جديدة كتلتها أقل من مجموع كتلتيهما بالاندماج النووي.

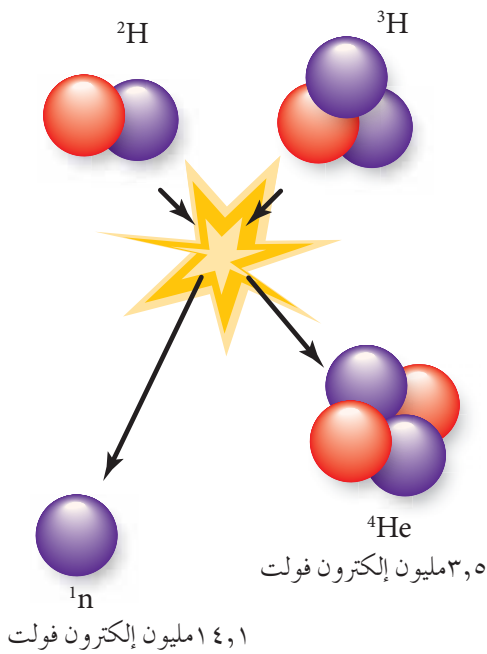
ويشكل الهيدروجين معظم كتلة النجوم؛ لذا تستمد بعض النجوم ومنها الشمس طاقتها من سلسلة تفاعلات اندماج رئيسية تعرف بدورة بروتون - بروتون يكون ناتجها النهائي تجمع أربعة بروتونات لتشكيل نواة هيليوم ${}^4_2\text{He}$ كما في التفاعل الآتي:



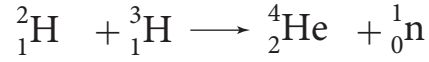
وبما أن النوى الداخلة في تفاعل الاندماج جميعها موجبة الشحنة وصغيرة الحجم فإن رفع درجة حرارتها إلى ما يقارب (١٠^٧) كلفن تحت ضغط هائل شرط أساسي لاندماجها؛ حيث تزيد درجة الحرارة من سرعة النوى؛ فتزداد طاقتها الحركية، وتمكنها من الاقتراب كثيراً من بعضها والتغلب على قوة التنافر الكهربائية، فيتم الاندماج النووي؛ لذلك يسمى هذا التفاعل التفاعل النووي الحراري.

ويصعب حالياً إجراء تفاعلات الاندماج النووي في المختبرات العلمية، إلا أن خير مثال على حدوثها، التفاعلات الحاصلة في باطن الشمس والنجوم؛ حيث تتوافر درجات الحرارة العالية والضغط الهائل اللازمان لحدوث تفاعل الاندماج النووي.

وتفوق الطاقة لكل نيوكليون الناتجة من تفاعلات الاندماج أضعاف مضاعفة الطاقة لكل نيوكليون الناتجة من تفاعلات الانشطار؛ لذا يسعى العلماء لإنتاج الطاقة على سطح الأرض من دمج نظيري



الهيدروجين: الديتيريوم ^2_1H والتريتيوم ^3_1H كما في الشكل (٨-١٦)، حيث يكون مجموع كتل النوى الداخلة في التفاعل أكبر من مجموع كتل النوى والجسيمات الخارجة من التفاعل، وتوضح المعادلة النووية الآتية هذا التفاعل:



وللاستفادة من هذا التفاعل يتعين توفير مفاعل نووي حراري لم يخرج بعد عن حيز التجريب، إذ لا تزال أمامه الكثير من العقبات بالرغم من تغلب العلماء على بعض منها، ونأمل أن تكون أنت مستقبلاً أحد من يتغلب على ما تبقى منها.

مراجعة (٨-٧)

١- وضح المقصود بكل من: الانشطار النووي، والتفاعل المتسلسل، والمفاعل النووي، والاندماج النووي.

٢- اذكر: أ) شرطي حدوث التفاعل المتسلسل. ب) أجزاء مفاعل الماء المضغوط.

٣- فسر العبارات الآتية:

أ) تصنع قضبان التحكم المستخدمة في المفاعل النووي من الكادميوم.

ب) من الأمور الواجب مراعاتها قبل إنشاء المفاعل النووي ضرورة إشراف هيئات دولية.

٤- كيف تضبط كل من الأمور الآتية في المفاعل النووي:

أ) منع تسرب النيوترونات؟

ب) التحكم في سرعة التفاعل المتسلسل؟

ج) إبطاء سرعة النيوترونات الناتجة من تفاعلات الانشطار؟

٥- قارن بين تفاعلي الانشطار والاندماج النوويين من حيث الوقود المستخدم، والطاقة الناتجة، وشروط حدوث كل تفاعل.

١ ضع دائرة حول رمز الإجابة الصحيحة في كل مما يأتي:

١ أي العبارات الآتية تصف الذرتين $(^{63}_{29}\text{X})$ ، $(^{67}_{33}\text{Y})$ وصفًا صحيحًا؟

أ $N_y < N_x$ ب $N_y > N_x$

ج $N_y = N_x$ د $Z_y = Z_x$

٢ وظيفة الغرافيت في المفاعل النووي هي:

أ امتصاص بعض النيوترونات. ب إيقاف النيوترونات.

ج زيادة سرعة النيوترونات. د إبطاء سرعة النيوترونات.

٣ أكمل المعادلة النووية الآتية $(^{76}_{33}\text{As} \rightarrow ^{76}_{34}\text{Se} + ^0_{-1}\text{e} + \dots)$. ملء الفراغ بأحد الإشعاعات الآتية:

أ نيوتريينو. ب ضدنيوتريينو. ج غاما. د ألفا.

٤ لكي يتحول العنصر ^A_ZX إلى العنصر $^A_{Z+1}\text{Y}$ تلقائيًا لا بد للعنصر X من أن:

أ يكتسب نيوترونًا. ب يبعث دقيقة ألفا.

ج يبعث أشعة غاما. د يبعث دقيقة بيتا السالب وضديد النيوتريينو.

٥ القوى التي تنشأ بين بروتون وبروتون داخل النواة هي:

أ جذب نووي فقط. ب تنافر كهربائي فقط.

ج جذب نووي وتنافر كهربائي. د تنافر نووي وجذب كهربائي.

٦ في المعادلة الآتية $(^{208}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{204}_{82}\text{Pb} + ^A_Z\text{X})$ ، القيم الصحيحة لكل من (Z, A) على الترتيب:

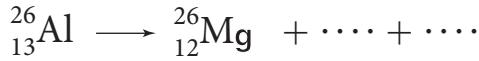
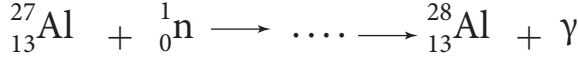
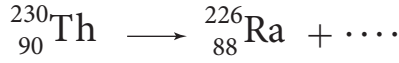
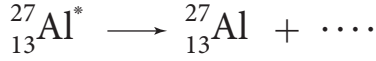
أ (٤، ٢) ب (٢، ٤) ج (٤، ٤) د (٢، ٢)

٧ يعد البوزيترون المنبعث في المعادلة النووية الآتية $(^{64}_{29}\text{Cu} \rightarrow ^{64}_{28}\text{Ni} + ^0_{+1}\text{e} + \nu)$ ناتج تحليل:

أ نيوترون من نواة النيكل $(^{64}_{28}\text{Ni})$ ب بروتون من نواة النيكل $(^{64}_{28}\text{Ni})$

ج نيوترون من نواة النحاس $(^{64}_{29}\text{Cu})$ د بروتون من نواة النحاس $(^{64}_{29}\text{Cu})$

٢ أكمل المعادلات النووية الآتية بكتابة الرموز والأرقام المناسبة في كل فراغ:



٣ اذكر أهمية واحدة لكل من:

أ مقدار طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

ب قضبان التحكم في المفاعل النووي.

ج الكتلة الحرجة.

د المسارعات النووية.

ه نظير الكوبالت المشع $^{60}_{27}\text{Co}$

و عملية التعقب في الأوعية الدموية في المجال الطبي.

٤ يمكن للنواة (^A_ZX) أن تضمحل باعثة دقيقة ألفا أو دقيقة بيتا، وضح بالمعادلات النووية المناسبة

التغيرات التي تطرأ على هذه النواة، وذلك عندما تبعث:

أ دقيقة ألفا فقط.

ب دقيقة بيتا السالبة فقط.

٥ في التفاعل النووي الآتي: $^4_2\text{He} + ^{14}_7\text{N} \longrightarrow ^{18}_9\text{F}^* \longrightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$

أ ما القذيفة المستخدمة؟

ب حدد النواة المركبة في التفاعل.

ج أي النواتج يمتلك أكبر طاقة حركية؟

د ما مبادئ حفظ الكميات الفيزيائية التي يجب أن تتحقق في هذا التفاعل؟

٦ احسب:

أ) الطاقة اللازمة لفصل نواة النيكل $^{60}_{28}\text{Ni}$ إلى مكوناتها، علمًا بأن كتلة نواة النيكل تساوي (٥٩,٩٣٠٨) و.ك.ذ.

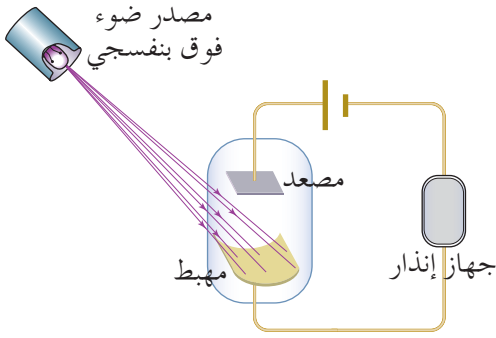
ب) طاقة الربط النووية لكل نيوكليون في نواة الليثيوم ^8_3Li . إذا علمت أن فرق الكتلة بين كتلة نواة الليثيوم ومجموع كتل مكوناتها يساوي ($\Delta K = 0,0628$) و.ك.ذ.

٧ قارن بين دقائق ألفا ودقائق بيتا وأشعة غاما. عملء الجدول الآتي:

أوجه المقارنة	نوع الإشعاع	دقائق ألفا	دقائق بيتا	أشعة غاما
الطبيعة	جسيمات			
الشحنة			إما سالبة (الإلكترون) أو موجبة (البوزيترون)	
الكتلة			تساوي كتلة الإلكترون وأقل من كتلة ألفا	
القدرة على النفاذ			كبيرة	
السرعة				تساوي سرعة الضوء
القدرة على التأين		كبيرة نسبيًا		

٨ إذا علمت أن كتلة نواة الأكسجين $^{16}_8\text{O}$ تساوي (١٥,٩٩٤٩) و.ك.ذ، وكتلة نواة الفضة $^{107}_{47}\text{Ag}$ تساوي (١٠٦,٩٠٥١) و.ك.ذ. بين أي النواتين أكثر استقرارًا، مدعمًا إجابتك رياضياً.

٩ تمر نواة اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ في الطبيعة بسلسلة اضمحلال، فإذا كانت أول خمسة اضمحلالات على الترتيب لها: ($\alpha, \beta^-, \alpha, \beta^-, \alpha$)، جد العدد الذري والعدد الكتلي للنواة الناتجة في نهاية هذه الاضمحلالات.



١ يوضح الشكل رسماً تخطيطياً لأحد أجهزة الإنذار ضد السرقة، الذي يعد أحد التطبيقات العملية على الظاهرة الكهروضوئية. يصدر عن الجهاز صوت تحذيري إذا حدث قطع في مسار الأشعة فوق البنفسجية، ادرس الشكل، وأجب عن الأسئلة الآتية:

أ ما وظيفة كل من المهبط والمصعد في الخلية الكهروضوئية؟

ب صف ما يحدث في الخلية الكهروضوئية عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية على المهبط، وعند حدوث قطع في مسار الأشعة.

ج هل يتأثر عمل الجهاز إذا زاد تردد الأشعة الساقطة على المهبط أو زادت شدتها؟ وضح إجابتك.

د إذا كان اقتران الشغل لفلز المهبط (٢) إلكترون فولت، فأجب عما يأتي:

■ ما المقصود باقتران الشغل للفلز؟

■ إذا كانت الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة تساوي ٣ إلكترون فولت، فاحسب تردد الأشعة فوق البنفسجية.

٢ يشير بور في أحد فروضه المتعلقة بذرة الهيدروجين إلى أن الإلكترون يشع طاقة أو يمتصها إذا انتقل من مستوى طاقة (مدار) إلى مستوى طاقة آخر فقط، فإذا كان الإلكترون موجود في المدار الثالث ($n = 3$) عند لحظة معينة فأجب عن الأسئلة الآتية:

أ يمتص إلكترون ذرة الهيدروجين أو يشع مقادير محددة من الطاقة. فسر ذلك.

ب ما أقل طاقة وما أكبر طاقة يمكن أن يشعها الإلكترون؟

ج جد نصف قطر المدار الثالث.

د احسب للإلكترون في المدار الثالث كل من:

■ الزخم الخطي

■ الزخم الزاوي

■ طول موجة دي بروي المصاحبة له

■ السرعة

٣ إحدى الفرضيات المهمة في فيزياء الكم "الطبيعة المزدوجة لكل من الإشعاع والمادة":

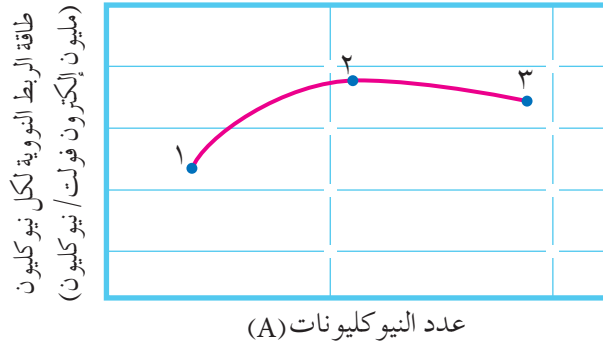
أ بين ما تعنيه هذه العبارة.

ب اذكر دليلاً عملياً يدعم سلوك الإشعاع بوصفه جسيمًا، وآخر يدعم سلوك المادة بوصفها موجة.

٤ إذا علمت أن طاقة الربط النووية لنواة النتروجين ${}^{14}_7\text{N}$ تساوي (١٠٨) مليون إلكترون فولت:

أ وضح المقصود بطاقة الربط النووية.

ب احسب كتلة نواة النتروجين.



٥ يوضح الشكل المجاور التمثيل البياني للعلاقة

بين عدد النيوكليونات، وطاقة الربط النووي

لكل نيوكليون، وتشير الأرقام (٣، ٢، ١)

على المنحنى في الشكل إلى ثلاثة نظائر:

أ وضح المقصود بالنظائر.

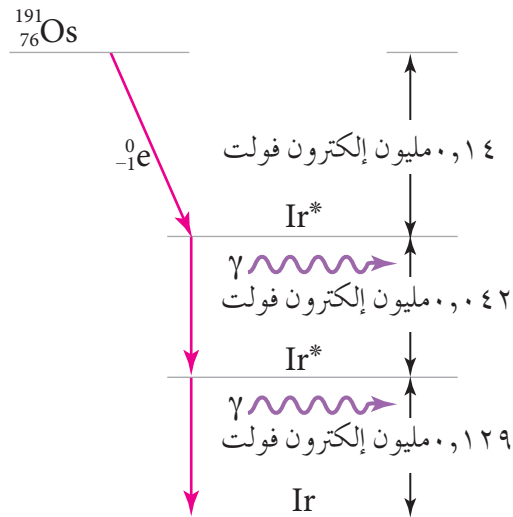
ب رتب تنازلياً هذه النظائر وفق الطاقة اللازمة لفصل نيوكليون واحد من نواة كل منها.

٦ تضمحل نواة أوزميوم ${}^{191}_{76}\text{Os}$ باعثة دقيقة بيتا سالبة طاقتها (٠,١٤) مليون إلكترون فولت في

المرحلة الأولى لاحظ الشكل، ثم أشعة غاما طاقتها ٠,٠٤٢ مليون إلكترون فولت في المرحلة

الثانية، ثم أشعة غاما طاقتها (٠,١٢٩) مليون إلكترون فولت في المرحلة الثالثة لكي تصل إلى

حالة الاستقرار.



تأمل الشكل ثم أجب عما يأتي:

أ جد العدد الذري والعدد الكتلي للنواة الناتجة

المستقرة وفق المعادلة الآتية.



ب ما الطاقة التي يجب أن تبعثها نواة Os في مرحلة

واحدة حتى تستقر؟

المفاهيم والمصطلحات

المصطلح	باللغة الإنجليزية
اقتران الشغل	(Work Function)
أقل طاقة يمتلكها فوتون الضوء تلزم لتحرير إلكترون من سطح الفلز من غير إكسابه طاقة حركية.	
الاندماج النووي	(Nuclear Fusion)
تفاعل نووي تتحد فيه نواتان خفيفتان لتكوين نواة جديدة كتلتها أقل من مجموع كتلتيهما.	
الانشطار النووي	(Nuclear Fission)
تفاعل نووي يحدث فيه انقسام نواة ثقيلة عند قذفها بنيوترون إلى نواتين متوسطتي الكتلة، ويصاحب ذلك نقص في الكتلة يتحول إلى طاقة.	
التدفق المغناطيسي	(Magnetic flux)
عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق سطحًا ما عمودياً عليه.	
تردد العتبة	(Threshold Frequency)
أقل تردد للضوء يلزم لتحرير إلكترونات من سطح فلز.	
التفاعل النووي المتسلسل	(Nuclear Chain Reaction)
تتابع انشطار النوى الثقيلة مثل اليورانيوم ($^{235}_{92}\text{U}$) نتيجة قذفها بنيوترونات تنبعث من نوى يورانيوم انشطرت سابقاً.	
تيار الإشباع	(maximum current)
التيار الكهربائي الناتج من حركة الإلكترونات الضوئية جميعها المتحررة من المهبط والواصل إلى المصعد.	
التيار الكهربائي	(Electric Current)
كمية الشحنة التي تعبر مقطع موصل في وحدة الزمن.	
جهد القطع	(Cutoff Potential)
فرق الجهد الكهربائي العكسي اللازم لجعل التيار الكهربائي صفراً، أو فرق الجهد الكهربائي العكسي اللازم لإيقاف أسرع الإلكترونات الضوئية.	
الجهد الكهربائي عند نقطة	(Electric Potential)
طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنة موضوعة عند تلك النقطة في مجال كهربائي.	
الحث الذاتي	(Self-Inductance)
تولّد قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية في ملف بسبب تغير التدفق المغناطيسي من الملف ذاته.	
السرعة الانسيابية	(Drift Velocity)
متوسط سرعة الإلكترونات الحرة داخل الموصل عندما تنساق بعكس اتجاه المجال الكهربائي المؤثر فيها.	
سطح تساوي الجهد	(Equipotential Surface)
السطح الذي يكون الجهد عند نقاطه جميعها متساوياً ويساوي قيمة ثابتة.	

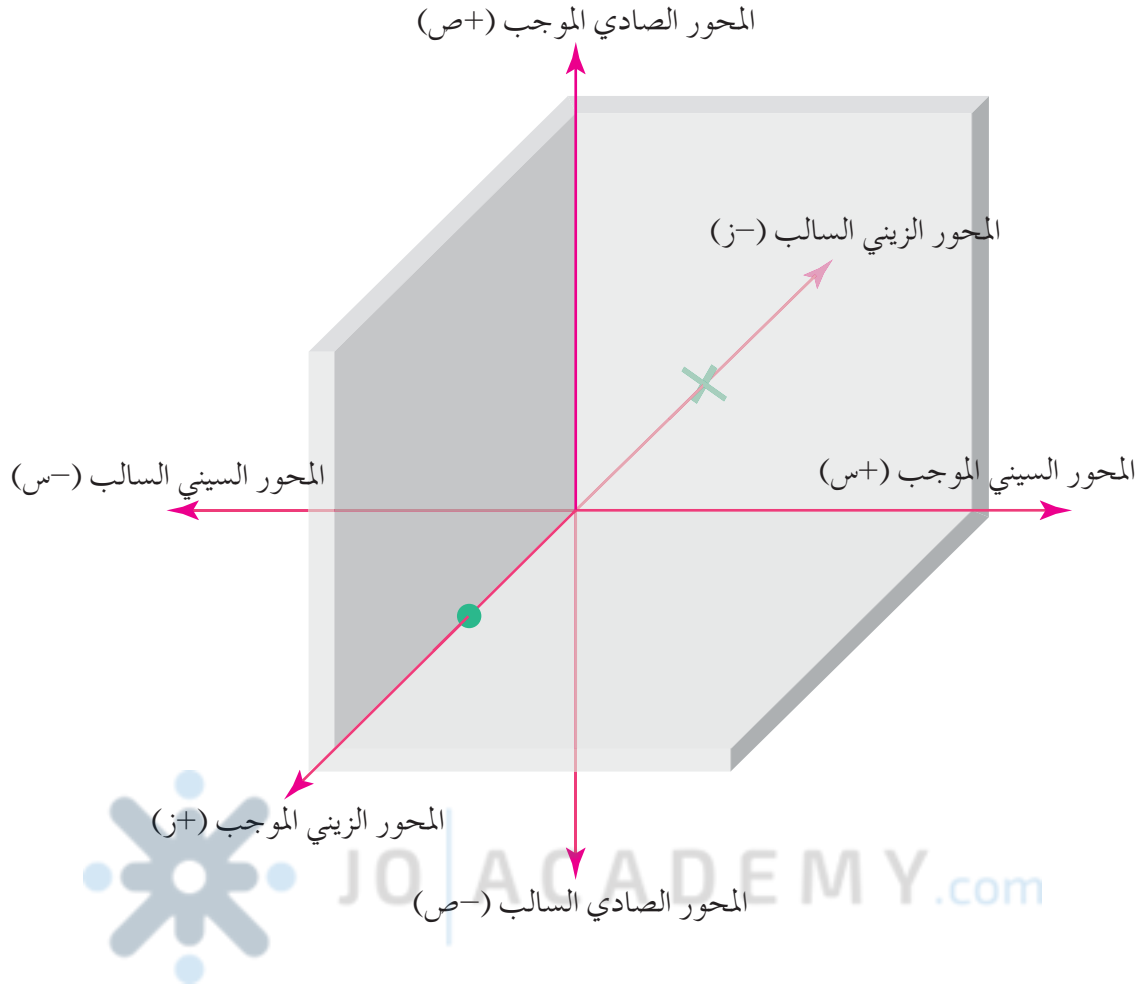
طاقة الربط النووية	(Nuclear Binding Energy)
مقدار الطاقة الخارجية التي يجب أن تزود بها النواة لفصل مكوناتها عن بعضها نهائيًا.	
ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي	(Electromagnetic induction)
ظاهرة توليد التيار الحثي بسبب تغير التدفق المغناطيسي عبر ملف.	
الظاهرة الكهروضوئية	(Photoelectric Effect)
ظاهرة انبعاث إلكترونات من سطح فلز يتعرض لإشعاع كهرومغناطيسي عندما يكون تردد الإشعاع أكبر أو يساوي تردد العتبة للفلز.	
القدرة الكهربائية	(Electric Power)
الشغل المبذول (ش) لنقل شحنة بين نقطتين بينهما فرق في الجهد في وحدة الزمن (ز).	
القوة الدافعة الكهربائية	(Electromotive Force)
الشغل الذي تبذله البطارية لدفع وحدة الشحنات الموجبة من القطب السالب إلى القطب الموجب داخلها.	
القوة النووية	(Nuclear Force)
قوة تجاذب ذات مدى قصير جدًا تربط النيوكليونات المتجاورة في النواة.	
المجال الكهربائي عند نقطة	(Electric field)
القوة الكهربائية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة الموضوعة عند تلك النقطة.	
المجال المغناطيسي المنتظم	Uniform Magnetic Field
المجال المغناطيسي الثابت مقدارًا واتجاهًا عند نقاطه جميعها.	
المجال المغناطيسي عند نقطة	(The Magnetic Field)
القوة المغناطيسية المؤثرة في وحدة الشحنات الموجبة لحظة مرورها بسرعة (١) م/ث عموديًا على اتجاه المجال المغناطيسي عند تلك النقطة.	
المقاومة الكهربائية	(Electric Resistance)
إعاقة حركة الإلكترونات الحرة في الموصل عند مرور تيار كهربائي فيه.	
المقاومية	(Resistivity)
تساوي عددًا مقاومة جزء من المادة طوله (١) م ومساحة مقطعه (١) م ^٢ عند درجة حرارة محددة.	
المواسعة الكهربائية	(Capacitance)
النسبة بين كمية الشحنة المختزنة في المواسع وفرق الجهد بين طرفيه (صفيحتيه).	
الهنري	(Henry)
محاثة محث تتولد بين طرفيه قوة دافعة كهربائية حثية ذاتية مقدارها (١) فولت عندما يكون المعدل الزمني لتغير التيار المار فيه (١) أمبير/ث.	

جدول الاقترانات المثلثية

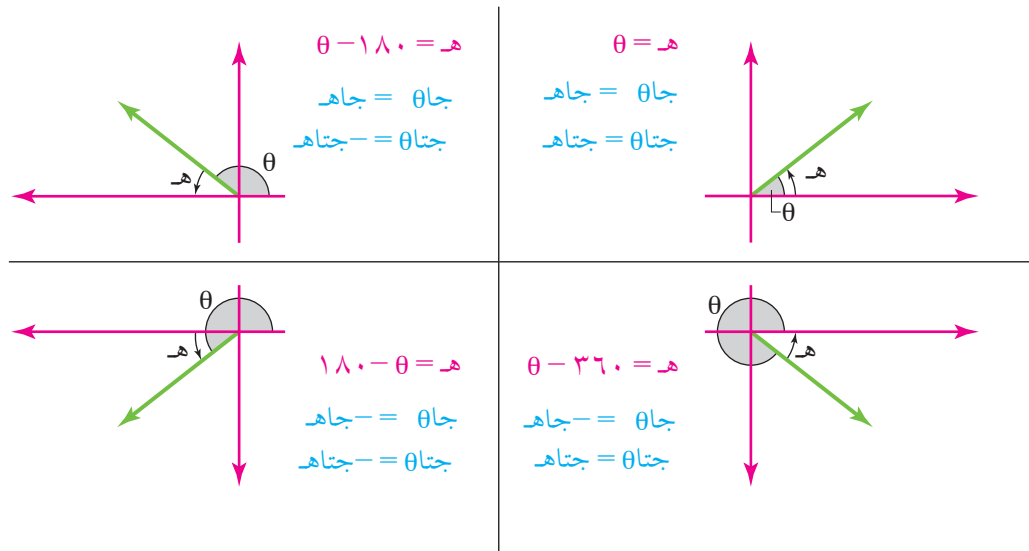
الزاوية	الجيب	جيب التمام	الظل
٤٦	٠,٧١٩	٠,٦٩٥	١,٠٣٦
٤٧	٠,٧٣١	٠,٦٨٢	١,٠٧٢
٤٨	٠,٧٤٣	٠,٦٦٩	١,١١٠
٤٩	٠,٧٥٦	٠,٦٥٦	١,١٥٠
٥٠	٠,٧٦٦	٠,٦٤٣	١,١٩٢
٥١	٠,٧٧٧	٠,٦٢٩	١,٢٣٥
٥٢	٠,٧٨٨	٠,٦١٦	١,٢٨٠
٥٣	٠,٧٩٩	٠,٦٠٢	١,٣٢٧
٥٤	٠,٨٠٩	٠,٥٨٨	١,٣٧٦
٥٥	٠,٨١٩	٠,٥٧٤	١,٤٢٨
٥٦	٠,٨٢٩	٠,٥٥٩	١,٤٨٣
٥٧	٠,٨٣٩	٠,٥٤٥	١,٥٤٠
٥٨	٠,٨٤٨	٠,٥٣٠	١,٦٠٠
٥٩	٠,٨٥٧	٠,٥١٥	١,٦٦٤
٦٠	٠,٨٦٦	٠,٥٠٠	١,٧٣٢
٦١	٠,٨٧٥	٠,٤٨٥	١,٨٠٤
٦٢	٠,٨٨٣	٠,٤٧٠	١,٨٨٠
٦٣	٠,٨٩١	٠,٤٥٤	١,٩٦٣
٦٤	٠,٨٩٩	٠,٤٣٨	٢,٠٥٠
٦٥	٠,٩٠٦	٠,٤٢٣	٢,١٤٥
٦٦	٠,٩١٤	٠,٤٠٧	٢,٢٤٦
٦٧	٠,٩٢١	٠,٣٩١	٢,٣٥٦
٦٨	٠,٩٢٧	٠,٣٧٥	٢,٤٧٥
٦٩	٠,٩٣٥	٠,٣٨٤	٢,٦٠٥
٧٠	٠,٩٤٠	٠,٣٤٢	٢,٧٤٨
٧١	٠,٩٤٦	٠,٣٢٦	٢,٩٠٤
٧٢	٠,٩٥١	٠,٣٠٩	٣,٠٧٨
٧٣	٠,٩٥٦	٠,٢٩٢	٣,٢٧١
٧٤	٠,٩٦١	٠,٢٧٦	٣,٤٨٧
٧٥	٠,٩٦٦	٠,٢٥٩	٣,٧٣٢
٧٦	٠,٩٧٠	٠,٢٤٢	٤,٠١١
٧٧	٠,٩٧٤	٠,٢٢٥	٤,٣٣١
٧٨	٠,٩٧٨	٠,٢٠٨	٤,٧٠٥
٧٩	٠,٩٨٢	٠,١٩١	٥,١٤٥
٨٠	٠,٩٨٥	٠,١٧٤	٥,٦٧١
٨١	٠,٩٨٨	٠,١٥٦	٦,٣١٤
٨٢	٠,٩٩٠	٠,١٣٩	٧,١١٥
٨٣	٠,٩٩٣	٠,١٢٢	٨,١٤٤
٨٤	٠,٩٩٥	٠,١٠٥	٩,٥١٤
٨٥	٠,٩٩٦	٠,٠٨٧	١١,٤٣
٨٦	٠,٩٩٨	٠,٠٧٠	١٤,٣٠
٨٧	٠,٩٩٨	٠,٠٥٢	١٩,٠٨
٨٨	٠,٩٩٩	٠,٠٣٥	٢٨,٦٤
٨٩	١,٠٠٠	٠,٠١٨	٥٧,٢٩
٩٠	١,٠٠٠	٠,٠٠٠	∞

الزاوية	الجيب	جيب التمام	الظل
صفر	٠,٠٠٠٠	١,٠٠٠	٠,٠٠٠
١	٠,٠٠١٨	١,٠٠٠	٠,٠٠١٨
٢	٠,٠٠٣٥	٠,٩٩٩	٠,٠٠٣٥
٣	٠,٠٠٥٢	٠,٩٩٩	٠,٠٠٥٢
٤	٠,٠٠٧٠	٠,٩٩٨	٠,٠٠٧٠
٥	٠,٠٠٨٧	٠,٩٩٦	٠,٠٠٨٨
٦	٠,٠١٠٥	٠,٩٩٥	٠,٠١٠٥
٧	٠,٠١٢٢	٠,٩٩٣	٠,٠١٢٣
٨	٠,٠١٣٩	٠,٩٩٠	٠,٠١٤١
٩	٠,٠١٥٦	٠,٩٨٩	٠,٠١٥٨
١٠	٠,٠١٧٤	٠,٩٨٥	٠,٠١٧٦
١١	٠,٠١٩١	٠,٩٨٢	٠,٠١٩٤
١٢	٠,٠٢٠٨	٠,٩٧٨	٠,٠٢١٣
١٣	٠,٠٢٢٥	٠,٩٧٤	٠,٠٢٣١
١٤	٠,٠٢٤٢	٠,٩٧٠	٠,٠٢٤٩
١٥	٠,٠٢٥٩	٠,٩٦٦	٠,٠٢٦٨
١٦	٠,٠٢٧٦	٠,٩٦١	٠,٠٢٨٧
١٧	٠,٠٢٩٢	٠,٩٥٦	٠,٠٣٠٦
١٨	٠,٠٣٠٩	٠,٩٥١	٠,٠٣٢٥
١٩	٠,٠٣٢٦	٠,٩٤٦	٠,٠٣٤٤
٢٠	٠,٠٣٤٢	٠,٩٤٠	٠,٠٣٦٤
٢١	٠,٠٣٥٨	٠,٩٣٤	٠,٠٣٨٤
٢٢	٠,٠٣٧٥	٠,٩٢٧	٠,٠٤٠٤
٢٣	٠,٠٣٩١	٠,٩٢١	٠,٠٤٢٥
٢٤	٠,٠٤٠٧	٠,٩١٤	٠,٠٤٤٥
٢٥	٠,٠٤٢٣	٠,٩٠٦	٠,٠٤٦٦
٢٦	٠,٠٤٣٨	٠,٨٩٩	٠,٠٤٨٨
٢٧	٠,٠٤٥٤	٠,٨٩١	٠,٠٥١٠
٢٨	٠,٠٤٧٠	٠,٨٨٣	٠,٠٥٣١
٢٩	٠,٠٤٨٥	٠,٨٧٥	٠,٠٥٥٤
٣٠	٠,٠٥٠٠	٠,٨٦٦	٠,٠٥٧٧
٣١	٠,٠٥١٥	٠,٨٥٧	٠,٠٦٠٤
٣٢	٠,٠٥٣٠	٠,٨٤٨	٠,٠٦٢٥
٣٣	٠,٠٥٤٥	٠,٨٣٩	٠,٠٦٥٠
٣٤	٠,٠٥٥٩	٠,٨٢٩	٠,٠٦٧٥
٣٥	٠,٠٥٧٤	٠,٨١٩	٠,٠٧٠٠
٣٦	٠,٠٥٨٨	٠,٨٠٩	٠,٠٧٢٧
٣٧	٠,٠٦٠٢	٠,٧٩٩	٠,٠٧٥٤
٣٨	٠,٠٦١٦	٠,٧٨٨	٠,٠٧٨١
٣٩	٠,٠٦٢٩	٠,٧٧٧	٠,٠٨١٠
٤٠	٠,٠٦٤٣	٠,٧٦٦	٠,٠٨٣٩
٤١	٠,٠٦٥٦	٠,٧٥٥	٠,٠٨٦٩
٤٢	٠,٠٦٦٩	٠,٧٣٤	٠,٠٩٠٠
٤٣	٠,٠٦٨٢	٠,٧٣١	٠,٠٩٣٢
٤٤	٠,٠٦٩٥	٠,٧١٩	٠,٠٩٦٦
٤٥	٠,٠٧٠٧	٠,٧٠٧	١,٠٠٠

التعبير عن الاتجاهات بدلالة المحاور



علاقات مثلثية بدلالة الزاوية المرجعية (هـ)



الثوابت الفيزيائية

- شحنة الإلكترون (س) $= 1,6 \times 10^{-19}$ كولوم
- النفاذية المغناطيسية للهواء أو الفراغ (μ_0) $= 4\pi \times 10^{-7}$ تسلا.م/أمبير
- تسارع الجاذبية الأرضية (ج) ≈ 10 م/ث²
- السماحية الكهربائية للهواء أو الفراغ (ϵ_0) $\approx 8,85 \times 10^{-12}$ كولوم²/نيوتن.م²
- ثابت كولوم (أ) $= \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \approx 9 \times 10^9$ نيوتن.م²/كولوم²
- ١ و.ك.ذ. $= 1,66 \times 10^{-27}$ كغ
- نق. $= 1,2 \times 10^{-15}$ م (الثابت في قانون نصف قطر النواة)
- $\pi = 3,14 = \frac{22}{7}$
- سرعة الضوء في الفراغ (س) $= 3 \times 10^8$ م/ث
- الإلكترون فولت $= 1,6 \times 10^{-19}$ جول
- الطاقة المكافئة لوحدة الكتلة الذرية تساوي ٩٣١,٥ مليون إلكترون فولت.
- ثابت بلانك (هـ) $= 6,63 \times 10^{-34}$ جول.ثانية
- ثابت ريديرغ (R_H) $= 1,097 \times 10^7$ م^{-١}
- نصف قطر بور (نق.) $= 5,29 \times 10^{-11}$ م
- جدول يوضح كتل الجسيمات الذرية

الكتلة (مليون إلكترون فولت)	الكتلة (و.ك.ذ.)	الكتلة (كغ)	الجسيم
٩٣٨,٣	١,٠٠٧٣	$1,6726 \times 10^{-27}$	البروتون
٩٣٩,٥٨	١,٠٠٨٧	$1,6749 \times 10^{-27}$	النيوترون
٠,٥١١	$5,4858 \times 10^{-4}$	$9,1094 \times 10^{-31}$	الإلكترون

قائمة المراجع

أولاً: المراجع العربية

- ١ - بول ج . هويت وزملاؤه، مفاهيم العلوم الفيزيائية، ترجمة وزارة التعليم العالي، الرياض، ٢٠١٤م.
- ٢ - بي. تي. ماثيوز، مقدمة في ميكانيكا الكم، ترجمة: أسامة زيد إبراهيم ناجي، الدار الدولية للنشر والتوزيع، القاهرة.
- ٣ - سام تريممان، من الذرة إلى الكوارك، ترجمة: أحمد فؤاد باشا، عالم المعرفة، الكويت، ٢٠٠٦.
- ٤ - غازي القيسي، أساسيات الفيزياء الحديثة (الطبعة الثانية)، دار المسيرة، عمان، ٢٠٠٩.
- ٥ - غازي القيسي، الكهرباء والمغناطيسية، دار المسيرة، عمان، ٢٠٠٤م.
- ٦ - ف. بوش، أساسيات الفيزياء (الطبعة الثامنة)، ترجمة: سعيد الجزيري ومحمد أمين سليمان، الدار الدولية للاستثمارات الثقافية، القاهرة، ٢٠٠٠.
- ٧ - مناف عبد حسن، الفيزياء النووية، دار صفاء، عمان، ٢٠٠٤.
- ٨ - وليد القادري، موسوعة الفيزياء "الميكانيك والكهرباء" دار أسامة للنشر، عمان، ٢٠٠٤م.

ثانياً: المراجع الأجنبية

1. Beiser, A., **Concepts of Modern Physics**, 6th ed., McGraw-Hill, 2003.
2. D. Giancoli, **Physics-Principles with Applications**, 6th ed., Prentice Hall, 2014.
3. D. Giancoli, **Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics**, 4th ed., Addison-Wesley, 2008.
4. Duncan, & Kennett, **Physics**, 3rd ed., Hodder Education, 2014.
5. Fishbane, Gaziorowicz, & others, **Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics**, 3rd ed., Pearson, 2005.
6. H. Young, & R. Freedman, & others, Sears and Zemansky's University **Physics with Modern Physics**, 13th ed., Addison-Wesley, 2011.
7. Halliday, & Resnick, **Fundamentals of Physics Extended**, 8th ed., John Wiley & Sons, 2007.
8. Krane, Kenneth S., **Modern Physics**, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc, 2012.
9. **Physics Course Book M part 1**, SABIS Educational Services 2008
10. S. Woolley, **Edexcel IGCSE physics**. Revision guide, 1st ed., Pearson Education, 2011.
11. Serway & Faughn, **Physics**, Holt, Rinehart and Winston, 2006
12. Serway, & Jewett, **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**, 9th ed., Cengage Learning, 2013.
13. Serway, & Peichner, **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics**, 7th ed, Soounders College Publishing , 2008
14. Serway, & Vuille, **College Physics**, 10th ed., Cengage Learning, 2014.
15. Serway, R. & others, **Modern Physics**, 3rd ed., Thomson Learning, Inc, 2005.

تَمَّ بِحَمْدِ اللَّهِ تَعَالَى



JO | ACADEMY.com