الجزء 6 المغناطيسية

PART 6 MAGNETISM

7 المغناطيسية Magnetism

ما سنتعلمه 170

7.1 مغناطيس دائم 170
خطوط المجال المغناطيسي 170
المجال المغناطيسي للأرض 171
تراكب المجالات المغناطيسية 173
7.2 القوة المغناطيسية 173
القوة المغناطيسية والشغل 173
وحدات قياس شدة المجال المغناطيسي 174
مسألة محلولة 7.1 أنبوب أشعة الكاثود 174
7.3 حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي 175
مسارات حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي منتظم 176
حجرة الإسقاط الزمني 177
مثال 7.1 كمية الحركة المستعرضة للجسيم في حجرة الإسقاط الزمني 177
مثال 7.2 الرياح الشمسية والمجال المغناطيسي للأرض 178
تردد المسرّع الدوراني 178
مثال 7.3 طاقة المسرع الدوراني 179
مطياف الكتلة 180
مسألة محلولة 7.2 منتقي السرعات 180
الرفع المغناطيسي 182
7.4 القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يمر فيه تيار كهربائي مستمر 182
مثال 7.4 القوة المؤثرة في ملف مكبّر الصوت 183
7.5 العزم المؤثر في حلقة يمر فيها تيار 184
7.6 عزم ثنائي القطب المغناطيسي 185
مسألة محلولة 7.3 العزم المؤثر في حلقة مستطيلة يسري فيها تيار مستمر 185
7.7 تأثير هول 187
مثال 7.5 تأثير هول 188

ما تعلمناه/ دليل المذاكرة للاختبار 188

إرشادات حل المسائل 189
أسئلة الاختيار من متعدد 189
أسئلة مفاهيمية 190
تمارين 191
تمارين بمعطيات متعددة 194



الشكل 7.1 قطار شانغهاي المغناطيسي المعلق في محطة مطار بودونغ الدولي. توضح الصورة الصغيرة شاشةً داخل القطار تعرض السرعة القصوى 430 km/h (267 mph) التي يصل إليها القطار أثناء الرحلة التي استغرقت 7 دقائق و20 ثانيةً من المطار إلى وسط مدينة شنغهاي.

على الرغم من أن معظم ما نعرفه عن المغناطيسية يرجع اكتشافه إلى قرنين، وبعضه يرجع اكتشافه إلى عصور قديمة، فإن التطبيقات التقنية الجديدة والمدهشة لهذه الظاهرة تشهد تطورًا مستمرًا في عصرنا الحالي. فكثير من الأجهزة التي نستخدمها في حياتنا اليومية يعتمد على المغناطيسية. من أمثلة ذلك السيارات، وأجهزة الكمبيوتر، والمحركات الكهربائية، وأي شيء تقريبًا يعمل بمحرك كهربائي أو أيّ تقنية لتخزين المعلومات. لكن الأكثر إدهاشًا من بين هذه الأمثلة هو قطار شانغهاي المغناطيسي المعلق، الشكل 7.1، الذي يتحرك فوق مجالات كهربائية صناعية ليصل إلى سرعات عالية جدًا. لكن لكي نعرف قيمة هذه الابتكارات، نحتاج أولًا إلى معرفة المعلومات الأساسية عن المغناطيسية.

تُعد هذه الوحدة هي أول وحدة تتناول المغناطيسية، وتشمل المجالات المغناطيسية والقوى المغناطيسية وتأثيراتها في الجسيمات المشحونة والتيارات الكهربائية. وسنواصل دراسة المغناطيسية في الوحدات القليلة التالية التي توضح أسباب نشأة المجالات المغناطيسية وارتباطها بالمجالات الكهربائية. ستجد أن الكهرباء والمغناطيسية هما في الحقيقة جزءان من القوة الكونية نفسها التي تُسمى *القوة الكهرومغناطيسية*؛ وأن الارتباط بينهما هو أحد أكبر النجاحات على مستوى الفيزياء النظرية.

Chapter Sourced From: 7. Magnetism, Chapter 27, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

ما سنتعلمه

- توجد المغناطيسات الدائمة في الطبيعة. ودائمًا ما يكون للمغناطيس قطب شمالي وآخر جنوبي. كما أنه من المستحيل عزل قطب مغناطيسي شمالي عن قطب مغناطيسي جنوبي أو العكس — فالأقطاب المغناطيسية تكون مقترنة في شكل أزواج دائمًا.
- الأقطاب المغناطيسية المختلفة تتجاذب، والأقطاب المتماثلة تتنافر.
- عند كسر مغناطيس إلى نصفين، ينتج مغناطيسان جديدان لكل منهما قطب شمالي وآخر جنوبي.
- يبذل المجال المغناطيسي قوة على الجسيمات المشحونة المتحركة فيه.
- تكون القوة المغناطيسية المبذولة على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي عموديةً على المجال المغناطيسي والسرعة المتجهة للجسيم.
- يمكن التعبير عن العزم المؤثر في حلقة يسري فيها تيار بدلالة الضرب الاتجاهي لعزم ثنائي القطب المغناطيسي للحلقة وشدة المجال المغناطيسي.
- يمكن استخدام تأثير هول لقياس المجالات الكهربائية.

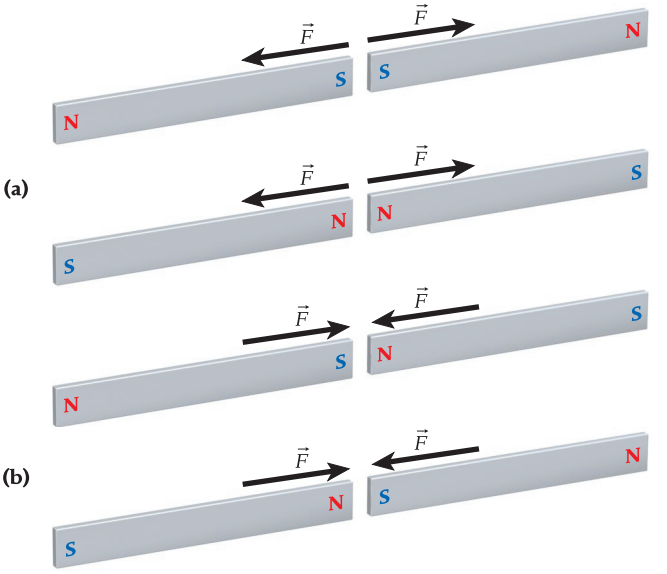
7.1 مغناطيس دائم Permanent Magnets



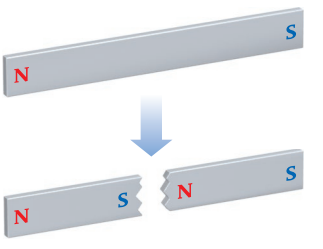
في منطقة مغنيسيا (وسط اليونان)، اكتشف الإغريق القدماء أنواعًا كثيرة من المعادن الطبيعية التي تتجاذب وتتنافر وتجذب أنواعًا معينة من الفلزات، مثل الحديد. كما تنتظم هذه المعادن، إذا كانت معلقة بشكل حر، مع اتجاه القطبين الشمالي والجنوبي للأرض. هذه المعادن هي أشكال مختلفة من أكسيد الحديد، وتُسمى **المغناطيسات الدائمة**. ومن الأمثلة الأخرى على المغناطيسات الدائمة مغناطيسات الثلاجات ومزالج الأبواب المغناطيسية المصنوعة من الحديد، والنيكل، والكوبالت. إذا لامستَ ساقًا حديديًا بقطعة من حجر المغناطيس المعدني (الماجنتيت المغناطيسي)، فسيصبح الساق الحديدي ممغنطًا. ثم إذا وضعتَ هذا الساق الحديدي في الماء بحيث يكون معلقًا بشكل حر، فسينتظم مع اتجاه القطبَين المغناطيسيين للأرض. يُسمى طرف المغناطيس الذي يتجه نحو الشمال **القطب المغناطيسي الشمالي**، ويُسمى الطرف الآخر **القطب المغناطيسي الجنوبي**.

إذا قرّب مغناطيسان دائمان إلى بعضهما بحيث يتلامس القطبان الشماليان أو القطبان الجنوبيان، فسيتنافر المغناطيسان (الشكل 7.2a). أما إذا قرّب قطب شمالي إلى قطب جنوبي، فسيتجاذب المغناطيسان (الشكل 7.2b). وما نسميه بالقطب الشمالي للأرض هو في الحقيقة قطب مغناطيسي جنوبي، ولذا فهو يجذب الأقطاب الشمالية للمغناطيسات الدائمة.

عند كسر مغناطيس دائم إلى نصفين، لا ينتج قطب شمالي منفرد وقطب جنوبي منفرد. بل ينتج مغناطيسان جديدان، لكل منهما قطب شمالي وآخر جنوبي (الشكل 7.3). وعلى عكس الشحنة الكهربائية التي توجد في شكل شحنة موجبة (بروتون) وشحنة سالبة (إلكترون) منفصلتين، فلا توجد أقطاب مغناطيسية أحادية منفردة (أقطاب شمالية وجنوبية منفصلة). فقد أجرى العلماء أبحاثًا مكثفة للحصول على أقطاب مغناطيسية أحادية، لكن لم ينجح أحد في ذلك. وستساعدك دراسة مصدر المغناطيسية في هذه الوحدة على فهم سبب عدم وجود أقطاب مغناطيسية أحادية.



الشكل 7.2 (a) الأقطاب المغناطيسية المتماثلة تتنافر؛ (b) الأقطاب المغناطيسية المختلفة تتجاذب.

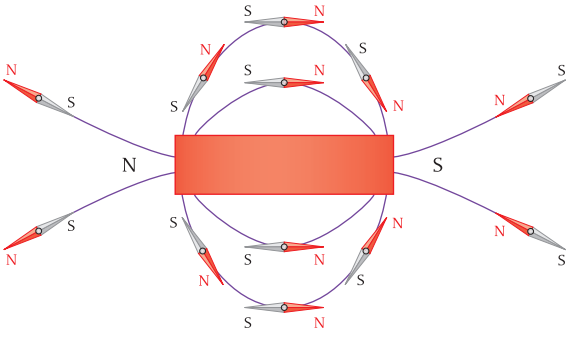


الشكل 7.3 عند كسر مغناطيس إلى نصفين، ينتج مغناطيسان لكل منهما قطب شمالي وآخر جنوبي.

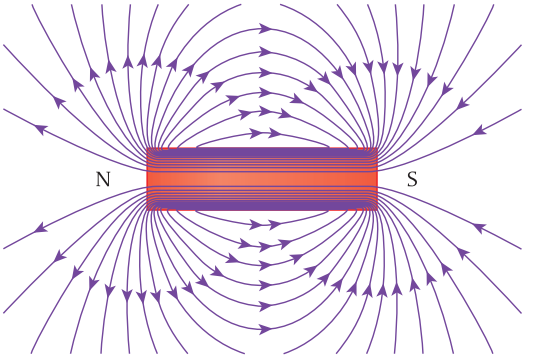
خطوط المجال المغناطيسي

تتفاعل المغناطيسات الدائمة بعضها مع بعض على بُعد مسافة معينة من دون أن تتلامس. وقياسًا على مجال الجاذبية والمجال الكهربائي، يُستخدم مفهوم **المجال المغناطيسي** لوصف القوة المغناطيسية. ويرمز المتجه $\vec{B}(\vec{r})$ إلى متجه المجال المغناطيسي عند أي نقطة معينة في الفراغ.

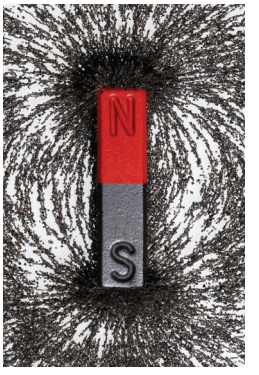
كما هو الحال مع المجال الكهربائي، يُمثَّل المجال المغناطيسي بخطوط المجال. ويكون متجه المجال المغناطيسي مماسيًا دائمًا **لخطوط المجال المغناطيسي**. يوضح الشكل 7.4a خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن مغناطيس دائم. وكما هو الحال مع خطوط المجال الكهربائي، كلما قلت المسافة بين الخطوط، زادت شدة المجال. وفي المجال الكهربائي، يكون اتجاه القوة المؤثرة في شحنة اختبار موجبة في اتجاه متجه المجال الكهربائي نفسه. لكن لعدم وجود أقطاب مغناطيسية أحادية، فلا يمكن وصف القوة المغناطيسية بطريقة مشابهة.



الشكل 7.5 استخدام إبرة بوصلة لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي من ساق مغناطيس.



(a)



(b)

الشكل 7.4 (a) خطوط مجال مغناطيسي (معدة باستخدام الكمبيوتر) ناتجة عن مغناطيس دائم. (b) برادة حديد توضح خطوط المجال المغناطيسي.

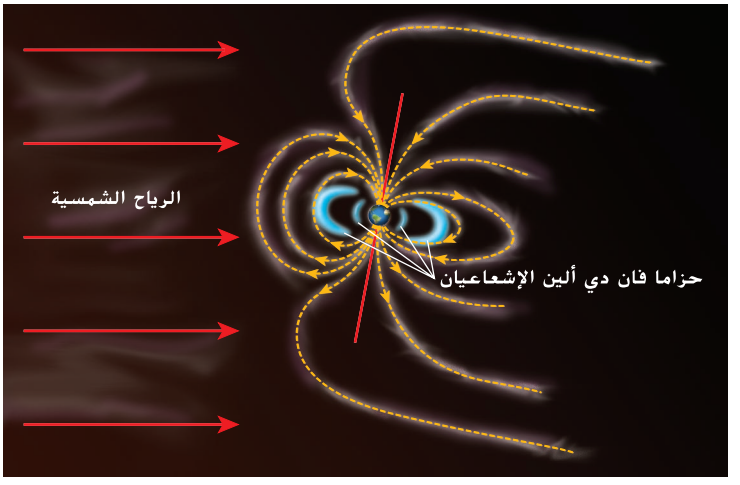
يُعرف اتجاه المجال المغناطيسي بدلالة الاتجاه الذي تشير إليه إبرة البوصلة. فإبرة البوصلة ذات القطب الشمالي والقطب الجنوبي ستنتظم مع اتجاه المجال المغناطيسي بحيث يشير قطبها الشمالي إلى اتجاه المجال المغناطيسي. لذا يمكننا معرفة اتجاه المجال عند أي نقطة بملاحظة الاتجاه الذي تشير إليه إبرة البوصلة الموضوعة عند هذه النقطة، كما يوضح الشكل 7.5 للساق المغناطيسي.

خارج المغناطيس، تبدو خطوط المجال المغناطيسي أنها تنشأ من القطب الشمالي وتنتهي في القطب الجنوبي. لكنها في الحقيقة تُشكِّل حلقات مغلقة تخترق جسم المغناطيس نفسه لتُكمل دورتها. وتشكِّل الحلقات المقفلة هذا فرقًا جوهريًا بين خطوط المجال الكهربائي وخطوط المجال المغناطيسي (بالنسبة إلى المجالات المنتظمة، لا ينطبق ذلك على المجالات المتغيرة مع الزمن كما سنرى في الوحدات اللاحقة). تذكَّر أن خطوط المجال الكهربائي تبدأ من الشحنات الموجبة وتنتهي في الشحنات السالبة. أما خطوط المجال المغناطيسي، فهي لا تبدأ أو تنتهي عند نقاط معينة لعدم وجود أقطاب مغناطيسية أحادية. بل تُشكِّل هذه الخطوط حلقات مغلقة لا تبدأ أو تنتهي عند أي نقطة. وسنعرف لاحقًا أهمية هذا الفرق في توضيح التفاعل بين خطوط المجال الكهربائي وخطوط المجال المغناطيسي. وإذا رأيت نمط مجال ولم تستطع أن تحدِّد في البداية ما إذا كان هذا المجال كهربائيًا أم مغناطيسيًا، فانظر هل توجد حلقات مغلقة أم لا. فإذا وجدتَ بعضها، فالمجال مغناطيسي. وإذا كانت خطوط المجال لا تشكل حلقات، فالمجال كهربائي.

المجال المغناطيسي للأرض

الأرض في حد ذاتها مغناطيس، ولها مجال مغناطيسي مماثل للمجال المغناطيسي لساق المغناطيس (الشكل 7.4). وهذا المجال المغناطيسي مهم لأنه يحمينا من الإشعاعات عالية الطاقة المنبعثة من الفضاء، التي تُسمى *الأشعة الكونية*. حيث تتكون هذه الأشعة الكونية في معظمها من جسيمات مشحونة، لكنها تنحرف بعيدًا عن سطح الأرض بسبب المجال المغناطيسي للأرض. ولا يتزامن قطبا المجال المغناطيسي للأرض مع قطبيها الجغرافيين المحدَّدين بنقطتَي تقاطع محور دوران الأرض مع سطحها.

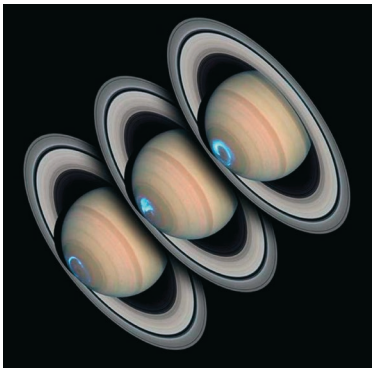
يوضح الشكل 7.6 مقطعًا عرضيًا لخطوط المجال المغناطيسي للأرض. كما تكون خطوط المجال قريبة بعضها من بعض مكوِّنة سطحًا مغناطيسيًا دائريًا يحيط بالأرض. لكن يتشوه شكل المجال المغناطيسي للأرض بسبب الرياح الشمسية التي هي عبارة عن تدفق من الجسيمات المتأينة. وهذه الجسيمات هي في الأساس بروتونات تنبعث من الشمس وتبتعد عنها بسرعة 400 km/s. وتحيط بالأرض حزمتان من الجسيمات المشحونة التي تُحصر من الرياح الشمسية. تُسمى هاتان الحزمتان **حزامَي فان ألين الإشعاعيَّين** (الشكل 7.6)، نسبة إلى عالِم الفضاء جيمس ألفرد فان ألين (1914–2006).



الشكل 7.6 مقطع عرضي لخطوط المجال المغناطيسي للأرض. تمثل الخطوط المتقطعة خطوط المجال المغناطيسي. والمحور المحدَّد بالقطبين المغناطيسيين الشمالي والجنوبي (الخط الأحمر) يصنع حاليًا زاوية قياسها 11° تقريبًا مع محور الدوران.



الشكل 7.7 ظاهرة الشفق القطبي الشمالي فوق دولة فنلندا، كما التقطتها محطة الفضاء الدولية.



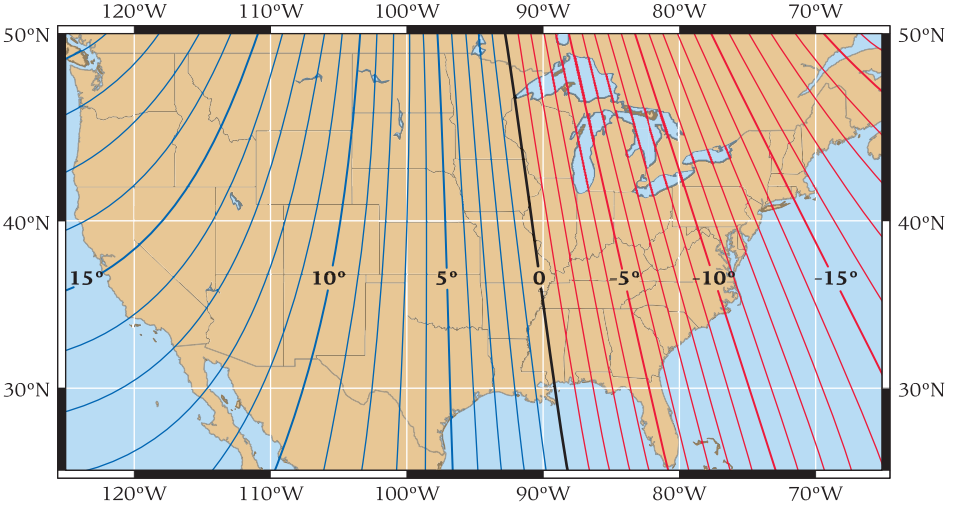
الشكل 7.8 ظاهرة الشفق على كوكب زُحل، كما تمّ التقاطها باستخدام تلسكوب هابل الفضائي.

الذي اكتشفهما في بداية عهد الرحلات الفضائية، وكان ذلك بوضع أجهزة قياس الإشعاع على الأقمار الصناعية. ويكون حزاما فان ألين الإشعاعيان أقرب ما يكونان إلى الأرض بالقرب من القطبين المغناطيسيين الشمالي والجنوبي، حيث غالبًا ما تتصادم الجسيمات المشحونة المحصورة داخل الحزامين مع الذرات الموجودة في الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى استثارة الذرات. فتنبعث من هذه الذرات المستثارة أضواء مختلفة الألوان عند اصطدامها وفقدها للطاقة؛ وتنتج عن ذلك ظاهرتان خلابتان هما **الشفق القطبي الشمالي** (الأضواء الشمالية) في المناطق الواقعة عند خطوط العرض الشمالية (انظر الشكل 7.7) و**الشفق القطبي الجنوبي** (الأضواء الجنوبية) في المناطق الواقعة عند خطوط العرض الجنوبية. كما أن كوكب الأرض لا يختص بظاهرتَي الشفق؛ فقد شوهدت على كواكب أخرى ذات مجالات مغناطيسية قوية، مثل المشترى وزُحل (انظر الشكل 7.8).

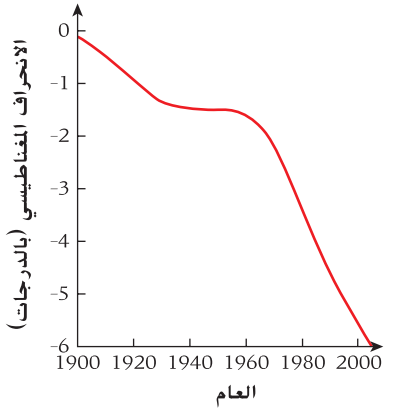
يتحرك قطبا الأرض المغناطيسيان في الوقت الحالي بمعدل سرعة يصل إلى 40 km في السنة الواحدة. ويقع القطب المغناطيسي الشمالي الآن على بُعد 2800 km تقريبًا من القطب الجغرافي الجنوبي، أي عند حافة القارة القطبية الجنوبية، ويتحرك نحو قارة أستراليا. أما القطب المغناطيسي الجنوبي فيقع في المنطقة القطبية الشمالية الكندية، وإذا استمرت حركته بالمعدل الحالي، فسيصل إلى سيبيريا في عام 2050. وقد زاد المجال المغناطيسي للأرض بمعدل ثابت يصل إلى 7% لكل قرن منذ أول قياس دقيق له عام 1840 تقريبًا. وسيختفي المجال المغناطيسي للأرض بهذا المعدل خلال بضعة آلاف من السنوات. لكن تشير بعض الأدلة الجيولوجية إلى أن المجال المغناطيسي للأرض قد انعكس (انقلب) 170 مرة تقريبًا خلال المئة مليون سنة الماضية. وكان آخر انقلاب له منذ 770000 سنة ماضية. لذا فقد ينعكس اتجاه المجال المغناطيسي للأرض بدلًا من اختفائه. ما سبب نشأة المجال المغناطيسي للأرض؟ العجيب أنه لم يتم التوصل إلى إجابة دقيقة عن هذا السؤال، وتُجرى حاليًا أبحاث مكثفة لمعرفة السبب. لكن الأرجح أنه ينشأ بسبب التيارات الكهربائية القوية داخل الأرض، وهي تنشأ بسبب دوران لُب الأرض السائل المكوَّن من الحديد والنيكل. يُشار إلى هذا الدوران عادة باسم *تأثير الدينامو*. (وسنعرف كيف تُنتج التيارات الكهربائية مجالات مغناطيسية في الوحدة 8).

نظرًا لأن القطب الجغرافي الشمالي والقطب المغناطيسي الشمالي لا يقعان في الموقع نفسه، فإن إبرة البوصلة لا تشير عادة إلى القطب الجغرافي الشمالي بشكل دقيق. يُسمى هذا الفرق **الانحراف المغناطيسي**. ويكون الانحراف المغناطيسي موجبًا عندما يكون الشمال المغناطيسي شرق الشمال الحقيقي، بينما يكون سالبًا عندما يكون الشمال المغناطيسي غرب الشمال الحقيقي. يقع القطب المغناطيسي الشمالي حاليًا على خط يمر بجنوب شرق ولاية ميسوري، وغرب ولاية إلينوي، وشرق ولاية آيوا، وغرب ولاية ويسكونسن. وعلى امتداد هذا الخط، يساوي الانحراف المغناطيسي صفرًا. ويكون الانحراف المغناطيسي غرب هذا الخط موجبًا، ويصل إلى 18 درجة في ولاية سياتل. أما شرق هذا الخط، فيكون الانحراف سالبًا، ويصل إلى 18− درجة في ولاية مين. يبين الشكل 7.9 خريطة توضح الانحراف المغناطيسي في الولايات المتحدة ابتداءً من عام 2004.

نظرًا لأن موقعَي قطبَي الأرض المغناطيسيين يتغيران بمرور الزمن، فإن الانحرافات المغناطيسية لكل المواقع على سطح الأرض تتغير أيضًا بمرور الزمن. على سبيل المثال، يوضح الشكل 7.10 تقدير الانحراف المغناطيسي لمدينة لانسنغ، عاصمة ولاية ميشيغان، في الفترة بين عامي 1900 و2004. ويمكن رسم تمثيل بياني مماثل لأي موقع على سطح الأرض.



الشكل 7.9 الانحرافات المغناطيسية في الولايات المتحدة في عام 2004. تمثل الخطوط الحمراء الانحرافات المغناطيسية السالبة، بينما توضح الخطوط الزرقاء الانحرافات المغناطيسية الموجبة. تفصل بين خطوط الانحراف المغناطيسي درجة واحدة.



الشكل 7.10 الانحراف المغناطيسي في مدينة لانسنغ، عاصمة ولاية ميشيغان، منذ عام 1900 إلى عام 2004.

تراكب المجالات المغناطيسية

إذا تواجدت عدة مصادر للمجال المغناطيسي بالقرب من بعضها، كعدة مغناطيسات دائمة، فإننا نحصل على المجال المغناطيسي عند أي نقطة معينة في الفراغ من خلال تراكب المجالات المغناطيسية الناشئة عن كل هذه المصادر. وهذا التراكب ينشأ مباشرة من تراكب القوى. نعبّر عن مبدأ التراكب للمجال المغناطيسي الكلي، $\vec{B}_{\text{total}}(\vec{r})$، الناتج عن n من مصادر المجال المغناطيسي بالمعادلة التالية

$$\vec{B}_{\text{total}}(\vec{r}) = \vec{B}_1(\vec{r}) + \vec{B}_2(\vec{r}) + \cdots + \vec{B}_n(\vec{r}) \quad (7.1)$$

إن مبدأ تراكب المجالات المغناطيسية هذا يشبه تمامًا مبدأ تراكب المجالات الكهربائية.

7.2 القوة المغناطيسية Magnetic Force

أشارت مناقشتنا النوعية للمجال المغناطيسي في القسم السابق إلى أن للمجال المغناطيسي اتجاهًا تمامًا لخطوط المجال. يمكننا إيجاد مقدار المجال المغناطيسي بدراسة تأثيره في جسيم مشحون متحرك. وسنبدأ بدراسة تأثير المجال المغناطيسي المنتظم في شحنة واحدة. كتذكير، يمكن إيجاد القوة التي يبذلها المجال الكهربائي على الشحنة من خلال المعادلة $\vec{F}_E = q\vec{E}$ توضح التجربة في الشكل 7.11 أن المجال المغناطيسي لا يبذل قوة على شحنة ساكنة، بل على شحنة *متحركة* فقط.

يمكن تعريف المجال المغناطيسي بدلالة القوة التي يبذلها المجال على جسيم مشحون متحرك. ويمكن إيجاد القوة المغناطيسية التي يبذلها المجال المغناطيسي على جسيم مشحون متحرك شحنته q وسرعته المتجهة $\vec{v}$ من خلال المعادلة

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (7.2)$$

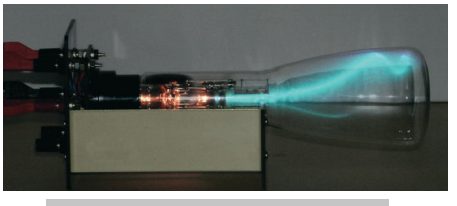
يتعامد اتجاه القوة على كل من السرعة المتجهة للجسيم المشحون المتحرك والمجال المغناطيسي (الشكل 7.12). وهذا ما يعرف بالقاعدة الأولى لليد اليمنى. توضح قاعدة اليد اليمنى اتجاه القوة المبذولة على شحنة موجبة بمعرفة اتجاهَي السرعة المتجهة والمجال. أما بالنسبة إلى الشحنة السالبة، فستكون القوة في الاتجاه المعاكس.

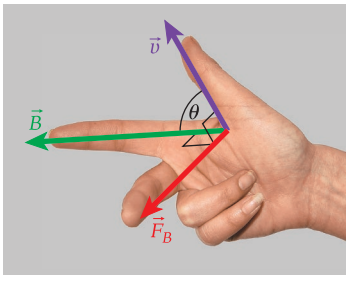
مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على جسيم مشحون متحرك هو

$$F_B = |q| vB \sin\theta \quad (7.3)$$

حيث θ الزاوية بين السرعة المتجهة للجسيم المشحون والمجال المغناطيسي. (تكون قيمة الزاوية θ بين 0° و180°، لذا فإن $\sin\theta \geq 0$). نستنتج من ذلك أنه لا توجد قوة مغناطيسية تؤثر في جسيم مشحون يتحرك بشكل موازٍ للمجال المغناطيسي، لأن $\theta = 0°$ في هذه الحالة. أما إذا تحرك جسيم مشحون عموديًا على المجال المغناطيسي، فإن $\theta = 90°$، ومع (ثبات قيمتَي v وB)، فسيكون مقدار القوة المغناطيسية أعلى ما يكون من خلال المعادلة

$$F_B = |q| vB \quad \left(\text{عندما } \vec{v} \perp \vec{B}\right) \quad (7.4)$$





الشكل 7.11 حزمة من الإلكترونات (تظهر باللون الأخضر المائل إلى الزرقة)، توضحها كمية صغيرة من الغاز في أنبوب مفرَّغ، ويتغير اتجاهها لتأثرها بمغناطيس (عند الحافة اليمنى للصورة).



الشكل 7.12 القاعدة الأولى لليد اليمنى للقوة التي يبذلها مجال مغناطيسي، $\vec{B}$، على جسيم شحنته q يتحرك بسرعة متجهة $\vec{v}$. لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية، وجِّه إبهامك في اتجاه السرعة المتجهة للجسيم المشحون المتحرك، وإصبعَ السبابة في اتجاه المجال المغناطيسي، وعندها سيشير الإصبع الأوسط في اتجاه القوة المغناطيسية.

القوة المغناطيسية والشغل

أوضحت المعادلة 7.2 أن القوة المغناطيسية هي حاصل الضرب الاتجاهي لمتجه السرعة المتجهة ومتجه المجال المغناطيسي، ومن ثمَّ فهي عمودية على كلا المتجهين. وهذا معناه أن $\vec{F}_B \cdot \vec{v} = 0$. وبما أن القوة هي حاصل ضرب الكتلة في العجلة، فإن $\vec{a} \cdot \vec{v} = 0$. وفي الحركة الدائرية، رأينا أن هذه الحالة تعني أنه يمكن أن يتغير اتجاه متجه السرعة المتجهة مع بقاء قيمة متجه السرعة المتجهة (أو السرعة) ثابتة. ومن ثم فإن الطاقة الحركية، $\frac{1}{2}mv^2$، تظل ثابتة للجسيم الذي يتعرض لقوة مغناطيسية، وأن القوة المغناطيسية *لا تبذل شغلًا على* الجسيم المتحرك.

مما سبق نستنتج ما يلي: لا يمكن استخدام المجال المغناطيسي المنتظم لبذل شغل على الجسيمات، وأن الطاقة الحركية لجسيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم تبقى ثابتة، حتى لو تغير اتجاه متجه السرعة المتجهة كدالة للزمن أثناء تحرك الجسيم في المجال المغناطيسي. وعلى الجانب الآخر، يمكن استخدام المجال الكهربائي بسهولة لبذل شغل على الجسيم المشحون.

وحدات قياس شدة المجال المغناطيسي

لمناقشة حركة الشحنات في المجالات المغناطيسية، نحتاج إلى معرفة الوحدات التي تُستخدم لقياس شدة المجال المغناطيسي. فبحل المعادلة 7.4 لإيجاد شدة المجال وبالتعويض بوحدات الكميات الأخرى، نجد أن

$$[F_B] = [q][v][B] \Rightarrow [B] = \frac{[F_B]}{[q][v]} = \frac{\text{N s}}{\text{C m}}$$

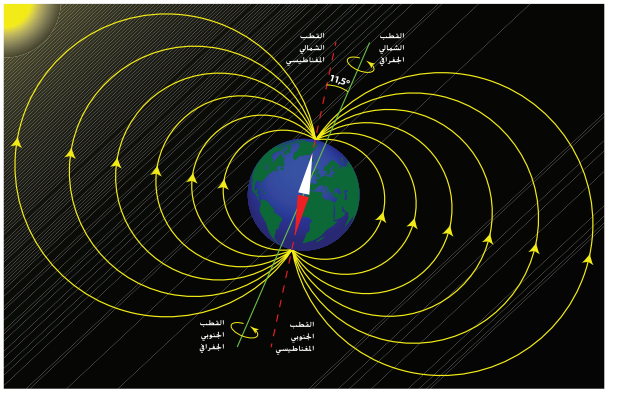
بما أن الأمبير (A) يساوي 1 C/s، فإن $(\text{N s})/(\text{C m}) = \text{N}/(\text{A m})$. وقد سُميت وحدة قياس شدة المجال المغناطيسي وحدة **تسلا** (T)، نسبة إلى الفيزيائي والمخترع الأمريكي والكرواتي الأصل نيكولا تسلا (1856–1943):

$$1\ \text{T} = 1\ \frac{\text{N s}}{\text{C m}} = 1\ \frac{\text{N}}{\text{A m}}$$

تمثل وحدة التسلا مقدارًا كبيرًا من شدة المجال المغناطيسي. وتُقاس شدة المجال المغناطيسي أحيانًا بوحدة الجاوس (G)، وهي ليست من وحدات النظام الدولي:

$$1\ \text{G} = 10^{-4}\ \text{T}$$

على سبيل المثال، تبلغ شدة المجال المغناطيسي للأرض عند سطح الأرض $(5 \times 10^{-5}\ \text{T})$ 0.5 G. تختلف هذه القيمة باختلاف الموقع لتتراوح بين 0.2 G و0.6 G، كما هو موضح في الشكل 7.13.

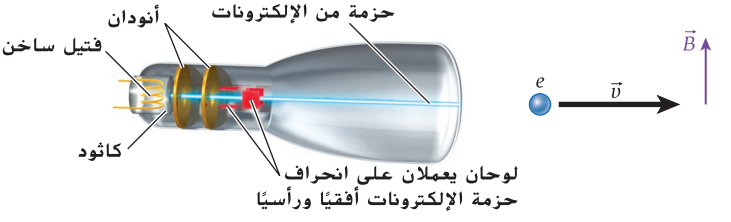


الشكل 7.13 خريطة للعالَم توضح شدة المجال المغناطيسي للأرض.

مسألة محلولة 7.1 أنبوب أشعة الكاثود

المسألة

افترض أنبوب أشعة كاثود مماثلًا للموضح في الشكل 7.11. في هذا الأنبوب، يعمل فرق الجهد $\Delta V = 111\ \text{V}$ على إكساب الإلكترونات عجلة أفقية (بدءًا من وضع السكون) في مدفع إلكترونات، كما هو موضح في الشكل 7.14a. يحتوي مدفع الإلكترونات على فتيل مطلي بمادة خاصة تنبعث منه الإلكترونات عند تسخينه. ويتحكم الكاثود سالب الشحنة في عدد الإلكترونات المنبعثة. ثم يقوم الأنودان موجبا الشحنة بتركيز الإلكترونات وإكسابها عجلة لتتحرك في شكل حزمة من الإلكترونات. فتتحرك هذه الحزمة من الأنودين في اتجاه لوحين يعملان على انحراف حزمة الإلكترونات أفقيًا ورأسيًا. إذا كان أمام مدفع الإلكترونات مجالٌ مغناطيسي منتظم شدته $B = 3.40 \cdot 10^{-4}\ \text{T}$ يتجه إلى أعلى عموديًا على السرعة المتجهة الابتدائية للإلكترونات، فما مقدار العجلة التي تكتسبها الإلكترونات بسبب تأثير المجال المغناطيسي؟ (كتلة الإلكترون تساوي $9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}$).



الشكل 7.14 (a) أنبوب أشعة الكاثود. (b) إلكترونات متحركة بسرعة متجهة $\vec{v}$ تدخل مجالًا مغناطيسيًا ثابتًا.

الحل

فكِّر تكتسب الإلكترونات طاقة حركية في مدفع إلكترونات أنبوب أشعة الكاثود. مقدار الطاقة الحركية المكتسبة لكل إلكترون يساوي حاصل ضرب شحنة الإلكترون في فرق الجهد. ويمكن إيجاد سرعة الإلكترونات من تعريف الطاقة الحركية. كما يمكن إيجاد مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون من خلال معرفة شحنة الإلكترون، وسرعته المتجهة، وشدة المجال المغناطيسي، وهي تساوي حاصل ضرب كتلة الإلكترون في العجلة التي يتحرك بها.

ارسم يوضح الشكل 7.14b إلكترونًا يتحرك بسرعة متجهة $\vec{v}$ ويدخل مجالًا مغناطيسيًا ثابتًا عموديًا على مسار الإلكترون.

ابحث ناتج جمع التغير في الطاقة الحركية للإلكترونات ΔK والتغير في طاقة وضع الإلكترونات يساوي صفرًا:

$$\Delta K + \Delta U = \tfrac{1}{2}mv^2 + q\Delta V = 0$$

وبما أن $q = -e$ في هذه الحالة، نجد أن

$$e\Delta V = \tfrac{1}{2}mv^2 \qquad \text{(i)}$$

حيث ΔV مقدار فرق الجهد الذي تسارعت الإلكترونات عبره، وm كتلة الإلكترون. ويمكننا حل المعادلة (i) لإيجاد سرعة الإلكترونات:

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} \quad \text{(ii)}$$

يمكن إيجاد مقدار القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي على الإلكترونات من خلال المعادلة 7.3:

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

حيث $-e$ شحنة الإلكترون، وB مقدار المجال المغناطيسي. وفقًا للقانون الثاني لنيوتن، $F_{net} = ma$. وبما أن القوة الوحيدة الموجودة هي القوة المغناطيسية، فإن

$$F_B = ma = evB \quad \text{(iii)}$$

حيث a مقدار عجلة الإلكترونات.

بسّط يمكننا إعادة ترتيب المعادلة (iii) والتعويض بتعبير سرعة الإلكترونات من المعادلة (ii) لإيجاد عجلة الإلكترونات:

$$a = \frac{evB}{m} = \frac{eB\sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}}}{m} = B\sqrt{2\Delta V\frac{e^3}{m^3}}$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية، نحصل على

$$a = \left(3.40\times10^{-4}\ \text{T}\right)\sqrt{2(111\ \text{V})\frac{\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)^3}{\left(9.11\times10^{-31}\ \text{kg}\right)^3}} = 3.7357\times10^{14}\ \text{m/s}^2$$

قرّب سنقرب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$a = 3.74\times10^{14}\ \text{m/s}^2$$

تحقّق ثانية قيمة العجلة المحسوبة كبيرة جدًا، تكاد تساوي 40 تريليون ضعف عجلة الجاذبية الأرضية. لذا نحتاج بالطبع إلى التحقق ثانية. أولًا، نحسب سرعة الإلكترونات:

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)(111\ \text{V})}{9.11\times10^{-31}\ \text{kg}}} = 6.25\times10^6\ \text{m/s}$$

قد تبدو قيمة السرعة 6250 km/s كبيرة، إلا أنها منطقية بالنسبة إلى الإلكترونات لأنها لا تعادل إلا 2% فقط من سرعة الضوء. ومن ثم فإن القوة المغناطيسية المؤثرة في كل إلكترون هي

$$F_B = evB = \left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(6.25\times10^6\ \text{m/s}\right)\left(3.40\times10^{-4}\ \text{T}\right) = 3.40\times10^{-16}\ \text{N}$$

مقدار العجلة كبير جدًا لأن كتلة الإلكترون صغيرة جدًا.

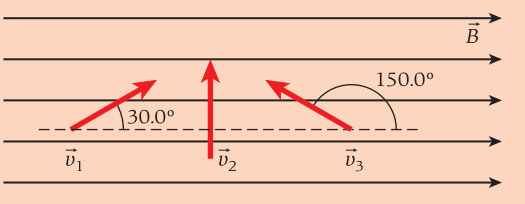
مراجعة المفاهيم 7.1

في أي اتجاه سينحرف الإلكترون الموضَّح في الشكل 7.14b عند دخوله مجالًا مغناطيسيًا ثابتًا؟

a) إلى داخل الصفحة
b) إلى خارج الصفحة
c) إلى أعلى
d) إلى أسفل
e) لن ينحرف الإلكترون

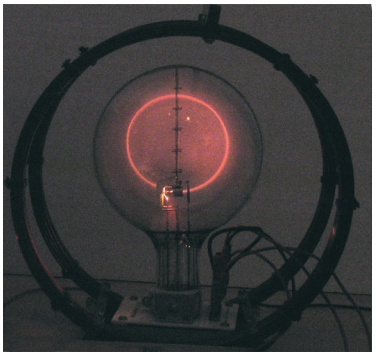
سؤال الاختبار الذاتي 7.1

ثلاثة جسيمات لكلٍ منها شحنة $q = 6.15\ \mu\text{C}$ وسرعة $v = 465\ \text{m/s}$. دخلت مجالًا مغناطيسيًا مقداره $B = 0.165\ \text{T}$ (انظر الشكل). ما مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في كل جسيم؟



7.3 حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي
Motion of Charged Particles in a Magnetic Field

إن تعامد قوة المجال المغناطيسي التي تؤثر في جسيم مشحون متحرك على كل من المجال المغناطيسي والسرعة المتجهة للجسيم يميز هذه القوة عن غيرها من القوى التي تناولناها حتى الآن. لكننا نستخدم في تحليلها القوانين نفسها المستخدمة مع باقي القوى، وهي قوانين نيوتن، وقوانين حفظ الطاقة، وكمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية.



الشكل 7.15 حزمة من الإلكترونات انحرفت لتتحرك في مسارٍ دائري بفعل المجال المغناطيسي الناتج عن ملفين.

مسارات حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي منتظم

افترض أنك تقود سيارتك بسرعة ثابتة في مسار دائري. ينتج عن الاحتكاك بين إطارات السيارة والطريق قوة الجذب المركزي التي تحافظ على تحرك السيارة في المسار الدائري. حيث يكون اتجاه تأثير هذه القوة نحو مركز الدائرة دائمًا، مما يؤدي إلى تحرك السيارة بعجلة مركزية. تنطبق هذه الحالة الفيزيائية نفسها عندما يتحرك جسيم شحنته q وكتلته m بسرعة متجهة $\vec{v}$ عموديًا على مجال مغناطيسي منتظم، $\vec{B}$، كما هو موضح في الشكل 7.15.

في هذه الحالة، تجد أن الجسيم يتحرك في مسار دائري بسرعة ثابتة، v، وينتج عن القوة المغناطيسية $F_B = |q|vB$ قوة الجذب المركزي التي تحافظ على تحرك الجسيم في مسار دائري. والجسيمات المختلفة في الشحنة والمتماثلة في الكتلة ستدور في اتجاهين متعاكسين في نصف القطر المداري نفسه. على سبيل المثال، الإلكترونات والبوزيترونات هي جسيمات أولية متماثلة في الكتلة؛ إلا أن الإلكترون سالب الشحنة والبوزيترون موجب الشحنة. الشكل 7.16 عبارة عن صورة لغرفة فقاقيع تُظهر زوجين من الإلكترونات والبوزيترونات. وغرفة الفقاقيع جهاز يمكنه تتبع حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي منتظم. (نتج زوجا الإلكترونات والبوزيترونات نتيجة التفاعلات بين الجسيمات الأولية، وسيتم تناول ذلك بالتفصيل لاحقًا). في الزوج 1 إلكترونٌ وبوزيترون لهما السرعة المنخفضة النسبية نفسها. تتحرك الجسيمات في البداية في مسار دائري. إلا أن سرعتها تقل أثناء تحركها في غرفة الفقاقيع. (هذا التباطؤ ليس بسبب القوة المغناطيسية، لكنه بسبب تصادم الجسيمات مع جزيئات الغاز في غرفة الفقاقيع). ونتيجة لذلك، يقل نصف قطر المسار الدائري تدريجيًا، مما يشكل مسارًا حلزونيًا. أما سرعة الإلكترون والبوزيترون في الزوج 2 فهي أكبر بكثير مقارنة بالزوج 1. حيث يتحركان في مسارَين منحنيين لا يشكلان دائرة كاملة قبل خروج الجسيمات من غرفة الفقاقيع.

إذا كانت السرعة المتجهة للجسيم المشحون متوازية (باتجاه أو عكس اتجاه) مع المجال المغناطيسي، فلن يتأثر الجسيم بأي قوة مغناطيسية وستستمر حركته في خط مستقيم.

أما إذا كانت الحركة عمودية على المجال المغناطيسي، كما في الشكل 7.15، فإن الحفاظ على حركة الجسيم بالسرعة v في مسار دائري نصف قطره r يتطلب قوة الجذب المركزي:

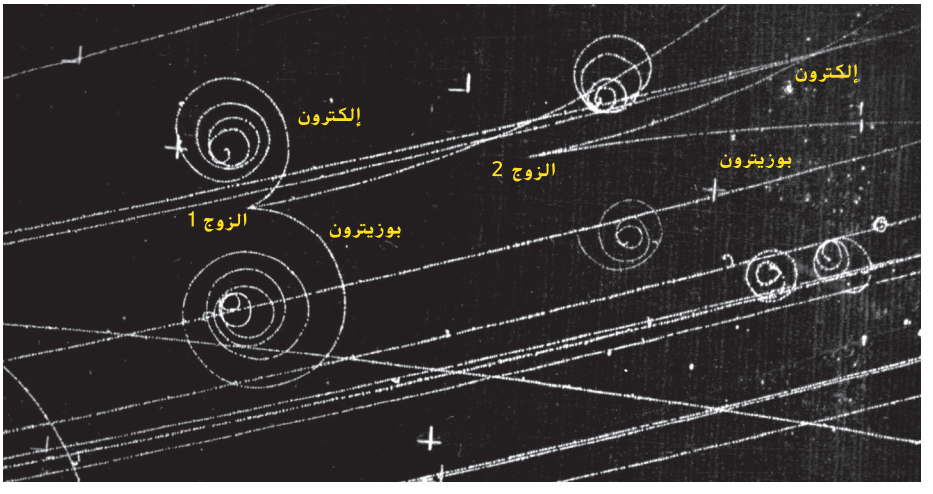
$$F = \frac{mv^2}{r}$$

بمساواة قوة الجذب المركزي مع القوة المغناطيسية، نحصل على

$$vB|q| = \frac{mv^2}{r}$$

وبإعادة الترتيب، نحصل على المعادلة لإيجاد نصف قطر المسار الدائري الذي يتحرك فيه الجسيم:

$$r = \frac{mv}{|q|B} \quad (7.5)$$



الشكل 7.16 صورة لغرفة فقاقيع تُظهر زوجين من الإلكترونات والبوزيترونات. توجد غرفة الفقاقيع في مجال مغناطيسي منتظم يتجه مباشرةً إلى خارج الصفحة.

وتكون المعادلة بدلالة مقدار كمية حركة الجسيم:

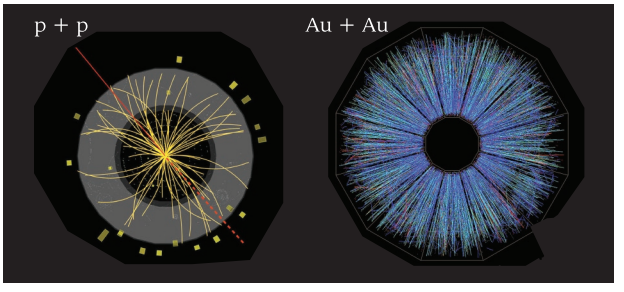
$$Br = \frac{p}{|q|} \quad (7.6)$$

إذا لم تكن السرعة المتجهة $\vec{v}$ عمودية على المجال المغناطيسي $\vec{B}$، فإن مركَّبة السرعة المتجهة العمودية على $\vec{B}$ تتسبب في تحرك الجسيم بشكل دائري، بينما لا تتأثر مركَّبة السرعة المتجهة الموازية بالمجال المغناطيسي $\vec{B}$، ومن ثمَّ تحوِّل هذا المدار إلى شكل حلزوني.

حجرة الإسقاط الزمني

يحصل علماء فيزياء الجسيمات على جسيمات أولية جديدة عن طريق تصادم جسيمات كبيرة عند أعلى مستويات للطاقة. ينتج عن هذه التصادمات جسيمات كثيرة تتدفق بعيدًا عن نقطة التصادم بسرعات كبيرة. ولا تكون أجهزة الكشف البسيطة عن الجسيمات كافية لتحديد هذه الجسيمات. لذا يستخدم الفيزيائيون حجرة الإسقاط الزمني لمساعدتهم على دراسة هذه التصادمات. وقد سبق وصف مُصادم STAR TPC في مثال 2.4.

يوضح الشكل 7.17 تصادم بروتونَين وتصادم نوائي ذرتي ذهب. ينتج عن تصادم البروتونَين عشرات الجسيمات؛ وينتج عن تصادم نوائي الذهب آلاف الجسيمات. ويترك كل جسيم مشحون مسارًا في الحجرة. يمثل اللون الذي يعينه الكمبيوتر إلى المسار كثافة تأين المسار أثناء مرور الجسيمات عبر غاز الحجرة. أثناء مرور هذه الجسيمات المشحونة عبر الغاز، فإنها تؤيِّن ذرات الغاز وتنتجُ إلكترونات حرة. ويسمح الغاز بانسياق الإلكترونات الحرة من دون الاتحاد ثانية مع الأيونات الموجبة. بتطبيق مجالات كهربائية بين مركز الحجرة والغطاءين الطرفيين للأسطوانة، تُبذل قوة كهربائية على الإلكترونات الحرة تجعلها تنساق نحو الغطاءين الطرفيين، حيث يتم تسجيلها إلكترونيًا. باستخدام زمن الانسياق ومواقع التسجيل، تعيد برامج الكمبيوتر إنشاء المسارات التي سلكتها الجسيمات عبر الحجرة. ويكون للجسيمات الناتجة أثناء التصادمات مركَّبة سرعة متجهة عمودية على المجال المغناطيسي للحجرة، ومن ثمَّ تسلك هذه الجسيمات مسارات دائرية.



(a) (b)

الشكل 7.17 مساران منحنيان يمثلان حركة الجسيمات المشحونة الناتجة عن تصادمات بين (a) بروتونين لكلٍ منهما طاقة حركية مقدارها 100 GeV، و(b) نوائي ذهب لكلٍ منهما طاقة حركية مقدارها 100 GeV.

مثال 7.1
كمية الحركة المستعرضة للجسيم المشحون كما تم رصدها بجهاز الكشف (أطلس)

يوضح الشكل 7.18 مسار حركة أحد الجسيمات المشحونة من الشكل 7.17a. نصف قطر المسار الدائري الذي يسلكه هذا الجسيم هو $r = 2.300\ \text{m}$. وشدة المجال المغناطيسي في حجرة الإسقاط الزمني هي $B = 0.5000\ \text{T}$. وسنفترض أن شحنة الجسيم $|q| = 1.602177 \times 10^{-19}\ \text{C}$.

المسألة

ما مركَّبة كمية حركة الجسيم العمودية على المجال المغناطيسي؟

الحل

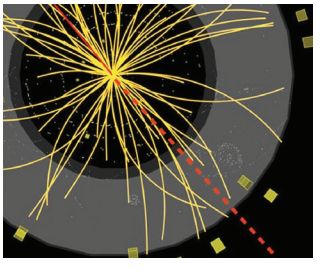
سنسمي هذه المركَّبة كميةَ الحركة المستعرضة للجسيم، p_t. وسنستخدم المعادلة 7.6، مع استبدال p بـ p_t، لأن القوة المغناطيسية تعتمد على p_t فقط، لا على مركَّبة كمية الحركة الموازية للمجال المغناطيسي $\vec{B}$

$$Br = \frac{p_t}{|q|}$$

يمكننا التعبير عن مقدار كمية الحركة المستعرضة للجسيم بدلالة مقدار المجال المغناطيسي لحجرة الإسقاط الزمني والقيمة المطلقة لشحنة الجسيم:

$$p_t = |q|Br = (1.602177 \times 10^{-19}\ \text{C})(0.5000\ \text{T})(2.300\ \text{m}) = 1.843 \times 10^{-19}\ \text{kg m/s}$$

يُتبع –



الشكل 7.18 دائرة تطابق مسار أحد الجسيمات المشحونة الناتجة عن تصادم بروتونين معًا داخل جهاز الكشف أطلس في مختبر الأبحاث النووية (سيرن) الموضح في الشكل 7.17a.

بدلًا من استخدام وحدات النظام الدولي هذه لإيجاد كمية الحركة، غالبًا ما يستخدم علماء فيزياء الجسيمات الوحدة MeV/c (راجع مثال 7.5). وبما أن $1\ \text{MeV} = 1.602\times10^{-13}\ \text{J}$، فإن التحويل بين kg m/s وMeV/c سيكون كما يلي:

$$1\ \text{MeV}/c = \frac{1.60218\times10^{-13}\text{J}}{2.99792\times10^{8}\text{m/s}} = 5.3443\times10^{-22}\text{kg m/s} \Leftrightarrow 1\ \text{kg m/s} = 1.87115\times10^{21}\text{MeV}/c$$

إذًا، قيمة كمية الحركة المستعرضة هي

$$p_t = 344.8\ \text{MeV}/c$$

إن تحليل كمية الحركة المستعرضة للجسيم الذي أجريناه هنا يمكن تنفيذه باستخدام خوارزميات حاسوبية مؤتمتة على ما يصل إلى 5000 جسيم من الجسيمات المشحونة الناتجة عن تصادم واحد بين نوائي ذهب. ويستغرق إكمال هذه العملية المعقدة حوالي 30 ثانية على جهاز كمبيوتر (بمعالج 3 GHz). في المقابل، يمكن أن تسجِّل حجرة الإسقاط الزمني ما يصل إلى 1000 حدث في الثانية، أي ما يقابل 1 مللي ثانية لكل حدث.

مثال 7.2 الرياح الشمسية والمجال المغناطيسي للأرض

ناقشنا في القسم 7.1 حزامَي فان ألين الإشعاعيين اللذين يحصران الجسيمات المنبعثة من الشمس. تُطلق الشمس ما يقرب من مليون طن من المادة إلى الفضاء كل ثانية. وتتكوَّن هذه المادة في معظمها من بروتونات تتحرك بسرعة 400 km/s تقريبًا.

المسألة

إذا كانت البروتونات المنبعثة من الشمس تسقط عموديًا على المجال المغناطيسي للأرض (الذي يبلغ مقداره 50.0 μT عند خط الاستواء)، فما نصف قطر مدار البروتونات؟ كتلة البروتون تساوي 1.67×10^{-27} kg.

الحل

تربط المعادلة 7.5 بين مقدار المجال المغناطيسي، B، ونصف قطر المدار الدائري، r، والسرعة، v، لجسيم كتلته m وشحنته q يتحرك عموديًا على المجال المغناطيسي:

$$r = \frac{mv}{|q|B}$$

بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$r = \frac{\left(1.67\times10^{-27}\ \text{kg}\right)\left(400.\times10^{3}\ \text{m/s}\right)}{\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(50.0\times10^{-6}\ \text{T}\right)} = 83.5\ \text{m}$$

وهكذا، فإن بروتونات الرياح الشمسية تدور حول خطوط المجال المغناطيسي للأرض عند خط الاستواء في دوائر نصف قطرها 83.5 m. أما البروتونات التي تسقط على المجال المغناطيسي للأرض بعيدًا عن خط الاستواء فلا تتحرك عموديًا على المجال المغناطيسي، لذا يكون نصف قطرها المداري أكبر. إلا أن خطوط المجال المغناطيسي تكون أقرب إلى بعضها، مما يعني زيادة شدة المجال تجاه القطبين. لذا تتحرك البروتونات بشكل حلزوني على امتداد خطوط المجال عند اقترابها من القطبين. فيُجبر شكل المجال المغناطيسي للأرض هذه البروتونات المتحركة نحو القطبين على عكس اتجاهها والعودة نحو خط الاستواء، فتُحصر البروتونات في حزامَي فان ألين الإشعاعيَّين. وهكذا، فإن المجال المغناطيسي للأرض يمنع الرياح الشمسية تمامًا من الوصول إلى سطح الأرض. ولهذا أهمية بالغة، إذ سيكون من المستحيل أن تعيش الكائنات الحية العليا على الأرض إذا وصل هذا الإشعاع الكوني إليها، حيث سيؤدي هذا الإشعاع إلى تأين الذرات (إزالة الإلكترونات منها) وتدمير الجزيئات الكبيرة، مثل جزيء DNA.

تردد المسرِّع الدوراني

إذا أكمل الجسم دورة كاملة في مسار دائري داخل مجال مغناطيسي منتظم، كحركة الإلكترونات في الشعاع الموضح في الشكل 7.15، فإن الزمن الدوري، T، للجسيم تساوي ناتج قسمة محيط الدائرة على السرعة:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B} \qquad (7.7)$$

التردد f لحركة الجسيم المشحون يساوي معكوس الزمن الدوري:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{|q|B}{2\pi m} \quad (7.8)$$

السرعة الزاوية، ω، للحركة هي

$$\omega = 2\pi f = \frac{|q|B}{m} \quad (7.9)$$

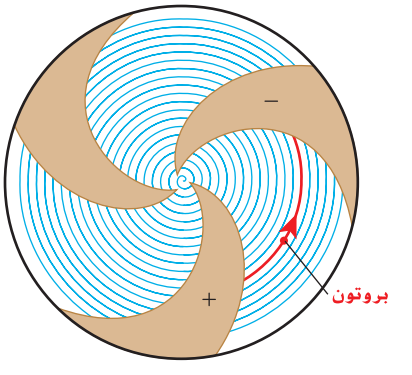
إذًا، التردد والسرعة الزاوية لحركة الجسيم لا يرتبطان بسرعة الجسيم ومن ثمَّ لا يرتبطان بالطاقة الحركية للجسيم. يُستفاد من هذه الحقيقة في المسرِّعات الدورانية، ولذا يُشار إلى ω المعطاة في المعادلة 7.9 بـ **تردد المسرِّع الدوراني**. ففي المسرِّع الدوراني، تكتسب الجسيمات عجلة تزيد من طاقتها الحركية تدريجيًا، كما أن حقيقة عدم ارتباط تردد المسرِّع الدوراني بالطاقة الحركية تُسهِّل تصميم المسرِّع الدوراني.

مثال 7.3 طاقة المسرع الدوراني

المسرع الدوراني هو مسرع للجسيمات (الشكل 7.19). تُطبق جهد كهربائي متردد على قطع ذهبية مثل الموضحة في الشكل (والتي تشبه *زعانف المروحة*)، لذا يتحرك الجسيم موجب الشحنة دائمًا من أسفل زعنفة موجبة الشحنة إلى أخرى سالبة الشحنة. فيؤدي المجال الكهربائي الناتج إلى تسريع حركة الجسيم. ونظرًا لتعرض المسرع الدوراني لمجال مغناطيسي قوي، فإن الجسم يتحرك في مسار منحنٍ. يتناسب نصف قطر المسار طرديًا مع مقدار كمية حركة الجسيم. وفقًا للمعادلة 7.6، لذا يتحرك الجسيم المتسارع في مسار لولبي نحو الخارج حتى يصل إلى حافة المجال المغناطيسي (حيث يصبح مساره غير منحنٍ بفعل المجال المغناطيسي) ثم يُسحب إلى الخارج. وفقًا للمعادلة 7.9، يكون التردد الزاوي مستقلًا عن كمية حركة الجسيم أو طاقته، لذا لا يلزم ضبط تردد تغير قطبية الزعانف أثناء تسارع الجسيم. (يظل ذلك صحيحًا طالما لم تقترب سرعة الجسيمات المتسارعة إلى حد كبير من سرعة الضوء. للتعويض عن التأثيرات النسبية، يزداد المجال المغناطيسي للمسرع الدوراني مع نصف القطر المسار الدائري للجسيمات المتسارعة).

المسألة





(a) (b)

الشكل 7.19 (a) رسم معد باستخدام الكمبيوتر يوضح الجزء المركزي للمسرع الدوراني فائق التوصيل K500 في المختبر الوطني للمسرع الدوراني فائق التوصيل في جامعة ميشيغان، مع إضافة المسار الحلزوني لجسيم مُسرَّع. تم تمييز إحدى زعانف المسرع الدوراني باللون الأخضر. (b) منظر علوي للمسرع الدوراني K500، يعرض بروتونًا أثناء تسريعه بين زعنفتين.

ما الطاقة الحركية، بوحدة الميجا إلكترون فولت (MeV)، لبروتون يخرج من مسرع دوراني نصف قطره $r = 1.81$ m، إذا كان المجال المغناطيسي للمسرع الدوراني مجالًا منتظمًا مقداره $B = 0.851$ T؟ كتلة البروتون تساوي 1.67×10^{-27} kg.

الحل

يمكننا حل المعادلة 7.5 لإيجاد سرعة البروتون، v:

$$v = \frac{r|q|B}{m}$$

يُتبع –

ثم نعوّض بالسرعة v في معادلة الطاقة الحركية:

$$K = \tfrac{1}{2}mv^2 = \tfrac{1}{2}m\left[\frac{r|q|B}{m}\right]^2 = \frac{r^2q^2B^2}{2m}$$

وبالتعويض باستخدام القيم المعطاة، نحصل على الطاقة الحركية بوحدة الجول (J):

$$K = \frac{(1.81\ \text{m})^2\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)^2(0.851\ \text{T})^2}{2\left(1.67\times10^{-27}\ \text{kg}\right)} = 1.82\times10^{-11}\ \text{J}$$

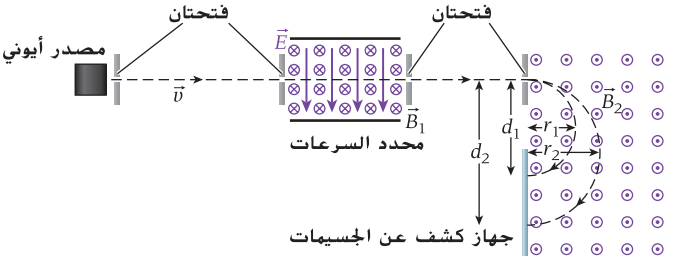
بما أن $1\ \text{MeV} = 10^6\ \text{eV}$ و $1\ \text{eV} = 1.602\text{x}10^{-19}\ \text{J}$، فإن

$$K = 1.82\times10^{-11}\ \text{J}\left[\frac{1\ \text{eV}}{1.602\times10^{-19}\ \text{J}}\right]\left[\frac{1\ \text{MeV}}{10^6\ \text{eV}}\right] = 114\ \text{MeV}$$

مطياف الكتلة

أحد تطبيقات حركة الجسيمات المشحونة في المجال المغناطيسي هو **مطياف الكتلة**، الذي يسمح بتحديد الكتل الذرية والجزيئية بشكل دقيق ويمكن أن يكون مفيدًا في عملية التأريخ بالكربون وتحليل المركبات الكيميائية غير المعروفة. يعمل مطياف الكتلة عن طريق تأيين الذرات أو الجزيئات لدراستها وتسريع حركتها عبر جهد كهربائي. ثم يتم تمرير الأيونات من خلال محدد سرعات (موضح بالتفصيل في المسألة المحلولة 7.2)، يسمح بمرور أيونات ذات سرعة محددة فقط ويمنع مرور باقي الأيونات. تدخل الأيونات بعد ذلك إلى منطقة مجال مغناطيسي منتظم. في المجال المغناطيسي، يتم إيجاد نصف قطر انحناء مدار كل أيون من خلال المعادلة 7.5: $r = mv/|q|B$ إذا افترضنا أن كل الذرات أو الجزيئات أحادية التأين (+1 أو -1)، فإن نصف قطر الانحناء سيتناسب طرديًا مع كتلة الأيون. يوضّح الشكل 7.20 رسمًا تخطيطيًا لمطياف كتلة.

سيكون للأيونات ذات الكتل المختلفة مدارات ذات أنصاف أقطار مختلفة في المجال المغناطيسي المنتظم. على سبيل المثال، في الشكل 7.20، تكون كتلة الأيونات التي نصف قطر مدارها r_1 أصغر من كتلة الأيونات التي نصف قطر مدارها r_2. ويقيس جهاز الكشف عن الجسيمات المسافات من نقطة المدخل، d_1 وd_2، التي يمكن أن تكون مرتبطة بأنصاف الأقطار المدارية ومن ثمَّ بكتلة الأيونات.



الشكل 7.20 رسم تخطيطي لمطياف كتلة يعرض مصدرًا أيونيًا، ومُحدِّدَ سرعات يتكون من مجال كهربائي ومجال مغناطيسي متقاطعين (انظر مسألة محلولة 7.2)، ومنطقةً فيها مجال مغناطيسي منتظم، وجهازًا للكشف عن الجسيمات.

مسألة محلولة 7.2 منتقي السرعات

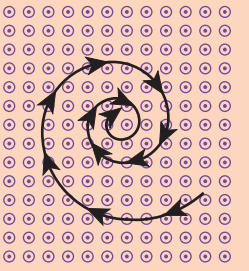
تتسارع البروتونات بدءًا من وضع السكون عبر فرق جهد كهربائي مقداره $\Delta V = 14.0\ \text{kV}$. وتدخل البروتونات منتقي سرعات يتكوّن من مكثف ذي لوحين متوازيين معرَّض لمجال مغناطيسي منتظم موجَّه عموديًا على مستوى الصفحة، كما في الشكل 7.21a. مقدار المجال الكهربائي بين لوحَي المكثف المتوازيين هو $\vec{E} = 4.30\text{x}10^5\ \text{V/m}$، وهو باتجاه مستوى الصفحة وإلى الأسفل، كما في الشكل 7.21a. يشار إلى ترتيب المجالين الكهربائي والمغناطيسي المتعامدين هذا باسم *المجالات المتقاطعة*.

المسألة

ما المجال المغناطيسي اللازم لمرور البروتونات عبر منتقي السرعات من دون أن تنحرف؟

سؤال الاختبار الذاتي 7.2

مجال مغناطيسي منتظم موجَّه إلى خارج الصفحة (الترميز القياسي لأي نقطة داخل دائرة يمثل طرف رأس السهم لخط المجال). ويتحرك جسيم مشحون في مستوى الصفحة، كما توضح الأسهم في الشكل.



a) هل شحنة الجسيم موجبة أم سالبة؟

b) هل تقل سرعة الجسيم، أم تزيد، أم تظل ثابتةً؟

c) هل يبذل المجال المغناطيسي شغلًا على الجسيم؟

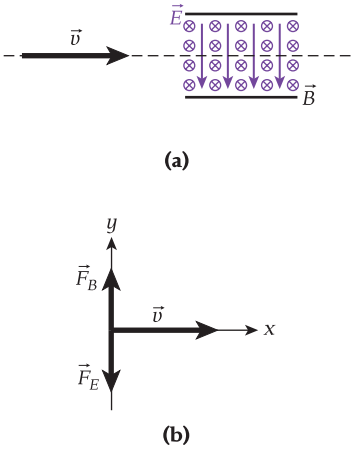
مراجعة المفاهيم 7.2

لو لم يعمل المجال المغناطيسي للأرض على انحراف الأشعة الكونية، لغمرت سطح الأرض باستمرار. بالنظر إلى الأرض على أنها ثنائي قطب مغناطيسي تقريبًا (انظر الشكل 7.6)، تكون شدة الأشعة الكونية الساقطة على سطحها أكبر ما تكون عند:

a) القطبين الشمالي والجنوبي.

b) خط الاستواء.

c) خطوط العرض المتوسطة.



الشكل 7.21 (a) بروتون يدخل منتقي سرعات يتكون من مجال كهربائي ومجال مغناطيسي متقاطعين. (b) قوتان إحداهما كهربائية والأخرى مغناطيسية تؤثران في بروتون يمر عبر المجالين معًا.

الحل

فكِّر لكي يتحرك البروتون في مسار مستقيم من دون انحراف، يُشترط أن تكون محصلة القوى المؤثرة فيه صفرًا. بما أن البروتون له سرعة متجهة معينة والقوة المغناطيسية تعتمد على السرعة المتجهة، فمن المنطقي عدم إمكانية تحقق هذا الشرط (أن تساوي محصلة القوى صفرًا) للسرعات العشوائية للبروتون – ومن هنا جاءت تسمية *منتقي السرعات*.

ارسم يوضح الشكل 7.21b القوتَين الكهربائية والمغناطيسية المؤثرتَين في البروتونات أثناء مرورها عبر منتقي السرعات. لاحظ أن القوتين تؤثران في اتجاهين متعاكسين.

ابحث ناتج جمع التغير في الطاقة الحركية للبروتونات والتغير في طاقة الوضع الكهربائية يساوي صفرًا، وهو ما يمكن التعبير عنه كما يلي

$$\Delta K = -\Delta U = \tfrac{1}{2}mv^2 = e\Delta V$$

حيث m كتلة البروتون، وv سرعته بعد التسارع، وe شحنة البروتون، وΔV فرق الجهد الكهربائي الذي تسارعت عبره البروتونات. سرعة البروتونات بعد التسارع هي

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} \quad \text{(i)}$$

عند دخول البروتونات إلى منتقي السرعات، يكون اتجاه القوة الكهربائية في اتجاه المجال الكهربائي، أي إلى أسفل (اتجاه y السالب). ونحصل على مقدار القوة الكهربائية من خلال المعادلة

$$F_E = eE \quad \text{(ii)}$$

حيث E مقدار المجال الكهربائي في منتقي السرعات. ونحصل على اتجاه القوة المغناطيسية من خلال القاعدة الأولى لليد اليمنى: عندما يكون إصبع الإبهام في اتجاه السرعة المتجهة للبروتونات (اتجاه x الموجب) والسبابة في اتجاه المجال المغناطيسي (إلى داخل الصفحة)، يكون الإصبع الأوسط متجهًا إلى أعلى (اتجاه y الموجب). ومن ثمَّ يكون اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في البروتونات إلى أعلى. ونحصل على مقدار القوة المغناطيسية من خلال المعادلة

$$F_B = evB \quad \text{(iii)}$$

حيث B مقدار المجال المغناطيسي في منتقي السرعات.

بسِّط الشرط الذي يسمح بمرور البروتونات عبر منتقي السرعات من دون أن تنحرف هو توازن القوة الكهربائية مع القوة المغناطيسية، أو $F_E = F_B$. باستخدام المعادلتين (ii) و(iii)، يمكننا التعبير عن هذا الشرط كما يلي

$$eE = evB$$

وبالحل لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي، B، والتعويض عن v من المعادلة (i)، نحصل على

$$B = \frac{E}{\sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}}} = E\sqrt{\frac{m}{2e\Delta V}}$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية، نحصل على

$$B = \left(4.30\times10^{5}\ \text{V/m}\right)\sqrt{\frac{1.67\times10^{-27}\ \text{kg}}{2\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(14.0\times10^{3}\ \text{V}\right)}} = 0.262371\ \text{T}$$

قرِّب سنقرب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$B = 0.262\ \text{T}$$

تحقَّق ثانية يجب التحقق من تساوي القوة الكهربائية مع القوة المغناطيسية. مقدار القوة الكهربائية هو

$$F_E = eE = \left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(4.30\times10^{5}\ \text{V/m}\right) = 6.89\times10^{-14}\ \text{N}$$

لحساب مقدار القوة المغناطيسية، نحتاج إلى إيجاد سرعة البروتونات:

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(14.0\times10^{3}\ \text{V}\right)}{1.67\times10^{-27}\ \text{kg}}} = 1.64\times10^{6}\,\text{m/s}$$

– يُتبع

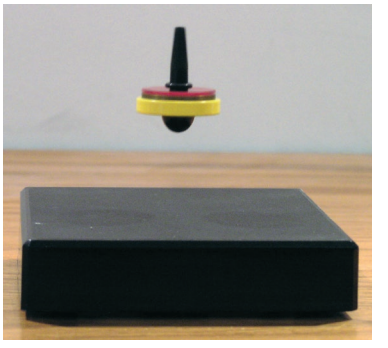
تعادل هذه السرعة 0.55% من سرعة الضوء، وهي نسبة معقولة إلى حد ما. إذًا مقدار القوة المغناطيسية هو

$$F_B = evB = \left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(1.64\times10^{6}\ \text{m/s}\right)\left(0.262\ \text{T}\right) = 6.88\times10^{-14}\ \text{N}$$

وهو يتوافق مع مقدار القوة الكهربائية في حدود أخطاء التقريب. لذا، تبدو النتيجة التي توصلنا إليها منطقية.

الرفع المغناطيسي

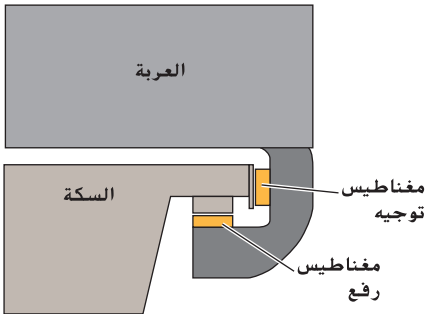
أحد التطبيقات المدهشة للقوة المغناطيسية هو **الرفع المغناطيسي**، وفيه يحدث توازن بين القوة المغناطيسية المؤثرة في جسم إلى أعلى وقوة الجاذبية المؤثرة إلى أسفل لتحقيق اتزان سكوني دون الحاجة إلى ملامسة الأسطح لبعضها بشكل مباشر. إلا أنك إذا حاولت موازنة مغناطيس فوق مغناطيس آخر عن طريق توجيه القطبين الشماليين (أو القطبين الجنوبيين) تجاه بعضهما، فسترى على الفور أن هذا غير ممكن. بل سينقلب أحد المغناطيسين، ثم سيتجه القطبان المختلفان نحو بعضهما، وستؤدي قوة الجذب بينهما إلى التصاقهما معًا. يتطلب الاتزان المستقر مقدارًا صغيرًا من طاقة الوضع، وهو ما لا يوجد في التفاعل التنافري التام بين القطبين المغناطيسيين المتشابهين.



الشكل 7.22 جهاز التحليق المغناطيسي (الليفيترون)، هو لعبة توضح الرفع المغناطيسي لمغناطيس يدور فوق قاعدة مغناطيسية.

يبين الشكل 7.22 لعبة توضح مبدأ عمل الرفع المغناطيسي تُسمى الليفترون (أو جهاز التحليق المغناطيسي). حيث يتم تدوير الجزء العلوي المغناطيسي على لوح ثم يُرفع إلى الارتفاع المناسب ويُحرَّر. ويمكن أن يظل الجزء العلوي معلّقًا لعدة دقائق. كيف تعمل هذه اللعبة، مع الأخذ في الاعتبار شرط الاتزان المستقر الذي تم ذكره. تتمثل آلية عمل اللعبة في الدوران السريع للجزء العلوي الذي تنتج عنه كمية حركة زاوية كبيرة كافية، فينشأ عنه حاجز من طاقة الوضع يمنع انقلاب المغناطيس.

توجد بالطبع طرق أخرى لإنشاء أنظمة رفع مغناطيسي مستقرة، إلا أنها تنطوي جميعها على مغناطيسات متعددة متصلة ببعضها بقوة. أحد تطبيقات الحياة اليومية للرفع المغناطيسي هو القطارات المغناطيسية المعلقة. تتفوق هذه القطارات على القطارات التي تسير على السكك الحديدية العادية بعدة مزايا؛ حيث لا توجد أجزاء متحركة تتعرض للتآكل، بالإضافة إلى قلة الاهتزاز والاحتكاك، ما يعني إمكانية السير بسرعات عالية. تُستخدم العديد من القطارات المغناطيسية المعلقة بالفعل حول العالم ويجري التخطيط لإنشاء العديد منها. أحد أمثلة هذه القطارات هو قطار شانغهاي المغناطيسي المعلق (الشكل 7.1) الذي يعمل بين مطار شانغهاي بودنغ الدولي ووسط مدينة شنغهاي، وتصل سرعته إلى 430 km/h (267 mph).



الشكل 7.23 مقطع عرضي لجانب واحد من عربة قطار شانغهاي المغناطيسي المعلق. ترفع مغناطيسات الرفع العربات مسافة 15 cm فوق السكة، أما مغناطيسات التوجيه فهي تحافظ على اتزان العربات فوق السكة. وكل هذه المغناطيسات مثبتة في القطار المتحرك.

يعمل قطار شنغهاي المغناطيسي المعلق باستخدام مغناطيسات مثبتة في العربات (الشكل 7.23). وهذه المغناطيسات عبارة عن ملفات مغناطيسية عادية غير فائقة التوصيل مزودة بتغذية إلكترونية لرفع القطار وتوجيهه على نحو متزن. ترتفع عربات القطار 15 cm فوق السكة لتجنب أي جسم قد يكون عليها. كما تبعد مغناطيسات الرفع والتوجيه مسافة 10 mm عن السكة المصنوعة من مادة مغناطيسية أيضًا. وتعمل المجالات المغناطيسية المدمجة داخل السكة على دفع القطار. يشبه نظام دفع القطار في عمله محركًا كهربائيًا (انظر القسم 7.5) سحبت حلقاته الدائرية لتأخذ شكلًا خطيًا.

تم اختبار القطارات المغناطيسية المعلقة التي تستخدم مغناطيسات فائقة التوصيل، فظهرت بعض المشكلات الفنية التي لم يتم حلها بعد، منها صيانة الملفات فائقة التوصيل وتعرض الركاب لمجالات مغناطيسية عالية.

7.4 القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يمر فيه تيار كهربائي مستمر
Magnetic Force on a Current-Carrying Wire



افترض أن سلكًا يسري فيه تيار، i، وُضع في مجال مغناطيسي منتظم، $\vec{B}$ (الشكل 7.24a). يبذل المجال المغناطيسي قوة على الشحنات المتحركة في السلك. والشحنة، q، المتدفقة عبر نقطة في السلك في زمن معين، t، هي $q = ti$. خلال هذا الزمن، تحتل الشحنة طولًا معينًا من السلك، L، نحصل عليه من خلال المعادلة $L = v_d t$، حيث v_d سرعة الانسياق لناقلات الشحنة في السلك (مقدار سرعة انسياقها). إذًا، سنحصل على

$$q = ti = \frac{L}{v_d} i \qquad (7.10)$$

إذًا مقدار القوة المغناطيسية هو

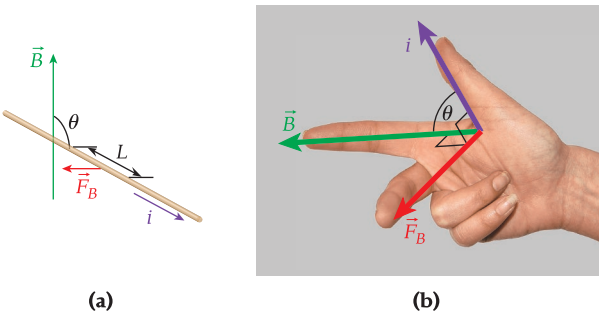
$$F_B = qv_d B\sin\theta = \left[\frac{L}{v_d}i\right]v_d B\sin\theta = iLB\sin\theta \quad (7.11)$$

حيث θ الزاوية بين اتجاه تدفق التيار واتجاه المجال المغناطيسي. يكون اتجاه القوة عموديًا على كل من اتجاه التيار واتجاه المجال المغناطيسي، ويمكن إيجاده من خلال تطبيق القاعدة الأولى لليد اليمنى، يكون اتجاه التيار في اتجاه السرعة المتجهة للجسيم المشحون، كما هو موضح في الشكل 7.24b. في القاعدة الأولى لليد اليمنى يمكن معاملة التيار على أنه شحنات متحركة.

يمكن التعبير عن المعادلة 7.11 في صورة ضرب اتجاهي:

$$\vec{F}_B = i\vec{L}\times\vec{B} \quad (7.12)$$

حيث يمثل الرمز $i\vec{L}$ التيار المار في جزء من السلك. المعادلة 7.12 هي مجرد إعادة صياغة للمعادلة 7.2 لتمثيل الحالة التي تشكل فيها الشحنات المتحركة تيارًا يتدفق في سلك. ونظرًا لأن الحالات الفيزيائية التي تتضمن التيارات تكون أكثر شيوعًا من تلك التي تتضمن حركة جسيم مشحون معزول، فإن المعادلة 7.12 هي الصياغة الأكثر فائدة لتحديد القوة المغناطيسية في التطبيقات العملية.

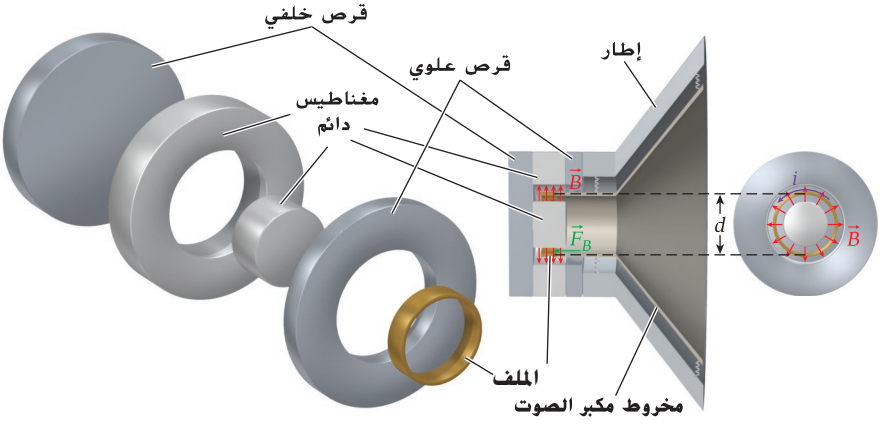


(a) (b)

الشكل 7.24 (a) القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يسري فيه تيار. (b) أحد تمثيلات القاعدة الأولى لليد اليمنى يحدد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يسري فيه تيار. لتحديد اتجاه القوة المؤثرة في سلك يسري فيه تيار باستخدام يدك اليمنى، وجِّه إبهامك في اتجاه التيار، وإصبع السبابة في اتجاه المجال المغناطيسي، وعندئذٍ سيشير الإصبع الأوسط في اتجاه القوة.

مثال 7.4 القوة المؤثرة في ملف مكبِّر الصوت

ينتج مكبِّر الصوت صوتًا عن طريق بذل قوة مغناطيسية على ملف صوت في مجال مغناطيسي، كما هو موضح في الشكل 7.25. يتصل الملف المتحرك بمخروط مكبِّر الصوت المسؤول عن إنتاج الأصوات. ويتم إنتاج المجال المغناطيسي من خلال المغناطيسين الدائمين كما هو موضح. مقدار المجال المغناطيسي هو $B = 1.50\ \text{T}$. ويتكون الملف من $n = 100$ لفة من السلك يسري فيه تيار، $i = 1.00\ \text{mA}$. وقطر الملف هو $d = 2.50\ \text{cm}$.



(a) (b) (c)

الشكل 7.25 رسم تخطيطي لمكبِّر صوت. (a) منظر مكبِّر ثلاثي الأبعاد لطرف مكبِّر الصوت. (b) منظر جانبي للمقطع العرضي لمكبِّر الصوت. (c) منظر أمامي لطرف مكبِّر الصوت.

المسألة

ما مقدار القوة المغناطيسية التي يبذلها المجال المغناطيسي على الملف في مكبِّر الصوت؟

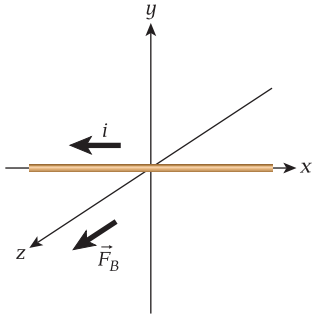
الحل

يمكن إيجاد مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على الملف من خلال المعادلة 7.11:

$$F = iLB\sin\theta$$

مراجعة المفاهيم 7.3

يوضح الشكل سلكًا يقع على امتداد المحور x يسري فيه تيار كهربائي، i، متدفقًا في اتجاه x السالب. ويقع السلك في مجال مغناطيسي منتظم. وتؤثر القوة المغناطيسية، $\vec{F}_B$، في السلك في اتجاه z الموجب. إذا تم توجيه المجال المغناطيسي لتصبح القوة أكبر ما يمكن، فما اتجاه هذا المجال؟



a) اتجاه y الموجب
b) اتجاه x السالب
c) اتجاه y السالب
d) اتجاه z الموجب
e) اتجاه z السالب

– يُتبع

حيث L طول السلك الذي يسري فيه التيار i في مجال مغناطيسي مقداره B. يصنع السلك زاوية θ مع المجال المغناطيسي. وفي هذه الحالة، يكون السلك عموديًا دائمًا على المجال المغناطيسي، ومن ثم فإن $\theta = 90°$. يمكن إيجاد طول السلك في ملف مكبر الصوت من خلال ضرب عدد اللفات، n، في المحيط، πd لكل لفة.

$$L = n\pi d$$

ومن ثم، فإن مقدار القوة المبذولة على ملف مكبر الصوت هو

$$F = i(n\pi d)B(\sin 90°) = n\pi idB$$

بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$F = n\pi idB = (100)(\pi)\left(1.00\times10^{-3}\ \text{A}\right)\left(2.50\times10^{-2}\ \text{m}\right)(1.50\ \text{T}) = 0.0118\ \text{N}$$

من خلال القاعدة الأولى لليد اليمنى الموضحة في الشكل 7.24b، يكون اتجاه القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي على ملف مكبر الصوت إلى اليسار في الشكل 7.25b وعموديًا إلى داخل الصفحة في الشكل 7.25c.

إذا تم عكس التيار في ملف الصوت، فستكون القوة في الاتجاه المعاكس. وإذا كان التيار متناسبًا طرديًا مع سعة الموجة الصوتية، فيمكن إعادة إنتاج الموجات الصوتية في مخروط مكبّر الصوت. تُستخدم هذه الفكرة الأساسية في معظم مكبرات الصوت وسماعات الرأس.

7.5 العزم المؤثر في حلقة يمر بها تيار مستمر
Torque on a Current-Carrying Loop

تعتمد المحركات الكهربائية في عملها على القوة المغناطيسية المبذولة على سلك يسري فيه تيار. وتُستخدم هذه القوة لإنشاء عزم يعمل على تدوير العمود. لنفترض أن محركًا كهربائيًا بسيطًا يتكون من حلقة مربعة واحدة يسري فيها تيار، i، موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم، $\vec{B}$. والحلقة موجَّهة بحيث يكون الضلعان الأفقيان متوازيين مع المجال المغناطيسي ويكون الضلعان الرأسيان عموديين على المجال المغناطيسي، كما هو موضح في الشكل 7.26. نحصل على مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على الضلعين الرأسيين للحلقة من خلال المعادلة 7.11، حيث $\theta = 90°$:

$$F = iLB$$

يمكننا إيجاد اتجاه القوة المغناطيسية بواسطة تطبيق القاعدة الأولى لليد اليمنى الموضح في الشكل 7.24b. القوتان المغناطيسيتان $\vec{F}_B$ و $-\vec{F}_B$ الموضحتان في الشكل 7.26 متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه. تُنتج هاتان القوتان عزمًا يميل إلى تدوير الحلقة حول محور دوران رأسي. وناتج جمع هاتين القوتين يساوي صفرًا. فلا يتأثر الضلعان الأفقيان للحلقة بأي قوة مغناطيسية لأنهما موازيان للمجال المغناطيسي. ومن ثمَّ لا تؤثر أي محصلة قوى في الملف، على الرغم من العزم الناتج.

سنتناول الآن الحالة التي تدور فيها الحلقة حول مركزها. أثناء دوران الحلقة في المجال المغناطيسي، لا تتغير القوتان المبذولتان على الضلعين الرأسيين للحلقة والعموديين على اتجاه المجال. يوضح الشكل 7.27 منظرًا سفليًا للملف، ويوضح القوتين المبذولتين على الحلقة المربعة التي يبلغ طول ضلعها a. في الشكل 7.27، تمثل θ الزاوية بين متجه الوحدة، $\hat{n}$، العمودي على مستوى الملف والمجال المغناطيسي، $\vec{B}$. يتعامد متجه الوحدة العمودي على مستوى الحلقة السلكية، ويمكن إيجاد اتجاهه من خلال القاعدة الثانية لليد اليمنى الموضحة في (الشكل 7.28)، وفقًا للتيار المتدفق حول الحلقة.

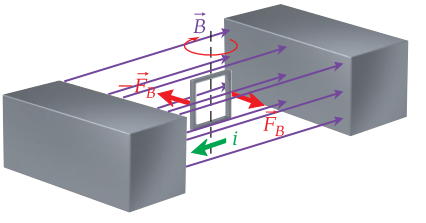
في الشكل 7.27، يتدفق التيار إلى خارج الصفحة في الضلع الأيمن للحلقة، والموضح بنقطة في دائرة (تمثل طرف رأس السهم). ويتدفق إلى داخل الصفحة في الضلع الأيسر للحلقة، والموضح بعلامة إكس في دائرة (تمثل ذيل السهم). مقدار القوة المؤثرة في كل من الحافتين الرأسيتين هو

$$F = iaB$$

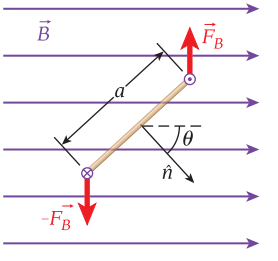
تكون القوتان المؤثرتان في الضلعين الأفقيين للحلقة متوازيين مع محور الدوران ولا تنتجان عزمًا، ويبلغ مجموعهما صفرًا. لذا لا توجد محصلة قوى تؤثر في الحلقة.

يعطينا مجموع العزمَين على الضلعين الرأسيين للحلقة المربعة محصلةَ العزم المبذول على الحلقة حول مركزها:

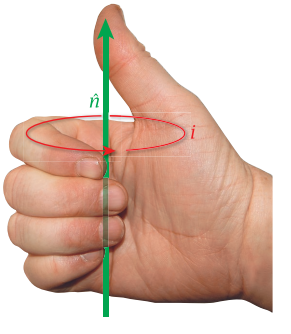
$$\tau_1 = (iaB)\left(\frac{a}{2}\right)\sin\theta + (iaB)\left(\frac{a}{2}\right)\sin\theta = ia^2B\sin\theta = iAB\sin\theta \quad (7.13)$$



الشكل 7.26 تركيب مُبسَّط لمحرك كهربائي يتكون من حلقة يسري فيها تيار وموضوعة في مجال مغناطيسي.



الشكل 7.27 منظر سفلي لحلقة يسري فيها تيار وموضوعة في مجال مغناطيسي، ويوضح القوى المؤثرة في الحلقة.



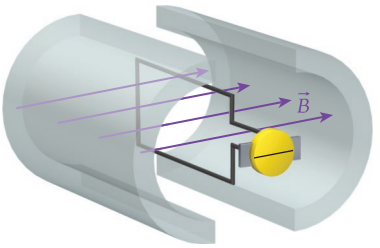
الشكل 7.28 القاعدة الثانية لليد اليمنى تحدِّد اتجاه متجه الوحدة العمودي لحلقة يسري فيها تيار. طبقًا للقاعدة، إذا دوَّرتَ أصابع يدك اليمنى في اتجاه سريان التيار في الحلقة، فسيشير إبهامك في اتجاه متجه الوحدة العمودي.

حيث يشير الرقم السفلي 1 في τ_1 إلى أنه العزم المبذول على حلقة واحدة، وتمثل $A = a^2$ مساحة الحلقة. يرجع سبب استمرار دوران الحلقة وعدم توقفها عند $\theta = 0°$ إلى اتصالها بتركيب يسمى **عاكس التيار**، الذي يغيّر اتجاه التيار أثناء دوران الملف. يتكون عاكس التيار من حلقة مقسومة إلى نصفين يتصل نصفاها بطرفَي الحلقة، كما هو موضح في الشكل 7.29. يغير التيار المار في الحلقة اتجاهَه مرتين لكل دوران كامل للحلقة.

إذا استُبدلت الحلقة الواحدة بملف يتكون من عدة حلقات متصلة تمامًا ببعضها، فسيكون إيجاد العزم المبذول على الملف بضرب العزم المبذول على الحلقة، τ_1 من المعادلة 7.13 في عدد اللفات (حلقات الملف)، N:

$$\tau = N\tau_1 = NiAB\sin\theta \tag{7.14}$$

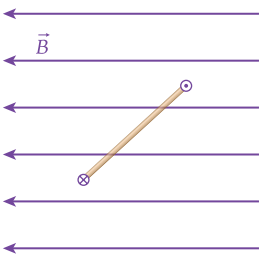
هل يُستخدم تعبير إيجاد العزم هذا مع أشكال أخرى مساحتها A، خلاف المربعات؟ الإجابة هي نعم، لكننا لن نثبت ذلك هنا.



الشكل 7.29 حلقة سلكية موصّلة بمصدر تيار كهربائي عبر حلقة عاكس التيار.



مراجعة المفاهيم 7.4



يوضح الشكل منظرًا علويًا لحلقة يسري فيها تيار وموضوعة في مجال مغناطيسي منتظم. سيؤدي العزم المؤثر في الحلقة إلى دورانها:

a) في اتجاه عقارب الساعة.

b) في عكس اتجاه عقارب الساعة.

c) لن تدور الحلقة.



7.6 عزم ثنائي القطب المغناطيسي Magnetic Dipole Moment

يمكن وصف الملف الذي يسري فيه التيار بمعامل يحوي على معلومات حول خاصية رئيسة للملف في المجال المغناطيسي. يُعرَّف **بعزم ثنائي القطب المغناطيسي**، $\vec{\mu}$، ويكون مقداره لملف سلكي يسري فيه تيار

$$\mu = NiA \tag{7.15}$$

حيث N عدد اللفات وi التيار المار في السلك وA مساحة الحلقات. يمثل اتجاه عزم ثنائي القطب المغناطيسي متجهَ الوحدة العمودي $\hat{n}$، ونحدّده باستخدام القاعدة الثانية لليد اليمنى. باستخدام المعادلة 7.15، يمكننا إعادة صياغة المعادلة 7.14 كما يلي

$$\tau = (NiA)B\sin\theta = \mu B\sin\theta \tag{7.16}$$

ونحصل على عزم ثنائي القطب المغناطيسي من خلال المعادلة

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \tag{7.17}$$

أي أنّ العزم المؤثر في ملف يسري فيه تيار هو حاصل الضرب الاتجاهي لعزم ثنائي القطب المغناطيسي للملف في المجال المغناطيسي.

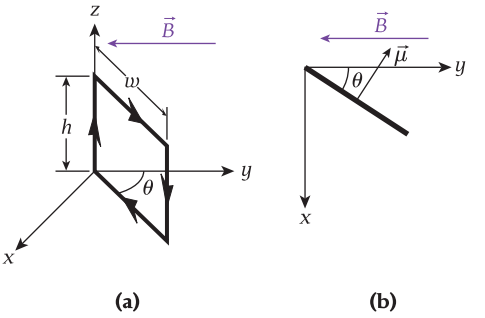
مسألة محلولة 7.3 العزم المؤثر في حلقة مستطيلة يسري فيها تيار مستمر

وُضعت حلقة مستطيلة طولها $h = 6.50$ cm وعرضها $w = 4.50$ cm في مجال مغناطيسي منتظم مقداره $B = 0.250$ T ويؤثر في اتجاه y السالب، كما هو موضح في (الشكل 7.30a). وتصنع الحلقة زاوية $\theta = 33.0°$ مع المحور y، كما هو موضح في الشكل. يسري في الحلقة تيار شدته $i = 9.00$ A في الاتجاه الموضح بالأسهم.

المسألة

ما مقدار العزم المؤثر في الحلقة حول المحور z؟

– يُتبع



الشكل 7.30 (a) حلقة مستطيلة يسرى فيها تيار موضوعة في مجال مغناطيسي. (b) منظر للحلقة المستطيلة بالنظر إليها على امتداد المستوى *xy*. يتعامد عزم ثنائي القطب المغناطيسي على مستوى الحلقة وتحدّد اتجاهه القاعدةُ الثانية لليد اليمنى.

الحل

فكّر العزم المؤثر في الحلقة يساوي ناتج الضرب الاتجاهي لعزم ثنائي القطب المغناطيسي والمجال المغناطيسي. وعزم ثنائي القطب المغناطيسي عمودي على مستوى الحلقة، ونحدّد اتجاهه باستخدام القاعدة الثانية لليد اليمنى.

ارسم يوضح الشكل 7.30b منظر الحلقة وهي متجهة إلى أسفل على المستوى *xy*.

ابحث مقدار عزم ثنائي القطب المغناطيسي للحلقة هو

$$\mu = NiA = iwh \quad \text{(i)}$$

مقدار العزم المؤثر في الحلقة هو

$$\tau = \mu B \sin\theta_{\mu B} \quad \text{(ii)}$$

حيث $\theta_{\mu B}$ الزاوية بين عزم ثنائي القطب المغناطيسي والمجال المغناطيسي. بالنظر إلى الشكل 7.30b، نجد أن

$$\theta_{\mu B} = \theta + 90^\circ \quad \text{(iii)}$$

بسّط يمكننا دمج المعادلات (i) و(ii) و(iii) للحصول على

$$\tau = iwhB\sin(\theta + 90^\circ)$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$\tau = (9.00\text{ A})\left(4.50\times10^{-2}\text{ m}\right)\left(6.50\times10^{-2}\text{ m}\right)(0.250\text{ T})[\sin(33.0^\circ + 90^\circ)]$$
$$= 0.0055195\text{ N m}$$

قرّب سنقرب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$\tau = 5.52\times10^{-3}\text{ N m}$$

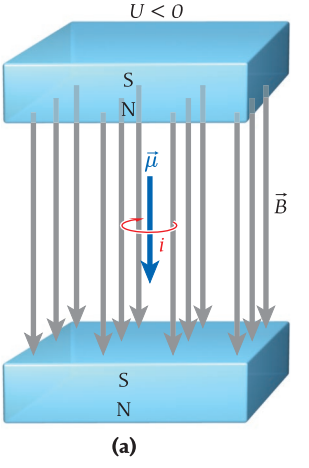
تحقّق ثانية مقدار القوة المؤثرة في كل من الحافتين الرأسيتين للحلقة يساوي

$$F_B = ihB = (9.00\text{ A})\left(6.50\times10^{-2}\text{ m}\right)(0.250\text{ T}) = 0.146\text{ N}$$

يساوي مقدار العزم عندئذٍ مقدار القوة المؤثرة في الحافة الرأسية التي ليست على امتداد المحور *z* مضروبًا في ذراع العزم (وهو *w*) مضروبًا في جيب الزاوية المحصورة بين القوة وذراع العزم:

$$\tau = Fw\sin(33.0^\circ + 90^\circ) = 0.146\text{ N}\left(4.50\times10^{-2}\text{ m}\right)[\sin(33.0^\circ + 90^\circ)] = 5.52\times10^{-3}\text{ N m}$$

وهذه هي النتيجة نفسها المحسوبة أعلاه.



الشكل 7.31 متجه عزم ثنائي القطب المغناطيسي في مجال مغناطيسي خارجي: (a) عندما يتوازى ثنائي القطب المغناطيسي مع المجال المغناطيسي الخارجي، تنتج طاقة وضع سالبة؛ (b) وعندما يكون ثنائي القطب المغناطيسي عكسي التوازي مع المجال المغناطيسي الخارجي، تنتج طاقة وضع موجبة.

لثنائي القطب المغناطيسي طاقة وضع في المجال المغناطيسي الخارجي. إذا كان عزم ثنائي القطب موازيًا للمجال المغناطيسي، فإن مقدار طاقة الوضع لثنائي القطب يكون أقل ما يكون. وإذا كان عزم ثنائي القطب في عكس اتجاه المجال الخارجي، فإن مقدار طاقة الوضع لثنائي القطب يكون أكبر ما يكون. نعلم أن الشغل الذي يبذله العزم يساوي

$$W = \int_{\theta_0}^{\theta} \tau(\theta')d\theta' \quad \textbf{(7.18)}$$

باستخدام نظرية الشغل والطاقة والمعادلة 7.16 وبوضع $\theta_0 = 90^\circ$، يمكننا التعبير عن طاقة الوضع المغناطيسية، *U*، لثنائي القطب المغناطيسي في مجال مغناطيسي خارجي، $\vec{B}$ كما يلي

$$W = \int_{\theta_0}^{\theta} \tau(\theta')d\theta' = \int_{\theta_0}^{\theta} \mu B\sin\theta'\,d\theta' = -\mu B\cos\theta\Big|_{\theta_0}^{\theta} = U(\theta) - U(90^\circ)$$

أو

$$U(\theta) = -\mu B\cos\theta = -\vec{\mu}\cdot\vec{B} \quad \textbf{(7.19)}$$

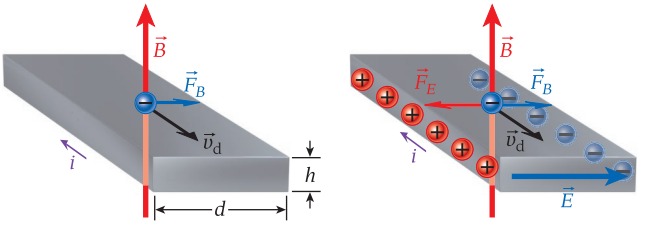
حيث θ الزاوية بين عزم ثنائي القطب المغناطيسي والمجال المغناطيسي الخارجي.

تصل طاقة وضع ثنائي القطب المغناطيسي في مجال مغناطيسي خارجي إلى أدنى قيمة لها، $-\mu B$، عندما يكون متجه العزم المغناطيسي لثنائي القطب موازيًا لمتجه المجال المغناطيسي الخارجي، وتنتج أعلى قيمة، $+\mu B$، عندما يكون المتجهان عكسيا التوازي (انظر الشكل 7.31). وتعتمد طاقة الوضع على الاتجاه

في حالات فيزيائية متنوعة، عندما تكون ثنائيات الأقطاب المغناطيسية في المجالات المغناطيسية الخارجية مجرد نموذج بسيط. إنّ ثنائيات الأقطاب المغناطيسية الوحيدة التي درسناها حتى الآن هي حلقات يسري فيها تيار. لكن توجد أنواع أخرى من ثنائيات الأقطاب المغناطيسية تشمل القضبان المغناطيسية وكذلك الأرض. كما أن للجسيمات الأولية المشحونة، مثل البروتونات، لها عزم ثنائي قطب مغناطيسي داخلي.

7.7 تأثير هول Hall Effect

افترض أن موصلًا يسري فيه تيار، i، يتدفق في اتجاه متعامد على مجال مغناطيسي $\vec{B}$ (الشكل 7.32a). تتحرك الإلكترونات في الموصل بسرعة متجهة $\vec{v}_d$ في الاتجاه المعاكس للتيار. وتتعرض الإلكترونات المتحركة لقوة متعامدة على سرعتها المتجهة، ما يجعلها تتحرك نحو حافة واحدة للموصل. بعد مرور فترة من الزمن، تكون إلكترونات كثيرة قد تحركت إلى حافة واحدة للموصل، ما يولد شحنة سالبة على هذه الحافة ويترك شحنة موجبة على الحافة المقابلة للموصل. ينتج عن توزيع الشحنة هذا مجال كهربائي، $\vec{E}$، يبذل قوة على الإلكترونات في اتجاه معاكس لاتجاه القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي. وعندما يكون مقدار القوة التي يبذلها المجال الكهربائي على الإلكترونات مساويًا لمقدار القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي، فإن العدد الكلي للإلكترونات على حواف الموصل لن يتغير مع مرور الزمن. تسمى هذه النتيجة **تأثير هول**. ويُطلق على فرق الجهد، ΔV_H، بين حواف الموصل عند الوصول إلى حالة الاتزان **فرق جهد هول**، ونحصل عليه من المعادلة



الشكل 7.32 (a) موصل يسري فيه تيار موضوع في مجال مغناطيسي. وناقلات الشحنة هي الإلكترونات. (b) انساقت الإلكترونات إلى جانب واحد من الموصل، تاركةً شحنة موجبة صافية على الجانب المقابل. ينتج عن توزيع الشحنات هذا مجال كهربائي. وفرق الجهد عبر الموصل هو فرق جهد هول.

$$\Delta V_H = Ed \tag{7.20}$$

حيث d عرض الموصل، وE مقدار المجال الكهربائي الناتج.

يمكن استخدام تأثير هول لإثبات أن ناقلات الشحنة في الفلزات تكون سالبة الشحنة. فإذا كانت ناقلات الشحنة في الفلز موجبة الشحنة وتتحرك في اتجاه التيار الموضح في الشكل 7.32a، فإن هذه الشحنات الموجبة ستتجمع على حافة الموصل نفسها مثل الإلكترونات في الشكل 7.32b، ناتجًا عنها مجال كهربائي مختلف الشحنة. لذا تكون ناقلات الشحنة سالبة، ومن ثَمَّ فهي إلكترونات. كما يُثبت تأثير هول أنه في بعض أشباه الموصلات، تكون ناقلات الشحنة عبارة عن فجوات (إلكترونات مفقودة)، والتي تبدو وكأنها ناقلات موجبة الشحنة.

يمكن استخدام تأثير هول أيضًا لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي عن طريق قياس التيار المتدفق في الموصل وفرق الجهد الناتج عبر الموصل. للحصول على قانون إيجاد المجال المغناطيسي، نبدأ بشرط الاتزان لتأثير هول، أي تَساوي مقدارَي القوة المغناطيسية والقوة الكهربائية:

$$F_E = F_B \Rightarrow eE = v_d Be \Rightarrow B = \frac{E}{v_d} = \frac{\Delta V_H}{v_d d} \tag{7.21}$$

حيث نعوض عن E من المعادلة 7.20 في الخطوة الأخيرة. وعلمنا أن سرعة الانسياق v_d، لإلكترون في موصل يمكن أن ترتبط بمقدار شدة التيار، J، في الموصل:

$$J = \frac{i}{A} = nev_d$$

حيث A مساحة المقطع العرضي للموصل، وn عدد الإلكترونات لكل وحدة حجم في الموصل. كما هو موضح في الشكل 7.32a، نحصل على مساحة المقطع العرضي من المعادلة $A = dh$، حيث d عرض الموصل وh سمكه. بحل $i/A = nev_d$ لإيجاد سرعة الانسياق، وبالتعويض بـ hd عن A نحصل على

$$v_d = \frac{i}{Ane} = \frac{i}{hdne}$$

سؤال الاختبار الذاتي 7.3

ما أقصى فرق في طاقة الوضع المغناطيسية بين اتجاهين مختلفين لحلقة مساحتها $0.100\ m^2$ يمر فيها تيار شدته $2.00\ A$ وموضوعة في مجال مغناطيسي مقداره $0.500\ T$؟

بالتعويض عن v_d في المعادلة 7.21، نحصل على

$$B = \frac{\Delta V_H}{v_d d} = \frac{\Delta V_H dhne}{id} = \frac{\Delta V_H hne}{i} \quad (7.22)$$

وهكذا، تعطي المعادلة 7.22 شدة المجال المغناطيسي (المقدار) من قيمة مقيسة لفرق جهد هول، ΔV_H، والسمك المعلوم، h، وكثافة ناقلات الشحنة، n، للموصل. وبالمثل، يمكن إعادة ترتيب المعادلة 7.22 واستخدامها لإيجاد جهد هول إذا كانت شدة المجال المغناطيسي معلومة:

$$\Delta V_H = \frac{iB}{neh} \quad (7.23)$$

مثال 7.5 تأثير هول

لنفترض أننا نستخدم مسبار هول لقياس مقدار مجال مغناطيسي منتظم. مسبار هول عبارة عن شريط نحاسي سمكه، h، يساوي 2.00 mm. مقدار الجهد المقيس عبر المسبار هو 0.250 μV عندما تمر فيه تيارًا شدته 1.25 A.

المسألة

ما مقدار المجال المغناطيسي؟

الحل

نحصل على المجال المغناطيسي من المعادلة 7.22:

$$B = \frac{\Delta V_H hne}{i}$$

نعرف من المعطيات قيم V_H وh، وi. ونعرف قيمة e. نُعرّف كثافة الإلكترونات، n، بأنها عدد الإليكترونات لكل وحدة حجم:

$$\frac{\text{عدد الإلكترونات}}{\text{الحجم}} = n$$

كثافة النحاس تساوي $\rho_{Cu} = 8.96\ g/cm^3 = 8960\ kg/m^3$، وكتلة المول الواحد من النحاس تساوي 63.5 g و6.02×10^{23} من الذرات. فلكل ذرة من النحاس إلكترون توصيل واحد. ومن ثمَّ فإن كثافة الإلكترونات تساوي

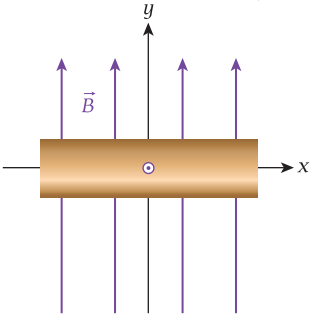
$$n = \left(\frac{\text{إلكترون واحد}}{\text{ذرة واحدة}}\right)\left[\frac{6.02\times10^{23}\ \text{ذرة}}{63.5\ g}\right]\left[\frac{8.96\ g}{1\ cm^3}\right]\left[\frac{1.0\times10^{6}\ cm^3}{1\ m^3}\right] = 8.49\times10^{28}\ \frac{\text{إلكترونًا}}{m^3}$$

يمكننا الآن حساب مقدار المجال المغناطيسي:

$$B = \frac{(0.250\times10^{-6}\ V)(0.002\ m)\left[8.49\times10^{28}\ \frac{\text{إلكترونًا}}{m^3}\right](1.602\times10^{-19}\ C)}{1.25\ A} = 5.44\ T$$

مراجعة المفاهيم 7.5

موصل يمر فيه تيار موضوع في مجال مغناطيسي منتظم، كما هو موضح في الشكل. سيكون المجال الكهربائي الناشئ عن تأثير هول:



a) في اتجاه x الموجب.

b) في اتجاه x السالب.

c) في اتجاه y الموجب.

d) في اتجاه y السالب.

ما تعلمناه | دليل المذاكرة للاختبار

- تُشير خطوط المجال إلى اتجاه المجال المغناطيسي في الفراغ. لا تنتهي خطوط المجال المغناطيسي عند الأقطاب المغناطيسية، بل تشكل حلقات مقفلة.
- نحصل على القوة المغناطيسية المؤثرة في جسيم شحنته q ويتحرك بسرعة متجهة $\vec{v}$ في مجال مغناطيسي منتظم، $\vec{B}$، من خلال المعادلة $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$. ونعرف اتجاه القوة باستخدام القاعدة الأولى لليد اليمنى.
- عندما يتحرك جسيم شحنته q بسرعة v عموديًا على مجال مغناطيسي مقداره B، فإن مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيم المشحون المتحرك يساوي $F = |q|vB$
- وحدة قياس شدة المجال المغناطيسي هي التسلا، واختصارها T.
- يبلغ متوسط مقدار المجال المغناطيسي للأرض عند السطح حوالي 0.5×10^{-4} T.
- عندما يتحرك جسيم كتلته m وشحنته q بسرعة v عموديًا على مجال مغناطيسي مقداره B، فإن مسار حركته يمثل دائرة نصف قطرها $r = mv / |q|B$
- نحصل على تردد المسرّع الدوراني، ω، لجسيم شحنته q وكتلته m يتحرك في مدار دائري في مجال مغناطيسي منتظم مقداره B من خلال المعادلة $\omega = |q|B/m$

- نحصل على القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي، $\vec{B}$، على طول سلك، $\vec{L}$، يسري فيه تيار، i، من خلال المعادلة $\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B}$. ومقدار هذه القوة هو $F = iLB \sin\theta$ حيث θ الزاوية المحصورة بين اتجاه التيار واتجاه المجال المغناطيسي.
- مقدار العزم المؤثر في حلقة يسري فيها تيار، i، في مجال مغناطيسي مقداره B هو $\tau = iAB \sin\theta$، حيث A مساحة الحلقة وθ الزاوية بين متجه الوحدة العمودي على الحلقة واتجاه المجال المغناطيسي. نعرف اتجاه متجه الوحدة العمودي على الحلقة باستخدام القاعدة الثانية لليد اليمنى.
- يمكننا إيجاد مقدار عزم ثنائي القطب المغناطيسي لملف يسري فيه تيار، i، من خلال المعادلة $\mu = NiA$، حيث N عدد الحلقات (اللفات) وA مساحة الحلقة. يمثل اتجاه عزم ثنائي القطب متجهَ الوحدة العمودي، ونحدّده باستخدام القاعدة الثانية لليد اليمنى.
- ينتج تأثير هول عندما يتدفق تيار i، في موصل سمكه h موجودٍ في مجال مغناطيسي مقداره B مُنتجًا فرق جهد عبر الموصل (فرق جهد هول)، ونحصل عليه من خلال المعادلة $\Delta V_H = iB/neh$، حيث n عدد الإلكترونات لكل وحدة حجم، وe مقدار شحنة الإلكترون.

إجابات أسئلة الاختبار الذاتي

7.1 الجسيم 1: $F_B = qvB\sin\theta =$
$(6.15\times10^{-6}\ \text{C})(465\ \text{m/s})(0.165\ \text{T})(\sin 30.0°) = 2.36\cdot10^{-4}\ \text{N}$
الجسيم 2: $F_B = qvB\sin\theta =$
$(6.15\times10^{-6}\ \text{C})(465\ \text{m/s})(0.165\ \text{T})(\sin 90.0°) = 4.72\cdot10^{-4}\ \text{N}$
الجسيم 3: $F_B = qvB\sin\theta =$
$(6.15\times10^{-6}\ \text{C})(465\ \text{m/s})(0.165\ \text{T})(\sin 150.0°) = 2.36\times10^{-4}\ \text{N}$

7.2 a) موجبة
b) تقلُّ سرعته
c) لا (لذا لابد أنّ قوة أخرى تؤثر في الجسيم لتقلل من سرعته).

7.3 $\Delta U = U_{max} - U_{min} = 2\mu B = 2iAB =$
$2(2.00\ \text{A})(0.100\ \text{m}^2)(0.500\ \text{T}) = 0.200\ \text{J}$

إرشادات حل المسائل

1. عند التعامل مع المجالات والقوى المغناطيسية، ستحتاج إلى إنشاء رسم تخطيطي واضح للمسألة في ثلاثة أبعاد. غالبًا ما يكون رسم السرعة المتجهة ومتجهات المجال المغناطيسي (أو طول السلك ومتجهات المجال) على حدة مفيدًا في تصور المستوى الذي يقعون عليه، حيث ستكون القوة المغناطيسية عمودية على ذلك المستوى.

2. تذكر أن قواعد اليد اليمنى تنطبق على الشحنات والتيارات الموجبة. فإذا كانت الشحنة سالبةً أو التيار سالبًا، فيمكنك استخدام قاعدة اليد اليمنى، وعندئذٍ ستكون القوة في الاتجاه المعاكس.

3. يتعرض الجسيم الموجود في مجال كهربائي ومجال مغناطيسي لقوة كهربائية، $\vec{F}_E = q\vec{E}$، وقوة مغناطيسية، $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$. لذا تأكد من جمع القوى الفردية جمعًا اتجاهيًا.

أسئلة الاختيار من متعدد

7.1 مجال مغناطيسي موجه في اتجاه معين في مستوى أفقي، ويتحرك إلكترون في اتجاه معين في المستوى الأفقي. في هذه الحالة، يوجد
a) اتجاه واحد محتمل للقوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون.
b) اتجاهان محتملان للقوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون.
c) عدد لانهائي من الاتجاهات المحتملة للقوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون.

7.2 جسيم شحنته q ظل في وضع السكون عند تشغيل مجال مغناطيسي فجأة. وكان تأثير المجال في اتجاه z. ما اتجاه محصلة القوى المؤثرة في الجسيم المشحون؟
a) في اتجاه x
b) في اتجاه y
c) محصلة القوى تساوي صفرًا.
d) في اتجاه z

7.3 أي مما يلي له أكبر تردد للمسرع الدوراني؟
a) إلكترون يتحرك بسرعة v في مجال مغناطيسي مقداره B
b) إلكترون يتحرك بسرعة $2v$ في مجال مغناطيسي مقداره B
c) إلكترون يتحرك بسرعة $v/2$ في مجال مغناطيسي مقداره B
d) إلكترون يتحرك بسرعة $2v$ في مجال مغناطيسي مقداره $B/2$
e) إلكترون يتحرك بسرعة $v/2$ في مجال مغناطيسي مقداره $2B$

7.4 في تأثير هول، نحصل على فرق الجهد الناتج عبر موصل ذي سمك محدَّد في مجال مغناطيسي ناتج عن تيار متدفق في الموصل من
a) قسمة حاصل ضرب كثافة الإلكترونات، وشحنة الإلكترون، وسمك الموصل على حاصل ضرب مقدار التيار ومقدار المجال المغناطيسي.
b) المعكوس الضربي للتعبير المذكور في الاختيار (a).
c) قسمة حاصل ضرب شحنة الإلكترون، وسمك الموصل على حاصل ضرب كثافة الإلكترونات ومقدارَي التيار والمجال المغناطيسي.
d) المعكوس الضربي للتعبير المذكور في الاختيار (c).
e) لا شيء مما سبق.

7.5 يتحرك إلكترون (شحنته $-e$ وكتلته m_e) في اتجاه x الموجب فدخل جهاز محدد السرعات. ويتكون جهاز محدد السرعات من مجالات إلكترونية ومغناطيسية متقاطعة: وكان تأثير $\vec{E}$ في اتجاه y الموجب، بينما كان تأثير $\vec{B}$ في اتجاه z الموجب. وبالنسبة إلى السرعة المتجهة v (في اتجاه x الموجب)، كانت محصلة القوى المؤثرة في الإلكترون صفرًا. ويتحرك الإلكترون في مسار مستقيم خلال محدد السرعات.

ما السرعة المتجهة التي سيتحرك بها بروتون (شحنته $+e$ وكتلته $m_p = 1836\ m_e$) في مسار مستقيم خلال منتقي السرعات؟

a) v c) $v/1836$
b) $-v$ d) $-v/1836$

7.6 في أي اتجاه تؤثر القوة المغناطيسية في إلكترون يتحرك في اتجاه x الموجب في مجال مغناطيسي يؤثر في اتجاه z الموجب؟

a) اتجاه y الموجب c) اتجاه x السالب
b) اتجاه y السالب d) أي اتجاه في المستوى xy

7.7 A يتحرك جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم. أي من العبارات التالية صحيحة حول القوة المغناطيسية المبذولة على الجسيم؟ (افترض أن المجال المغناطيسي ليس موازيًا للسرعة المتجهة أو عكسي التوازي معها).

a) لا تبذل شغلًا على الجسيم.
b) قد تزيد من سرعة الجسيم.
c) قد تُغيّر السرعة المتجهة للجسيم.
d) يمكن أن تؤثر في الجسيم أثناء وجوده في حالة حركة فقط.
e) لا تُغيّر الطاقة الحركة للجسيم.

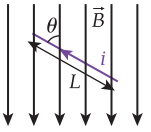
7.8 يتحرك إلكترون في مسار دائري نصف قطره r_i في مجال مغناطيسي منتظم. ما نصف القطر النهائي للمسار عندما يتضاعف مقدار المجال المغناطيسي؟

a) $\frac{r_i}{4}$ c) r_i
b) $\frac{r_i}{2}$ d) $2r_i$
e) $4r_i$

7.9 تصل بروتونات الرياح الشمسية إلى المجال المغناطيسي للأرض بسرعة 400 km/s. إذا كانت مقدار هذا المجال هو 5.0×10^{-5} T وكانت سرعة البروتونات المتجهة عمودية عليها، فما تردد المسرع الدوراني للبروتونات بعد دخول المجال؟

a) 122 Hz c) 321 Hz e) 763 Hz
b) 233 Hz d) 432 Hz

7.10 جزء معزول من سلك طوله $L = 4.50$ m يسري فيه تيار مقداره $i = 35.0$ A ويميل بزاوية $\theta = 50.3°$ بالنسبة إلى مجال مغناطيسي ثابت مقداره $B = 6.70 \times 10^{-2}$ T (انظر الشكل). ما مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في السلك؟

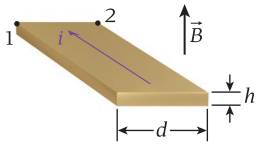


a) 2.66 N
b) 3.86 N
c) 5.60 N
d) 8.12 N
e) 11.8 N

7.11 يتكون ملف من حلقات دائرية نصف قطرها $r = 5.13$ cm و$N = 47$ لفة. ويتدفق تيار، $i = 1.27$ A عبر الملف الموضع في مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.911 T. ما أقصى عزم يؤثر في الملف نتيجة المجال المغناطيسي؟

a) 0.148 N m
b) 0.211 N m
c) 0.350 N m
d) 0.450 N m
e) 0.622 N m

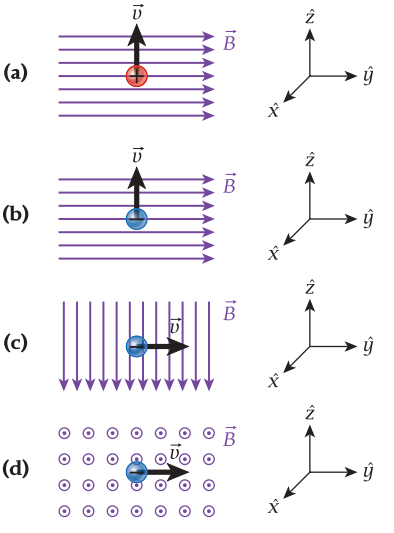
7.12 موصل نحاسي يتدفق فيه تيار، $i = 1.41$ A، متعامدًا على مجال مغناطيسي منتظم مقداره $B = 4.94$ T، كما هو موضح في الشكل. يبلغ عرض الموصل $d = 0.100$ m ويبلغ سمكه $h = 2.00$ mm. ما مقدار فرق الجهد الكهربائي بين النقطتين 1 و2؟



a) 2.56×10^{-9} V
b) 5.12×10^{-9} V
c) 7.50×10^{-8} V
d) 2.56×10^{-7} V
e) 9.66×10^{-7} V

أسئلة مفاهيمية

7.13 ارسم القوة المغناطيسية المؤثرة في كل الجسيمات المتحركة الموضحة في الأشكال على النظام الإحداثي xyz وحدد اتجاهها (بدلالة متجهات الوحدة $\hat{x}$ و$\hat{y}$ و$\hat{z}$). *ملحوظة:* يتجه محور y الموجب إلى اليمين، ويتجه محور z الموجب إلى أعلى الصفحة، ويتجه محور x الموجب إلى خارج الصفحة.



7.14 جسيم كتلته m، وشحنته q، وسرعته المتجهة v، دخل مجالًا مغناطيسيًا مقداره B ويؤثر في اتجاه متعامد على السرعة الابتدائية للجسيم. ما الشغل الذي يبذله المجال المغناطيسي على الجسيم؟ كيف يؤثر ذلك في حركة الجسيم؟

7.15 يتحرك إلكترون بسرعة متجهة ثابتة. عندما يدخل في مجال كهربائي متعامد على سرعته المتجهة، سيسلك الإلكترون مسارًا _____. وعندما يدخل الإلكترون في مجال مغناطيسي متعامد على سرعته المتجهة، سيسلك مسارًا _____.

7.16 بروتون يتحرك في اتجاه y السالب في مجال مغناطيسي تعرض لقوة مقدارها F تؤثر في اتجاه x السالب.

a) ما اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن هذه القوة؟
b) هل ستتغير إجابتك إذا كان الجسيم المعطى في المسألة "إلكترونًا"، لا "بروتونًا"؟

7.17 في المنطقة التي تكون فيها كثافة التيار صفرًا، من الممكن رياضيًا تحديد جهد مغناطيسي قياسي مشابه للجهد الكهروستاتيكي: $V_B(\vec{r}) = -\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{B} \cdot d\vec{s}$ أو $\vec{B}(\vec{r}) = -\nabla V_B(\vec{r})$ لكن لم يحدث ذلك. اشرح لماذا لم يحدث ذلك.

7.18 وُضع سلك يسري فيه تيار داخل مجال مغناطيسي كبير ومنتظم، $\vec{B}$. لكن لم يتأثر السلك بأي قوة. اشرح كيف يمكن أن يحدث ذلك.

7.19 يتحرك جسيم مشحون تحت تأثير مجال كهربائي فقط. هل من الممكن أن يتحرك الجسيم بسرعة ثابتة؟ ماذا يحدث لو استُبدل المجال الكهربائي بمجال مغناطيسي؟

7.20 يتحرك جسيم مشحون بسرعة v، بزاوية θ بالنسبة إلى المحور z. فدخل عند اللحظة الزمنية $t = 0$ منطقة فراغ يوجد فيها مجال مغناطيسي مقداره B في اتجاه zالموجب. متى سيخرج من منطقة الفراغ هذه؟

7.21 إذا تحرك إلكترون أفقيًا من الشمال الغربي تجاه الجنوب الشرقي في منطقة فراغ يكون فيها تأثير المجال المغناطيسي للأرض أفقيًا نحو الشمال، فما اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة في الإلكترون؟

7.22 عند سطح الأرض، يوجد مجال كهربائي تأثيره إلى أسفل تقريبًا ومقداره 150 V/m. افترض أن لديك مدفع إلكترونات يمكن ضبطه (بحيث يمكنك إطلاق الإلكترونات بأي طاقة حركية تريدها) وجهاز كشف لتحديد اتجاه حركة الإلكترونات عند مغادرتها للمدفع. اشرح كيف يمكنك استخدام المدفع لإيجاد الاتجاه نحو القطب المغناطيسي الشمالي. وما الطاقة الحركية التي تحتاج إليها الإلكترونات على وجه التحديد؟ (*تلميح:* قد يكون من الأسهل التفكير في تحديد الاتجاه الشرقي أو الغربي).

7.23 يساوي الشغل الذي يبذله المجال المغناطيسي على جسيم مشحون متحرك في المسرع الدوراني صفرًا . كيف يمكن إذًا استخدام المسرع الدوراني كمسرع للجسيمات، وما الميزة الأساسية لحركة الجسيم التي تجعل هذا ممكنًا؟

تمارين

يشير رقم المسألة الأزرق إلى توفر حل في دليل حلول الطالب. وتشير علامة النقطة الواحدة • والنقطتين •• إلى زيادة مستوى صعوبة المسألة.

القسم 7.2

7.24 يتحرك بروتون بسرعة 4.00×10^5 m/s في اتجاه y الموجب فدخل مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا مقداره 0.400 T ويؤثر في اتجاه xالموجب. احسب مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في البروتون.

7.25 مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة في جسيم شحنته $-2e$ ويتحرك بسرعة $v = 1.00 \cdot 10^5$ m/s هو 3.00×10^{-18} N . ما مقدار مركّبة المجال المغناطيسي العمودية على اتجاه حركة الجسيم؟

•**7.26** يتحرك جسيم شحنته +10.0 μC بسرعة 300. m/s في اتجاه z الموجب.

a) أوجد أقل مقدار للمجال المغناطيسي اللازم للحفاظ على حركة الجسيم في مسار مستقيم بسرعة ثابتة إذا كان هناك مجال كهربائي منتظم مقداره 100 V/m يؤثر في اتجاه y الموجب.

b) أوجد أقل مقدار للمجال المغناطيسي اللازم للحفاظ على حركة الجسيم في مسار مستقيم بسرعة ثابتة إذا كان هناك مجال كهربائي منتظم مقداره 100 V/m يؤثر في اتجاه z الموجب.

•**7.27** يتحرك جسيم شحنته 20.0 μC على امتداد المحور x بسرعة 50.0 m/s. فدخل مجالًا مغناطيسيًا مقداره $\vec{B} = 0.300\hat{y} + 0.700\hat{z}$ بوحدة التسلا. أوجد القوة المغناطيسية المؤثرة في الجسيم مقدارًا واتجاهًا.

••**7.28** نحصل على المجال المغناطيسي في منطقة في الفراغ (حيث $x > 0$ و$y > 0$) من خلال المعادلة $\vec{B} = (x - az)\hat{y} + (xy - b)\hat{z}$، حيث a وb ثابتان موجبان. إذا دخل إلكترون متحرك بسرعة متجهة ثابتة، $\vec{v} = v_0\hat{x}$، هذه المنطقة، فما إحداثيات النقاط التي تكون عندها محصلة القوى المؤثرة في الإلكترون مساوية صفرًا؟

القسم 7.3

7.29 بروتون يتسارع من السكون بفرق جهد 400. V. وعندما دخل مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا، سلك مسارًا دائريًا نصف قطره 20.0 cm. أوجد مقدار المجال المغناطيسي.

7.30 إلكترون سرعته 4.00×10^5 m/s دخل مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا مقداره 0.0400 T بزاوية 35.0° بالنسبة إلى خطوط المجال المغناطيسي. إذا سلك الإلكترون مسارًا حلزونيًا، فأوجد ما يلي:

a) نصف قطر المسار الحلزوني.

b) المسافة التي سيتحركها الإلكترون إلى الأمام بعد إكمال دورة واحدة.

7.31 جسيم كتلته m وشحنته q يتحرك داخل مجال كهربائي ومجال مغناطيسي. $\vec{E}$ و$\vec{B}$. إذا كانت سرعة الجسيم $\vec{v}$، وكمية حركته $\vec{p}$، وطاقته الحركية K. فأوجد التعبيرات العامة لـ $d\vec{p}/dt$ وdK/dt بدلالة هذه الكميات السبع.

7.32 أُمطرت الأرض بكمية كبيرة من جزيئات كونية تُعرف باسم *الميونات*. ولهذه الجسيمات شحنة مماثلة لشحنة الإلكترون، لكنها أثقل بكثير ($m = 1.88 \times 10^{-28}$ kg). افترض أنه تم توليد مجال مغناطيسي قوي مقداره $B = 0.500$ T في مختبر ودخل ميونٌ هذا المجال بسرعة متجهة 3.00×10^6 m/s بزاوية قائمة بالنسبة إلى المجال. كم سيكون نصف قطر المدار الناتج للميون؟

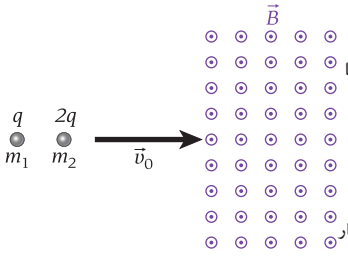
7.33 يتحرك إلكترون في مجال مغناطيسي عكس اتجاه عقارب الساعة في دائرة على المستوى xy. إذا كان تردد المسرّع الدوراني $\omega = 1.20 \times 10^{12}$ Hz، فما مقدار المجال المغناطيسي، $\vec{B}$؟

7.34 إلكترون طاقته تساوي 4.00×10^2 eV وإلكترون طاقته تساوي 2.00×10^2 eV محصوران في مجال مغناطيسي منتظم ويتحركان في مسارين دائريين في مستوى عمودي على المجال المغناطيسي. ما النسبة بين نصفي قطري مداريهما؟

•**7.35** بروتون سرعته المتجهة الأولية $(10^5 \text{ m/s})(1.00\hat{x} + 2.00\hat{y} + 3.00\hat{z})$ دخال مجالًا مغناطيسيًا مقداره $(0.500 \text{ T})\hat{z}$. صف حركة البروتون.

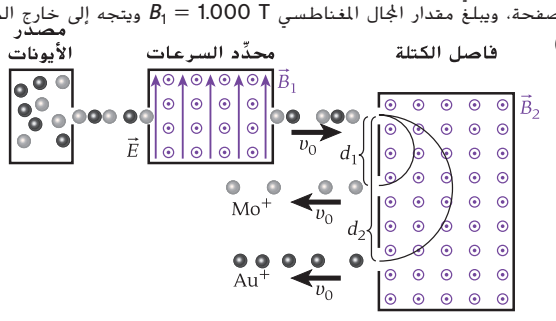
•**7.36** كرة نحاسية صغيرة كتلتها 3.00×10^{-6} kg وشحنتها 5.00×10^{-4} C تسارعت بدءًا من وضع السكون عبر فرق جهد 7000.–V قبل دخولها مجالًا مغناطيسيًا مقداره 4.00 T موجهًا بشكل عمودي على سرعتها المتجهة. ما نصف قطر انحناء حركة الكرة في المجال المغناطيسي؟

•**7.37** جسيمان كتلتاهما m_1 وm_2 وشحنتاهما q و$2q$ يتحركان بالسرعة المتجهة نفسها، v، فدخلا مجالًا مغناطيسيًا شدته B عند النقطة نفسها، كما هو موضح في الشكل. وفي المجال المغناطيسي، تحركا في مسارَين على شكل نصف دائرة نصفا قطرَيهما R و$2R$. ما النسبة بين كتلتيهما؟ هل من الممكن تطبيق مجال كهربائي يؤدي إلى تحرك الجسيمات في مسار مستقيم في المجال المغناطيسي؟ إذا كانت الإجابة هي نعم، فما مقدار المجال واتجاهه؟



•**7.38** يوضح الشكل رسمًا تخطيطيًا لمطياف كتلة بسيط يتكون من منتقي سرعات وجهاز كشف عن الجسيمات حال استخدامه لفصل ذرات الذهب (Au) والموليبدنوم (Mo) أحادية التأين ($q = +e = 1.602 \times 10^{-19}$ C). يبلغ مقدار المجال الكهربائي داخل محدد السرعات $E = 1.789 \times 10^4$ V/m ويتجه إلى أعلى الصفحة، ويبلغ مقدار المجال المغناطيسي $B_1 = 1.000$ T ويتجه إلى خارج الصفحة.

a)



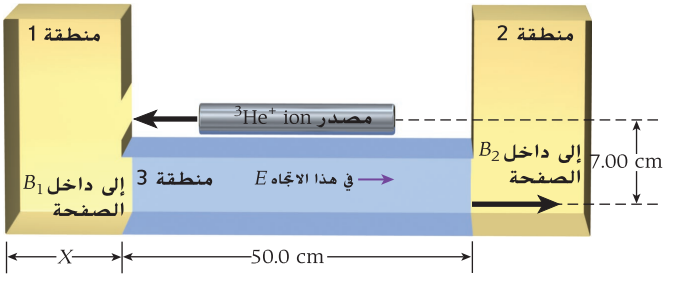
ارسم متجه القوة الكهربائية، $\vec{F}_E$، ومتجه القوة المغناطيسية، $\vec{F}_B$، المؤثرتين في الأيونات داخل محدد السرعات.

b) احسب السرعة المتجهة، v_0، للأيونات التي تتحرك في مسار مستقيم. هل تعتمد v_0 على نوع الأيون (الذهب مقابل الموليبدنوم)، أم تكون السرعة هي نفسها لكلا نوعَي الأيونات؟

c) اكتب معادلة حساب نصف قطر المسار نصف الدائري لأيون في جهاز الكشف عن الجسيمات: $R = R(m, v_0, q, B_2)$.

d) تخرج أيونات الذهب (الممثلة بالكرات الرمادية داكنة اللون) من جهاز الكشف عن الجسيمات عند مسافة $d_2 = 40.00$ cm من فتحة المدخل، بينما تخرج أيونات الموليبدنوم (الممثلة بالكرات الرمادية فاتحة اللون) من جهاز الكشف عن الجسيمات عند مسافة $d_1 = 19.81$ cm من فتحة المدخل. إذا كانت كتلة أيون الذهب تبلغ $m_{gold} = 3.271 \times 10^{-25}$ kg، فاحسب كتلة أيون الموليبدنوم.

7.39 •• يوضح الشكل مسرع جسيمات صغير يسرع أيونات $^3He^+$. تخرج أيونات $^3He^+$ من مصدر الأيونات بطاقة حركية تبلغ 4.00 keV. وتحتوي المنطقتان 1 و2 على مجالات مغناطيسية موجهة إلى داخل الصفحة، وتحتوي المنطقة 3 على مجال كهربائي موجه من اليسار إلى اليمين. ويخرج شعاع أيونات $^3He^+$ من المسرّع من فتحة موجودة على اليمين تقع على مسافة 7.00 cm أسفل مصدر الأيونات، كما هو موضح في الشكل.



a) إذا كان $B_1 = 1.00$ T وكان طول المنطقة 3 هو 50.0 cm ومقدار مجالها الكهربائي $E = 60.0$ kV/m. فما قيمة B_2 اللازمة لتتحرك الأيونات في مسار مستقيم وتخرج من فتحة الخروج بعد تسريعها مرتين في المنطقة 3؟

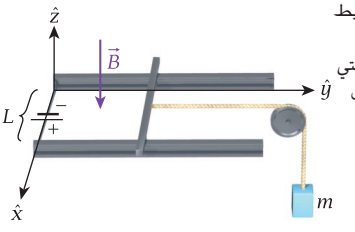
b) ما أقل عرض X يجب أن يكون للمنطقة 1؟

c) ما السرعة المتجهة للأيونات عندما تغادر المسرع؟

القسم 7.4

7.40 وُضع سلك مستقيم طوله 2.00 m يسري فيه تيار 24.0 A على سطح طاولة أفقي في مجال مغناطيسي أفقي منتظم. ويصنع السلك زاوية 30.0° مع خطوط المجال المغناطيسي. إذا كان مقدار قوة المؤثرة في السلك 0.500 N. فما مقدار المجال المغناطيسي؟

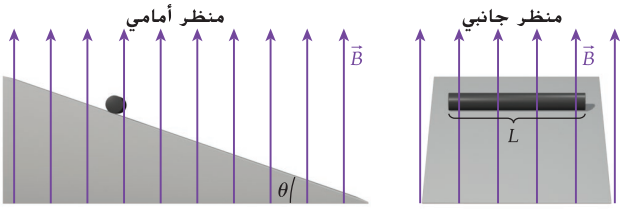
7.41 كما هو موضح في الشكل، يمكن أن ينزلق موصل مستقيم موازٍ للمحور x من دون احتكاك فوق ساقي توصيل أفقيين موازيين للمحور y وتفصل بينهما مسافة $L = 0.200$ m، في مجال مغناطيسي رأسي مقداره 1.00 T. ويسري في الموصل تيار منتظم شدته 20.0 A. إذا رُبط خيط في منتصف الموصل تمامًا ومر فوق بكرة عديمة الاحتكاك، فما مقدار الكتلة m التي تُعلق في الخيط بحيث تسمح للموصل بأن يكون في وضع السكون؟



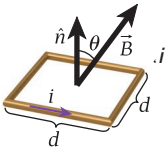
7.42 سلك نحاسي نصف قطره 0.500 mm يسري فيه تيار عند خط الاستواء للأرض. افترض أن المجال المغناطيسي للأرض يساوي 0.500 G عند خط الاستواء وموازٍ لسطح الأرض، وأن التيار الساري في السلك يتدفق تجاه الشرق. فما التيار اللازم للسماح للسلك بالارتفاع في الهواء؟

7.43 • صفيحة نحاسية طولها 1.00 m، وعرضها 0.500 m، وسمكها 1.00 mm موجهة بحيث تكون أكبر مساحة سطح لها عمودية على مجال مغناطيسي شدته 5.00 T. إذا كانت شدة التيار الساري بطول الصفيحة هي 3.00 A. فما مقدار القوة المؤثرة في هذه الصفيحة؟ ما وجه المقارنة بين هذا المقدار ومقدار القوة المؤثرة في سلك نحاسي رفيع يحمل التيار نفسه وموجه عموديًا على المجال المغناطيسي نفسه؟

7.44 • ساق موصّل طوله L ينزلق بحرية إلى أسفل مستوى مائل، كما هو موضح في الشكل. وكانت زاوية ميل المستوى θ بالنسبة إلى المستوى الأفقي. إذا كان هناك مجال مغناطيسي منتظم شدته B يؤثر في اتجاه y الموجب، فأوجد مقدار التيار الكهربائي واتجاهه الذي يجب أن يمر عبر الساق ليثبته في مكانه على المستوى المائل.



7.45 • حلقة سلكية مربعة حرة الدوران طول ضلعها $d = 8.00$ cm، ويسري فيها تيار كهربائي مقداره $i = 0.150$ A. وُضعت بين قطبي مغناطيس كهربائي يولد مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا مقداره 1.00 T. وكان متجه الحلقة العمودي، $\hat{n}$، يصنع في البداية زاوية مقدارها 35.0° مع اتجاه متجه المجال المغناطيسي (كما هي موضحة في الشكل). إذا كان السلك نحاسيًا (كثافته $\rho = 8960$ kg/m^3)، وقطره 0.500 mm. فما مقدار العجلة الزاوية الابتدائية للحلقة لحظة انطلاقها؟



7.46 • مدفع كهرومغناطيسي يُسرّع مقذوفًا من وضع السكون باستخدام القوة المغناطيسية المبذولة على سلك يسري فيه تيار كهربائي. وللسلك نصف قطر $r = 5.10 \cdot 10^{-4}$ m وهو مصنوع من النحاس الذي كثافته $\rho = 8960$ kg/m^3. يتكون المدفع من ساقين طول كل منهما $L = 1.00$ m موضوعَين في مجال مغناطيسي ثابت مقداره $B = 2.00$ T وموجه عموديًا على مستوى الساقين. وينشئ السلك توصيلًا كهربائيًا عبر الساقين عند طرفيهما. وعند الإطلاق، يتدفق تيار كهربائي مقداره 1.00×10^4 A عبر السلك، ما يُسرّع حركة السلك على امتداد الساقين. احسب السرعة النهائية للسلك لحظة مغادرته للساقين. (تجاهل الاحتكاك).

القسمان 7.5 و7.6

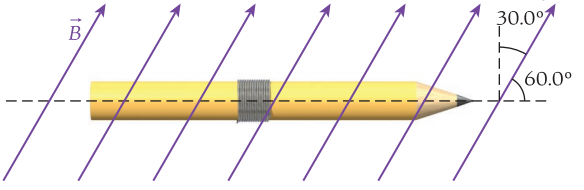
7.47 • حلقة سلكية مربعة طول ضلعها ℓ تقع في المستوى xy، بحيث يقع مركزها عند نقطة الأصل وتتوازى أضلاعها مع المحورين x وy. ويسري فيها تيار كهربائي، i، نراه يتدفق عكس اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليها على امتداد المحور z من الاتجاه الموجب. تقع الحلقة في مجال مغناطيسي تحدده المعادلة $\vec{B} = (B_0/a)(z\hat{x} + x\hat{z})$، حيث B_0 شدة مجال ثابت، وa ثابت مع بُعد الطول، و$\hat{x}$ و$\hat{z}$ متجها وحدة في اتجاه x الموجب واتجاه z الموجب. احسب محصلة القوى المبذولة على الحلقة.

7.48 ملف مستطيل مُكوَّن من 20 لفة يسري فيه تيار كهربائي مقداره 2.00 mA متدفقًا عكس اتجاه عقارب الساعة. يتوازى جانبان من الملف مع المحور y وطول كل منهما 8.00 cm. بينما يتوازى الجانبان الآخران مع المحور x وطول كل منهما 6.00 cm. ويؤثر في الملف مجال مغناطيسي منتظم مقداره 50.0 μT في اتجاه x الموجب. ما العزم الذي يجب بذله على الملف لتثبيته في مكانه؟

7.49 ملف يتكون من 120 لفة دائرية من سلك نصف قطره 4.80 cm. ويمر تيار كهربائي مقداره 0.490 A عبر الملف، والملف موجه رأسيًا ويدور بحرية حول محور رأسي (موازٍ للمحور z) ويتعرض الملف لمجال مغناطيسي أفقي منتظم يؤثر في اتجاه x الموجب. إذا وجّه الملف موازيًا للمحور x، فستؤثر قوة مقدارها 1.20 N في حافة الملف في اتجاه y الموجب وبإمكانها منع الملف من الدوران. احسب شدة المجال المغناطيسي.

7.50 تم لف عشرين لفة سلكية بقوة حول قلم رصاص قطره 6.00 mm. ثم وُضع القلم في مجال مغناطيسي منتظم مقداره 5.00 T، كما هو موضح في الشكل. إذا مر تيار كهربائي شدته 3.00 A في حلقات السلك، فما مقدار العزم المبذول على القلم الرصاص؟

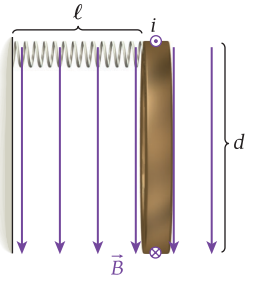
7.51 • سلك نحاسي كثافته $\rho = 8960$ kg/m^3 تم لفه ليكوّن حلقة دائرية نصف قطرها 50.0 cm. تبلغ مساحة المقطع العرضي للسلك 1.00×10^{-5} m^2. وبُذل على السلك فرق جهد مقداره 0.0120 V. ما أقصى عجلة زاوية للحلقة عند وضعها في مجال مغناطيسي مقداره 0.250 T تدور الحلقة حول محور في المستوى يتطابق مع قطرها.



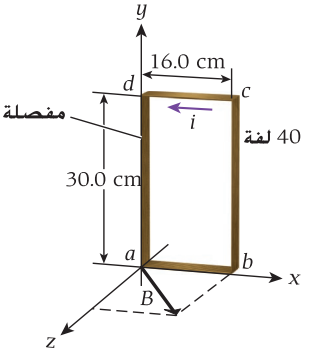
7.52 جلفانومتر بسيط مصنوع من ملف يتكون من N من لفات سلكية مساحتها A. ويتصل الملف بكتلة، M، بواسطة ساق صلب خفيف طوله L. في حالة عدم مرور تيار كهربائي في الملف، تتدلى الكتلة إلى أسفل بشكل مستقيم، ويقع الملف في مستوى أفقي. والملف موضوع في مجال مغناطيسي منتظم مقداره B وموجه أفقيًا. احسب الزاوية من المستوى الرأسي للساق الصلب كدالة للتيار، i، في الملف.

7.53 أثبتْ أن عزم ثنائي القطب المغناطيسي لإلكترون يدور في ذرة الهيدروجين يتناسب طرديًا مع كمية الحركة الزاوية للإلكترون، $\vec{\mu} = -eL/(2m)$:L ، حيث $-e$ شحنة الإلكترون وm كتلته.

7.54 • يوضح الشكل منظرًا علويًا لحلقة سلكية يمر فيها تيار كهربائي قطرها $d = 8.00\ \text{cm}$، وتتدلى من السقف بخيط رفيع. يتدفق تيار كهربائي مقداره 1.00-A في الحلقة في الاتجاه المشار إليه في الشكل. والحلقة متصلة بأحد طرفي زنبرك ثابته 100. N/m. عندما تكون الحلقة في الموضع الموضّح في الشكل، يصل الزنبرك إلى طول اتزانه، ℓ. أوجد استطالة الزنبرك عندما يوثر فيه مجال مغناطيسي مقداره $B = 2.00\ \text{T}$ في اتجاه موازٍ لمستوى الحلقة، كما هو موضح في الشكل.



7.55 • ملف سلكي يتكون من 40 لفة مستطيلة، عرضه 16.0 cm وطولها 30.0 cm. ووُضع الملف في مجال مغناطيسي منتظم تحدده المعادلة $\vec{B} = 0.0650\text{T}\,\hat{x} + 0.250\text{T}\,\hat{z}$. يتصل الملف عن طريق مفصلة بقضيب رفيع ثابت على طول المحور y (بطول القطعة المستقيمة da الموضحة في الشكل)، ويقع أساسًا في المستوى xy. ويمرّ تيار كهربائي مقداره 0.200 A عبر السلك.



a) ما مقدار القوة، $\vec{F}_{ab}$، واتجاهها التي يبذلها $\vec{B}$ على القطعة ab من الملف؟

b) ما مقدار القوة، $\vec{F}_{bc}$، واتجاهها التي يبذلها $\vec{B}$ على القطعة bc من الملف؟

c) ما مقدار محصلة القوى، F_{net}، التي يبذلها $\vec{B}$ على الملف؟

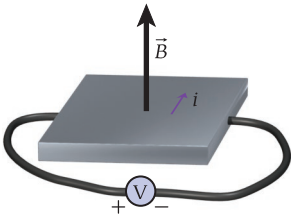
d) ما مقدار العزم، $\vec{\tau}$، واتجاهه الذي يبذله $\vec{B}$ على الملف؟

e) في أي اتجاه، إن وُجد، سيدور الملف حول المحور y (عندما يُنظر إليه من أعلى على امتداد هذا المحور)؟

القسم 7.7

7.56 ترانزستور في دائرة إلكترونية عالية يتحكم في تيارات كهربائية ضخمة من خلال بذل جهد صغير على صفيحة رقيقة من الإلكترونات. وتعتبر كثافة الإلكترونات وتنقلها في الصفيحة عنصرين أساسيين في عمل أجهزة ترانزستور التنقلية الإلكترونية العالية. تتم دراسة أجهزة ترانزستور التنقلية الإلكترونية العالية المصنوعة من (نيتريد ألومنيوم الغاليوم ونيتريد الغاليوم والسيليكون) لأنها تبشّر بأداء أفضل مع التيارات الكهربائية ودرجات الحرارة والترددات العالية، ما يميزها عن غيرها من أجهزة الترانزستور المصنوعة من السيليكون فقط. وفي إحدى الدراسات، استُخدم تأثير هول لقياس كثافة الإلكترونات في أحد أجهزة الترانزستور الجديدة هذه. عند تدفق تيار كهربائي مقداره 10.0 μA بطول صفحية من الإلكترونات طولها 1.00 mm، وعرضها 0.300 mm، وسُمكها 10.0 nm، ينشأ مجال مغناطيسي متعامدًا على اللوح مقداره 1.00 T ويُنتِج جهدًا كهربائيًا مقداره 0.680 mV بعرض الصفيحة. ما كثافة الإلكترونات في الصفيحة؟

7.57 • يوضح الشكل رسمًا تخطيطًا لتركيب مُعدّ لقياس تأثير هول باستخدام طبقة رقيقة من أكسيد الزنك كثافته 1.50 μm. تبلغ شدة التيار الكهربائي، i، المار عبر الطبقة الرقيقة 12.3 mA، ويصل جهد هول، V_{H}، إلى $-20.1\ \text{mV}$ عندما يؤثر مجال مغناطيسي مقداره $B = 0.900\ \text{T}$ عموديًا على التيار المتدفق.



a) ما ناقلات الشحنة في الطبقة الرقيقة؟ [*تلميح:* يمكن أن تكون الناقلات إلكترونات شحنتها $-e$، أو فجوات إلكترونية (إلكترونات مفقودة) شحنتها $+e$].

b) احسب كثافة ناقلات الشحنة في الطبقة الرقيقة.

تمارين إضافية

7.58 يُستخدم مسرِّع دوراني موضوعٌ في مجال مغناطيسي مقداره 9.00 T لزيادة سرعة البروتونات إلى 50.0% من سرعة الضوء. ما تردد المسرِّع الدوراني لهذه البروتونات؟ وما نصف قطر مسار البروتونات في المسرِّع الدوراني؟ ما تردد المسرِّع الدوراني ونصف قطر المسار للبروتونات نفسها في المجال المغناطيسي للأرض؟ افترض أن المجال المغناطيسي للأرض يساوي 0.500 G.

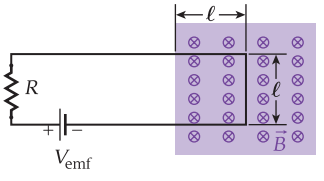
7.59 وُضع سلك مستقيم يمر فيه تيار كهربائي شدته 3.41 A ليصنع زاوية قياسها 10.0° مع المستوى الأفقي بين طرفي قطبي مغناطيس ينتج مجالًا مقداره 0.220 T إلى أعلى. وكان قطر كل طرف من طرفي قطبي المغناطيس 10.0 cm. إذا تسببت القوة المغناطيسية في تحريك السلك إلى خارج الفراغ الموجود بين القطبين، فما مقدار هذه القوة؟

7.60 يتحرك إلكترون بسرعة $v = 6.00\text{x}10^{7}\ \text{m/s}$ عموديًا على المجال المغناطيسي للأرض. إذا كانت شدة المجال $0.500\text{x}10^{-4}\ \text{T}$، فما نصف قطر المسار الدائري الذي يسلكه الإلكترون؟

7.61 سلك مستقيم يمر فيه تيار كهربائي ثابت وُضع في المجال المغناطيسي للأرض. إذا كان مقدار المجال المغناطيسي في هذا الموقع 0.430 G، فما أقل كمية للتيار الكهربائي يجب أن تمر عبر جزء طوله 10.0 cm من السلك لتؤثر فيه قوة مقدارها 1.00 N؟

7.62 ملف دائري نصف قطره 10.0 cm يتكون من 100 لفة سلكية ويسري فيه تيار كهربائي شدته $i = 100.\ \text{mA}$. يدور الملف بحرية في منطقة ذات مجال مغناطيسي أفقي ثابت تحدده العلاقة $\vec{B} = (0.0100\ \text{T})\,\hat{x}$. إذا كان متجه الوحدة العمودي على سطح الملف يصنع زاوية قياسها 30.0° مع المستوى الأفقي، فما مقدار محصلة عزم المؤثر في الملف؟

7.63 عند لحظة زمنية $t = 0$، يعبر إلكترونٌ محور y الموجب (أي أن $x = 0$) عند مسافة 60.0 cm من نقطة الأصل بسرعة متجهة $2.00\text{x}10^{5}\ \text{m/s}$ في اتجاه x الموجب. ويقع الإلكترون داخل مجال مغناطيسي منتظم.



a) أوجد مقدار المجال المغناطيسي واتجاهه الذي يجعل الإلكترون يعبر المحور x عند $x = 60.0\ \text{cm}$.

b) ما الشغل المبذول على الإلكترون أثناء هذه الحركة؟

c) ما الزمن الذي سيستغرقه انتقال الإلكترون من المحور y إلى المحور x؟

7.64 • بطارية جهدها الكهربائي 12.0 V موصّلة بمقاوم 3.00 Ω في حلقة سلكية مستطيلة وثابتة أبعادها 3.00 m في 1.00 m. وكما هو موضح في الشكل، يوجد جزء من السلك طوله $\ell = 1.00\ \text{m}$ في نهاية الحلقة يمتد إلى داخل منطقة أبعادها 2.00 m في 2.00 m ذات مجال مغناطيسي مقداره 5.00 T موجّه إلى داخل الصفحة. ما محصلة القوى المؤثرة في الحلقة؟

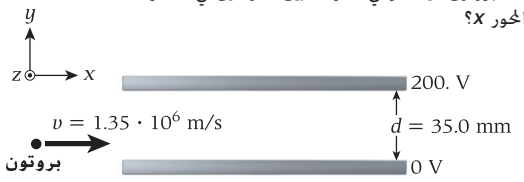
7.65 جسيم ألفا ($m = 6.64\text{x}10^{-27}\ \text{kg},\ q = +2e$) يتسارع متأثرًا بفرق جهد مقداره 2700 V، ويتحرك في مستوى عمودي على مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.340 T. ما يتسبب في انحناء مسار جسيم ألفا. أوجد نصف قطر الانحناء ومدة الدوران.

7.66 • في مساحة معينة، يتحدد المجال المغناطيسي بالقرب من سطح الأرض من المعادلة $\vec{E} = (-150.\ \text{N/C})\,\hat{z}$. ويتحدد المجال المغناطيسي للأرض من المعادلة $\vec{B} = (50.0\ \mu\text{T})\,\hat{r}_{\text{N}} - (20.0\ \mu\text{T})\,\hat{z}$، حيث $\hat{z}$ متجه وحدة يتجه رأسيًا إلى أعلى، و$\hat{r}_{\text{N}}$ متجه وحدة أفقي يتجه شمالًا. ما السرعة المتجهة، $\vec{v}$، التي ستسمح للإلكترون الموجود في هذه المساحة بالتحرك في مسار مستقيم بسرعة ثابتة؟

7.67 • يستخدم كاشفُ تسريب الهيليوم مطيافَ الكتلة للكشف عن التسريبات الصغيرة في غرفة تفريغ. تم تفريغ الغرفة بمضخة تفريغ ثم رشها من الخارج بغاز الهيليوم. في حالة حدوث أي تسريب، تمر جزيئات الهيليوم عبر فتحة التسريب إلى الغرفة، ثم يأخذ كاشف التسريب عينة من حجمها. وفي المطياف، يتم تسريع أيونات الهيليوم وتحريرها إلى داخل أنبوب لتصبح حركتها عموديةً على مجال مغناطيسي مؤثر، $\vec{B}$، ثم تتبع مسارًا دائريًا نصف قطره r لتصطدم بعد ذلك بالكاشف. احسب السرعة المتجهة اللازمة إذا لم يتجاوز نصف قطر المسار الدائري للأيونات 5.00 cm. وكان مقدار المجال المغناطيسي 0.150 T، وكانت كتلة ذرة الهيليوم-4 تعادل حوالي $6.64\text{x}10^{-27}\ \text{kg}$. افترض أن كل أيون أحاديّ التأين (أي يقل بإلكترون واحد عن الذرة المتعادلة). ما معامل التغير في السرعة المتجهة اللازمة في حالة استخدام ذرات الهيليوم-3 التي تعادل كتلتها حوالي $\frac{3}{4}$ من كتلة ذرات الهيليوم-4؟

7.68 في المختبر، تقوم بإعداد تجربة باستخدام مدفع إلكترونات تنبعث منه إلكترونات بطاقة حركية 7.50 keV نحو الهدف الذري. احسب الانحراف (مقدارًا واتجاهًا) الذي سيحدث في حزمة الإلكترونات نتيجة تأثير المجال المغناطيسي للأرض (0.300 G) إذا كان اتجاه الحزمة في البداية نحو الشرق وتقطع مسافة 1.00 m من المدفع إلى الهدف. (*تلميح:* احسب نصف قطر الانحناء أولًا، ثم أوجد مقدار انحراف حزمة الإلكترونات عن خط مستقيم بعد أن تقطع مسافة قدرها 1.00 m).

7.69 دخل بروتون في المنطقة بين اللوحين الموضحين في الشكل ويتحرك في اتجاه المحور x بسرعة $v = 1.35 \cdot 10^6$ m/s. إذا كان الجهد الكهربائي للوح العلوي 200 V، وكان الجهد الكهربائي للوح السفلي 0 V، فما اتجاه المجال المغناطيسي، $\vec{B}$، ومقداره الذي سيحتاج إليه البروتون ليستمر في الحركة بين اللوحين في مسار مستقيم في اتجاه المحور x؟



7.70 يتحرك إلكترون بسرعة متجهة ثابتة، $\vec{v} = v_0\hat{x}$، فدخل منطقة في الفراغ ذات مجال مغناطيسي. وكان المجال المغناطيسي، $\vec{B}$، ثابتًا ويؤثر في اتجاه z. ما مقدار القوة المغناطيسية واتجاهها التي ستؤثر في الإلكترون؟ إذا كان عرض المنطقة الموجود فيها المجال المغناطيسي هو d، فما أقل قيمة للسرعة المتجهة التي سيحتاج إليها الإلكترون للخروج من هذه المنطقة؟

7.71 ملف مربع مكوَّن من 30 لفة كتلته 0.250 kg وطول ضلعه 0.200 m مُعلَّق بشكل أفقي ويمر فيه تيار كهربائي شدته 5.00 A. إذا وُضع في مجال مغناطيسي يؤثر رأسيًا إلى أسفل ومقداره 0.00500 T، فأوجد قياس الزاوية التي يصنعها مستوى الملف مع المستوى الرأسي عندما يكون الملف في حالة اتزان. استخدم $g = 9.81$ m/s^2.

7.72 حلقة سلكية نصف دائرية نصف قطرها R تقع في المستوى xy ومتمركزة عند نقطة الأصل. ويسري في السلك تيار كهربائي، i، عكس اتجاه عقارب الساعة حول نصف الدائرة، من $x = -R$ إلى $x = +R$ على المحور x. إذا كان هناك مجال مغناطيسي، $\vec{B}$، يتجه إلى خارج المستوى في اتجاه z الموجب، فاحسب محصلة القوى المؤثرة في الحلقة النصف دائرية.

7.73 بروتون يتحرك بسرعة $v = 1.00 \times 10^6$ m/s فدخل منطقة في الفراغ ذات مجال مغناطيسي تحدده العلاقة $\vec{B} = (-0.500\ \text{T})\,\hat{z}$. وكان متجه السرعة المتجهة للبروتون يصنع زاوية $\theta = 60.0°$ مع محور z الموجب.

a) حلَّل حركة البروتون وصِف مساره (من الناحية النوعية فقط).

b) احسب نصف القطر، r، للمسار الذي سيقطعه البروتون على مستوى متعامد على المجال المغناطيسي (في المستوى xy).

c) احسب الزمن الدوري، T، والتردد، f، لحركة البروتون في ذلك المستوى.

d) احسب انحدار الحركة (المسافة التي يقطعها البروتون في اتجاه المجال المغناطيسي في زمن دوري واحد).

تمارين بمعطيات متعددة

7.74 كرة صغيرة من الألمنيوم كتلتها 5.063 g وشحنتها 11.03 C تتحرك شمالًا بسرعة 3079 m/s. إذا أردت أن تتحرك الكرة في مسار دائري أفقي نصف قطره 2.137m في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليها من أعلى، متجاهلًا تأثير الجاذبية، فما مقدار المجال المغناطيسي الذي يجب أن يؤثر في كرة الألمنيوم لكي تسلك هذا المسار؟

7.75 كرة صغيرة من الألمنيوم شحنتها 11.17 C تتحرك شمالًا بسرعة 3131 m/s. إذا أردت أن تتحرك الكرة في مسار دائري أفقي نصف قطره 2.015 m في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليها من أعلى، متجاهلًا تأثير الجاذبية، وباعتبار أن مقدار المجال المغناطيسي الذي يجب أن يؤثر في الكرة لتسلك هذا المسار هو $B = 0.8000$ T، فما كتلة الكرة؟

7.76 كرة مشحونة صغيرة من الألمنيوم كتلتها 3.435 g تتحرك شمالًا بسرعة 3183 m/s. إذا أردت أن تتحرك الكرة في مسار دائري أفقي نصف قطره 1.893 m في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليها من أعلى، متجاهلًا تأثير الجاذبية، وباعتبار أن مقدار المجال المغناطيسي الذي يجب أن يؤثر في الكرة لتسلك هذا المسار هو $B = 0.5107$ T، فما شحنة الكرة؟

7.77 يُستخدم منتقي سرعات في مطياف كتلة لإنتاج حزمة من الجسيمات المشحونة تتحرك بسرعة متجهة منتظمة. إذا افترضنا أن المجالَين في منتقي السرعات يتحددان من العلاقتين $\vec{E} = (1.749 \times 10^4\ \text{V/m})\,\hat{x}$ و$\vec{B} = (46.23\ \text{mT})\,\hat{y}$، فأوجد السرعة التي يمكن أن يتحرك بها جسيم مشحون عبر منتقي السرعات في اتجاه z من دون أن ينحرف.

7.78 يُستخدم منتقي سرعات في مطياف كتلة لإنتاج حزمة من الجسيمات المشحونة تتحرك بسرعة متجهة منتظمة. إذا افترضنا أن المجالَين في منتقي السرعات يتحددان من العلاقتين $\vec{E} = (2.207 \times 10^4\ \text{V/m})\,\hat{x}$ و$\vec{B} = B_y\hat{y}$، وأن السرعة التي يتحرك بها جسيم مشحون عبر محدد السرعات في اتجاه z من دون أن ينحرف تساوي 4.713×10^5 m/s، فما قيمة B_y؟

7.79 يُستخدم منتقي سرعات في مطياف كتلة لإنتاج حزمة من الجسيمات المشحونة تتحرك بسرعة متجهة منتظمة. إذا افترضنا أن المجالَين في منتقي السرعات يتحددان من العلاقتين $\vec{E} = E_x\hat{x}$ و$\vec{B} = (47.45\ \text{mT})\,\hat{y}$، وأن السرعة التي يتحرك بها جسيم مشحون عبر منتقي السرعات في اتجاه z من دون أن ينحرف تساوي 5.616×10^5 m/s، فما قيمة E_x؟

هذا الملف مقدم بواسطة



مكتبة الفكر

مكتبة شاملة لكل ما يحتاجه الطالب من ملفات وكتب في دراسته ومطالعته.

متابعة