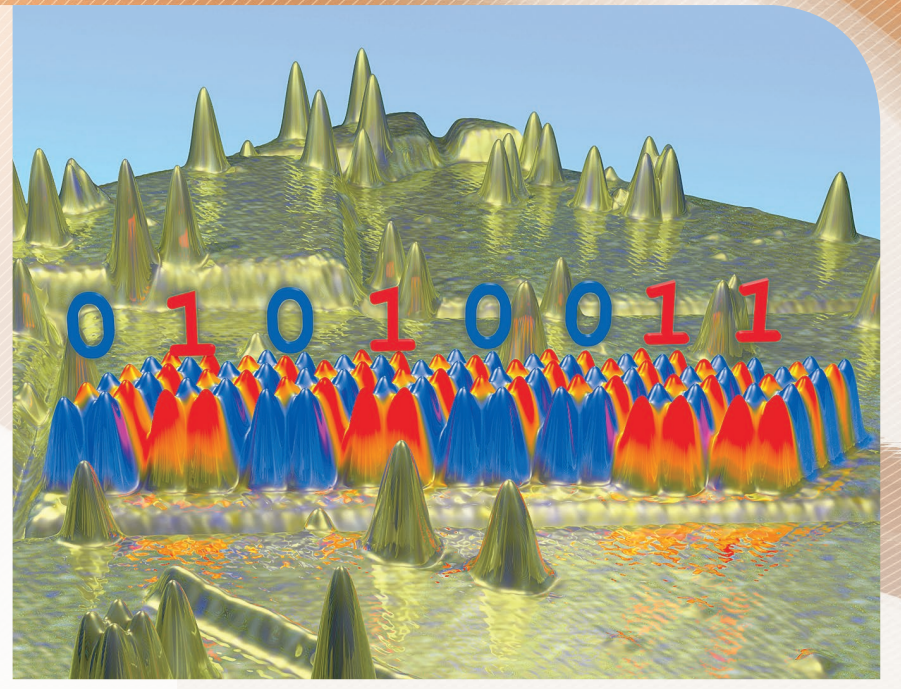
8 المجالات المغناطيسية للتيار الكهربائي المستمر

8 Magnetic Fields of Moving Charges



الشكل 8.1 يحمل هذا المصفوف المكوَّن من 96 ذرة حديد 1 بايت (8 بت) من المعلومات في المجالات المغناطيسية للذرات — وهو إنجازٌ هائل في تخزين البيانات.

ما سنتعلمه 196

8.1 قانون بيو سافار 196

8.2 المجالات المغناطيسية الناتجة عن مرور التيار 197

المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار مستمر في سلك طويل مستقيم 197

السلكان المتوازيان 198

مسألة محلولة 8.1 المجال المغناطيسي الناتج عن أربعة أسلاك 199

تعريف الأمبير 200

مثال 8.1 القوة المبذولة على حلقة يمر فيها تيار 201

مسألة محلولة 8.2 المسرع الكهرومغناطيسي 201

المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار مستمر في حلقة سلك 204

مسألة محلولة 8.3 المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في سلك يحتوي على حلقة 205

8.3 قانون أمبير 206

المجال المغناطيسي داخل سلك طويل مستقيم 207

8.4 المجالات المغناطيسية الخاصة بالملفات اللولبية والحلقية 208

مثال 8.2 الملف اللولبي 209

مسألة محلولة 8.4 المجال المغناطيس لملف حلقي 210

مسألة محلولة 8.5 حركة الإلكترون داخل ملف لولبي يمر فيه تيار 211

8.5 الذرات كمغناطيسات 212

مثال 8.3 العزم المغناطيسي المداري لذرة الهيدروجين 213

اللف المغزلي 214

8.6 الخواص المغناطيسية للمادة 214

الدايامغناطيسية والبارامغناطيسية 215

الفيرومغناطيسية 216

8.7 المغناطيسية والموصلية الفائقة 217

ما تعلمناه/ دليل المذاكرة للاختبار 218

إرشادات حل المسائل 219

أسئلة الاختيار من متعدد 219

أسئلة مفاهيمية 220

تمارين 221

تمارين بمعطيات متعددة 224

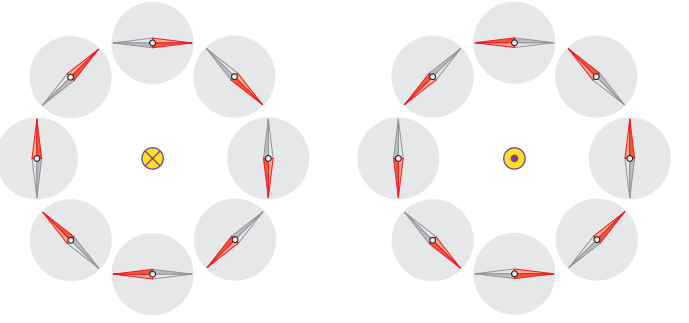
رأينا في الوحدة 7 أنَّ المجال المغناطيسي يمكن أن يؤثر على مسار جسيم مشحون أو على تدفق تيار. وفي هذه الوحدة، نتناول المجالات المغناطيسية *الناتجة* عن التيارات الكهربائية. يُولّد أي جسيم مشحون مجالاً مغناطيسيًا، إذا كان متحركًا. بينما يَنتج العديد من المجالات المغناطيسية من خلال توزيعات التيار المختلفة. وتُعرف المغناطيسات الكهربائية القوية المُستخدمة في الصناعة، وفي الأبحاث الفيزيائية، وفي التشخيصات الطبية، وفي التطبيقات الأخرى بأنّها ملفات لولبية في الأساس، أي ملفاتٍ من سلك حامل للتيار تحتوي على مئات أو آلاف اللفات. سنعرف في هذه الوحدة سبب توليد الملفات اللولبية على وجه الخصوص للمجالات المغناطيسية المفيدة. كما سنعرف أنّ الذرة المفردة يمكن أن تحتوي على مجال مغناطيسي دائم. يوضِّح الشكل 8.1 كيف يمكن استخدام المجالات المغناطيسية لذرات الحديد (الموضّحة باللونين الأحمر والأزرق) لتخزين المعلومات. ولا تزال هذه التكنولوجيا في مهدها (صدرت هذه الصورة عام 2012). ومع ذلك، إذا كان من الممكن الارتقاء بهذه التكنولوجيا، فإنها سوف تسمح بتخزين 10 تيرابايت من البيانات على سنتيمترٍ مربع واحد لسطح حديدي، وهي كثافة أعلى مما يمكن تحقيقه حاليًا من خلال معامل أكبر من 1000.

Chapter Sourced From: 8. Magnetic Fields of Moving Charges, Chapter 28, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

ما سنتعلمه

- تُولّد الشحنات المتحركة (التيارات) مجالاتٍ مغناطيسية.
- يتغيَّر المجال المغناطيسي الناتج عن تيارٍ متدفق في سلكٍ طويل مستقيم تغيرًا عكسيًا مع المسافة التي يبعدها عن السلك.
- ينجذب السلكان المتوازيان اللذان يمر فيهما تياران متوازيان في الاتجاه نفسه إلى بعضهما. يتنافر السلكان المتوازيان اللذان يمر فيهما تياران متوازيان في اتجاهين متعاكسين مع بعضهما.
- يُستخدَم قانون أمبير لحساب المجال المغناطيسي الناتج عن بعض توزيعات التيار المتماثلة، تمامًا كما يفيد قانون جاوس في حساب المجالات الكهربائية في الحالات التي يكون فيها تماثل في توزيع السحنة.
- يتغيَّر المجال المغناطيسي داخل سلك طويل مستقيم تغيُّرًا خطيًا مع المسافة من مركز السلك.
- الملف اللولبي عبارة عن مغناطيس كهربائي يمكن استخدامه لإنتاج مجال مغناطيسي ثابت بحجم كبير.
- يمكن النظر إلى بعض الذرات على أنها مغناطيسات صغيرة ناتجة عن حركة الإلكترونات في الذرة.
- يمكن أن تظهر ثلاثة أنواع من المغناطيسية في المواد المختلفة، وهي: الدايا مغناطيسية، والبارا مغناطيسية، والفيرو مغناطيسية.
- يمكن استخدام المغناطيس فائق التوصيل لإنتاج مجالاتٍ مغناطيسية قوية للغاية.

8.1 قانون بيو سافار Biot-Savart Law



الشكل 8.2 سلك (دائرة صفراء) يمر تيارٌ خلاله: (a) إلى داخل الصفحة (مُشار إليه بالتقاطع)؛ (b) خارجًا من الصفحة (مُشار إليه بالنقطة). يظهر اتجاه إبرة بوصلة موضوعة بالقرب من السلك في مواقع مختلفة حول السلك.

تناولَت الوحدة 7 المجالات المغناطيسية وخطوط المجال من خلال توضيح الكيفية التي توجّه بها إبرة البوصلة نفسها بالقرب من مغناطيس دائم. وفي عرضٍ توضيحي مماثل، يتم تمرير تيار قوي عبر سلك (مستقيم طويل للغاية) (مع العزل أو من دونه). وإذا وُضِعت بعد ذلك إبرة بوصلة بالقرب من السلك، فإنَّ إبرة البوصلة توجّه نفسها نسبيًا إلى السلك بالطريقة الموضّحة في الشكل 8.2. وكان أول من أبدى هذه الملاحظة هو عالِم الفيزياء الدانماركي هانز أورستد (1777–1851) عام 1819 أثناء إجرائه عرضًا توضيحيًا للطلاب خلال إحدى المحاضرات. ونستنتج أنّ التيار المتدفق في السلك ينتج مجالاً مغناطيسيًا. ونظرًا لأنّ اتجاه البوصلة يشير إلى اتجاه المجال المغناطيسي، فإنّنا نستنتج أيضًا أنَّ خطوط المجال المغناطيسي تكوّن دوائر حول هذا السلك الحامل للتيار. لاحظ الاختلاف بين الجزأين (a) و(b) للشكل 8.2: فعندما ينعكس اتجاه التيار، ينعكس أيضًا اتجاه إبرة البوصلة. إذا تحركت إبرة البوصلة وابتعدت أكثر فأكثر عن السلك، فإنّها في النهاية توجّه نفسها مرةً أخرى في اتجاه المجال المغناطيسي للأرض، وإنْ كان الشكل لا يوضح هذا. ويشير هذا إلى أنّ المجال المغناطيسي الناتج عن السلك يصبح أضعف نتيجة زيادة المسافة من السلك. السؤال التالي الذي يتعين علينا الإجابة عنه هو: كيف يمكننا تحديد المجال المغناطيسي الناتج عن شحنة متحركة؟

لوصف المجال الكهربائي بدلالة الشحنة الكهربائية، أوضحنا أن:

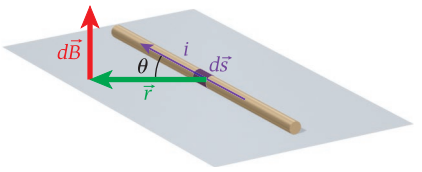
$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|dq|}{r^2}$$

حيث dq هو عنصر الشحنة. يشير المجال الكهربائي في اتجاه نصف قطري (داخلي باتجاه الشحنة الكهربائية أو خارجي بعيدًا عنها، حسب إشارة الشحنة). لذا

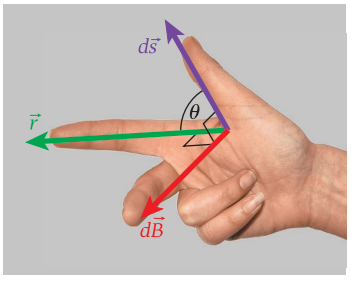
$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^3}\vec{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\hat{r}$$

تُعد الحالة أكثر تعقيدًا قليلاً بالنسبة إلى المجال المغناطيسي؛ لأنّ عنصر التيار، $i\,d\vec{s}$ الذي ينتج مجالاً مغناطيسيًا يكون له اتجاه، على عكس الشحنة النقطية غير الاتجاهية التي تنتج مجالاً كهربائيًا. ونتيجةً لسلسلة طويلة من التجارب التي تتضمن اختبارات مشابهة لتلك الاختبارات الموضّحة في الشكل 8.2، والتي أُجريت في القرن التاسع عشر، أثبتَ العالمان الفرنسيان، جان بابتيست بيو (1774–1862) وفيليكس سافار (1791–1841)، أنَّ المجال المغناطيسي الناتج عن عنصر التيار، $i\,d\vec{s}$، يتحدَّد من خلال

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i d\vec{s}\times\vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i d\vec{s}\times\hat{r}}{r^2} \quad (8.1)$$



(a)



(b)

الشكل 8.3 (a) تمثيل ثلاثي الأبعاد لقانون بيو–سافار. يكون المجال المغناطيسي التفاضلي متعامدًا على كلٍّ من عنصر التيار التفاضلي ومتجه الموقع. (b) القاعدة الأولى لليد اليمنى المُطبَقة على الكميات المتضمّنة في قانون بيو–سافار.

هنا، $i\,d\vec{s}$ عبارة عن متجه طول تفاضلي ds يشير في الاتجاه الذي يتدفق فيه التيار على طول الموصِّل، بينما $\vec{r}$ هو متجه الموقع المقيس من عنصر التيار *إلى* النقطة التي يُحدَّد عندها المجال. يوضّح الشكل 8.3 الحالة الفيزيائية التي يُعبَّر عنها من خلال هذا القانون، الذي يُطلق عليه **قانون بيو–سافار.**

ويُطلق على الثابت μ_0 في المعادلة 8.1 **النفاذية المغناطيسية للفراغ** وتبلغ قيمته

$$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}} \tag{8.2}$$

من المعادلة 8.1 والشكل 8.3، يمكنك ملاحظة أنَّ اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن عنصر التيار $i\,d\vec{s}$ يكون متعامدًا على كلٍّ من متجه الموقع وعنصر التيار. ويتحددَّ مقدار المجال المغناطيسي من خلال

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds\sin\theta}{r^2} \tag{8.3}$$

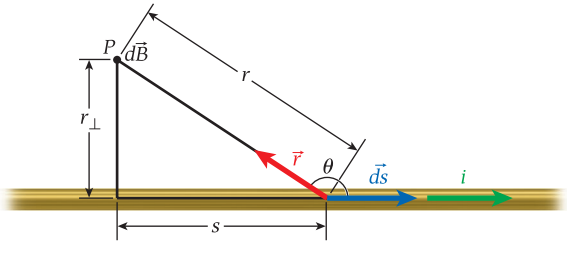
حيث θ (قيمها المحتملة بين 0° و180°) هو الزاوية الواقعة بين اتجاه متجه الموقع وعنصر التيار. ويتحدَّد اتجاه المجال المغناطيسي من خلال شكل مختلف للقاعدة الأولى لليد اليمنى، الموضّحة في الوحدة 7. ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي باستخدام يدك اليمنى، أشِر بإبهامك في اتجاه عنصر التيار التفاضلي، وبالسبابة في اتجاه متجه الموقع. وسيشير الإصبع الأوسط في اتجاه المجال المغناطيسي التفاضلي.

8.2 المجالات المغناطيسية الناتجة عن مرور التيار
Magnetic Fields due to Current Distributions

تناولت الوحدة 7 مبدأ تراكب للمجالات المغناطيسية. ومن خلال استخدام مبدأ التراكب هذا، يمكننا حساب المجال المغناطيسي في أي نقطة في الفضاء كمجموع المجالات المغناطيسية التفاضلية التي يُعبَّر عنها من خلال قانون بيو–سافار. يتناول هذا القسم المجالات المغناطيسية الناتجة عن أكثر أشكال الأسلاك الحاملة للتيار شيوعًا.

المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في سلك طويل مستقيم

لنتناول أولاً المجال المغناطيسي الناتج عن سلك مستقيم لامتناهي الطول يحمل تيارًا i. ونفترض أنَّ المجال المغناطيسي $d\vec{B}$ عند النقطة P، التي تمثّل المسافة العمودية $r_\perp$ من السلك (الشكل 8.4). ويتحدَّد مقدار المجال dB، عند تلك النقطة الناتجة عن عنصر التيار $i\,ds$ من خلال المعادلة 8.3؛ حيث يتحدَّد اتجاه المجال من خلال $d\vec{s}\times\vec{r}$، ويكون خارج الصفحة. نوجِد المجال المغناطيسي من النصف الأيمن من السلك، ونضرب في 2 لإيجاد المجال المغناطيسي من السلك بأكمله. ومن ثَمّ، يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي عند المسافة العمودية $r_\perp$ من السلك من خلال



الشكل 8.4 مجال مغناطيسي من سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا.

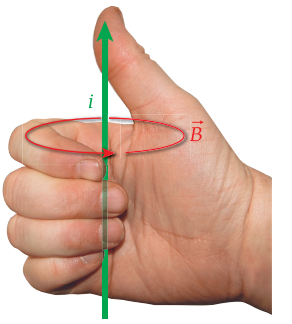
$$B = 2\int_0^\infty dB = 2\int_0^\infty \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds\sin\theta}{r^2} = \frac{\mu_0 i}{2\pi}\int_0^\infty \frac{ds\sin\theta}{r^2}$$

يمكننا ربط r وθ بـ $r_\perp$ وs (r وs وθ) من خلال $r = \sqrt{s^2 + r_\perp^2}$ و$\sin\theta = \sin(\pi - \theta) = r_\perp/\sqrt{s^2 + r_\perp^2}$ (انظر الشكل 8.4). بالتعويض عن r و$\sin\theta$ في التعبيرات السابقة بـ B نحصل على

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi}\int_0^\infty \frac{r_\perp\,ds}{(s^2 + r_\perp^2)^{3/2}}$$

بتقييم هذا التكامل المحدد، نوجِد

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi}\left[\frac{1}{r_\perp^2}\frac{r_\perp s}{(s^2 + r_\perp^2)^{1/2}}\right]_0^\infty = \frac{\mu_0 i}{2\pi r_\perp}\left[\frac{s}{(s^2 + r_\perp^2)^{1/2}}\right]_{s\to\infty} - 0.$$



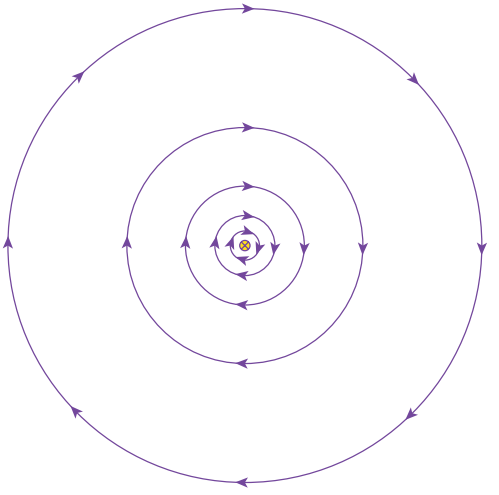
الشكل 8.5 القاعدة الثالثة لليد اليمنى للمجال المغناطيسي من سلك يحمل تيارًا.

بالنسبة إلى $r_\perp$ $s \gg r_\perp$، يقترب الحد الموضوع بين قوسين من القيمة 1. ولذلك، فإنَّ مقدار المجال المغناطيسي عند المسافة العمودية $r_\perp$ من سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا، i، يساوي

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r_\perp} \quad (8.4)$$

يمكن إيجاد اتجاه المجال المغناطيسي في أي نقطة من خلال تطبيق القاعدة الأولى لليد اليمنى على عنصر التيار ومتجهات الموقع الموضَّحة في الشكل 8.4. وينتج عن ذلك قاعدة جديدة لليد اليمنى، تُسمَّى *القاعدة الثالثة لليد اليمنى (قبضة اليد اليمنى)*، والتي يمكن استخدامها لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن سلك حامل للتيار. إذا كنت تمسك السلك بيدك اليمنى، بحيث يشير إبهامك في اتجاه التيار، ولفة أصابعك في اتجاه المجال المغناطيسي (الشكل 8.5).

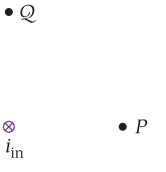
بإمعان النظر في سلكٍ حامل للتيار يتبين أنَّ خطوط المجال المغناطيسي تكوِّن حلقاتٍ متحدة المركز (الشكل 8.6). ويُلاحَظ من المسافة بين خطوط المجال أنَّ المجال يبلغ أقصى شدةٍ له بالقرب من السلك، ثم تنخفض شدته بالتناسب مع $1/r_\perp$، كما تشير المعادلة 8.4.



الشكل 8.6 خطوط المجال المغناطيسي حول سلك مستقيم طويل (دائرة صفراء عند المركز) متعامد على الصفحة ويحمل تيارًا يتدفق إلى داخل الصفحة.

مراجعة المفاهيم 8.1

سلك يحمل تيارًا، i_{in}، إلى داخل الصفحة كما يظهر في الشكل. ما الاتجاه الذي يشير إلى المجال المغناطيسي في النقطتين P وQ؟



a) إلى اليمين عند النقطة P ولأعلى (باتجاه أعلى الصفحة) عند النقطة Q

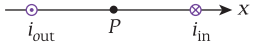
b) لأعلى عند النقطة P وإلى اليمين عند النقطة Q

c) لأسفل عند النقطة P وإلى اليمين عند النقطة Q

d) لأعلى عند النقطة P وإلى اليسار عند النقطة Q

مراجعة المفاهيم 8.2

يمر في السلك 1 تيار يتدفق خارجًا من الصفحة، i_{out}، كما يظهر في الشكل. ويمر في السلك 2 تيار يتدفق إلى داخل الصفحة، i_{in}. ما اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة P؟



a) لأعلى في مستوى الصفحة

b) إلى اليمين

c) لأسفل في مستوى الصفحة

d) إلى اليسار

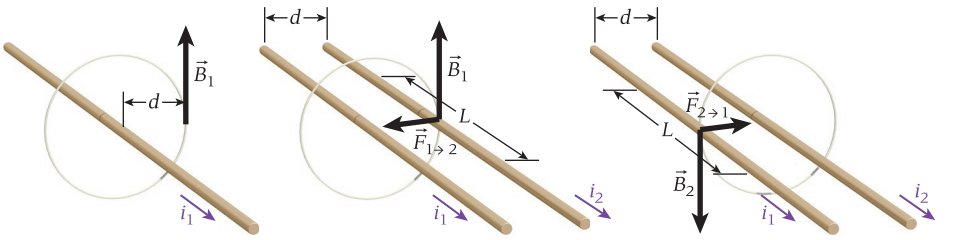
e) المجال المغناطيسي عند النقطة P يساوي صفرًا.

السلكان المتوازيان

لندرس الحالة التي يحمل فيها سلكان متوازيان التيار. يبذل كلٌّ من السلكين قوة مغناطيسية على الآخر؛ وذلك لأنّ المجال المغناطيسي لأحد السلكين يبذل قوة على الشحنات المتحركة في السلك الآخر. ويتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن سلك حامل للتيار من خلال المعادلة 8.4. ويكون المجال المغناطيسي متعامدًا دائمًا على السلك باتجاهٍ يتحدَّد من خلال القاعدة الثالثة لليد اليمنى (الشكل 8.5).

لنفترض أولاً أنّ السلك 1 يحمل التيار i_1، باتجاه اليمين، كما هو موضَّح في الشكل 8.7a. ويكون مقدار المجال المغناطيسي عند المسافة العمودية d من السلك 1 هو

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi d} \quad (8.5)$$



الشكل 8.7 (a) المجال المغناطيسي من سلك واحدٍ حامل للتيار. (b) مجال مغناطيسي متولّد عن التيار المار في سلكٍ يبذل قوةً على سلك ثانٍ حامل للتيار. (c) مجال مغناطيسي مُتولّد عن التيار المار في السلك الثاني الذي يبذل قوةً على السلك الأول الحامل للتيار.

يحدد اتجاه $\vec{B}_1$ من خلال القاعدة الثالثة لليد اليمنى، ويظهر عند نقطة معينة في الشكل 8.7a.

لنفترض الآن أنَّ السلك 2 حامل للتيار، i_2، في نفس اتجاه i_1 وموضوع بالتوازي مع السلك 1 على المسافة d منه (الشكل 8.7b). ويبذل المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 1 قوة مغناطيسية على الشحنات المتحركة في التيار المتدفق في السلك 2. في الوحدة 7، رأينا أنَّ القوة المغناطيسية المبذولة على سلك حامل للتيار تتحدّد من خلال المعادلة

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

ومن ثمَّ، يكون مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على الطول، L، من السلك 2 هو

$$F = iLB\sin\theta = i_2 L B_1 \tag{8.6}$$

لأنّ $\vec{B}_1$ يكون متعامدًا على السلك 2، وبالتالي فإنَّ $\theta = 90°$. بالتعويض عن B_1 من المعادلة 8.5 في المعادلة 8.6، نحصل على مقدار القوة التي يبذلها السلك 1 على الطول L للسلك 2:

$$F_{1\to 2} = i_2 L\left(\frac{\mu_0 i_1}{2\pi d}\right) = \frac{\mu_0 i_1 i_2 L}{2\pi d} \tag{8.7}$$

وفقًا للقاعدة الأولى لليد اليمنى، يشير $\vec{F}_{1\to 2}$ إلى السلك 1 ويكون متعامدًا على كلا السلكين. وتتيح لنا عملية حسابية مماثلة استنتاج أنَّ القوة الناتجة من السلك 2 والمبذولة على الطول L، للسلك 1 مساوية لها في المقدار ومعاكسة في الاتجاه: $\vec{F}_{2\to 1} = -\vec{F}_{1\to 2}$ تظهر هذه النتيجة في الشكل 8.7c. كما أنّها نتيجة بسيطة لقانون نيوتن الثالث.

مراجعة المفاهيم 8.3

في الشكل 8.2، توضح إبرة البوصلة المجال المغناطيسي حول سلك حامل للتيار. في الشكل، يتطابق طرف إبرة البوصلة الذي يشير ناحية الشمال مع

a) الطرف الأحمر.

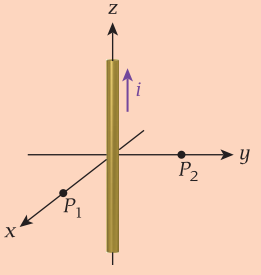
b) الطرف الرمادي.

c) إما الطرف الأحمر أو الطرف الرمادي، بناءً على الطريقة التي تتحرَّك بها البوصلة تجاه السلك.

d) لا يمكن تحديد الطرف من منطلق المعلومات المتضمَّنة في الشكل.

سؤال الاختبار الذاتي 8.1

يحمل السلك المعروض في الشكل التيار i في اتجاه z الموجب. ما اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عند النقطة P_1؟ ما اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عند النقطة P_2؟

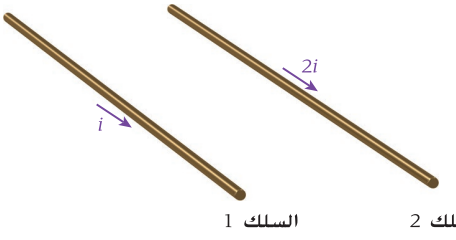


سؤال الاختبار الذاتي 8.2

تخيَّل سلكين متوازيين يحملان تيارن متساويان في الاتجاه نفسه. هل القوة بين السلكين عبارة عن قوة جذب أو قوة تنافر؟ والآن، تخيَّل سلكين متوازيين يحملان تيارًا في اتجاهين مختلفين. ما القوة بين السلكين؟

مراجعة المفاهيم 8.4

سلكان متوازيان قريبان من بعضهما البعض، كما هو موضح في الشكل. يحمل السلك 1 التيار i ويحمل السلك 2 التيار $2i$. ما العبارة التي تنطبق على القوى المغناطيسية التي يبذلها السلكان أحدهما على الآخر؟



a) لا يبذل السلكان قوى أحدهما على الآخر.

b) يبذل السلكان قوى جذب بالمقدار نفسه أحدهما على الآخر.

c) يبذل السلكان قوى تنافر بالمقدار نفسه أحدهما على الآخر.

d) يبذل السلك 1 قوةً على السلك 2 أكبر مما يبذلها السلك 2 على السلك 1.

e) يبذل السلك 2 قوةً على السلك 1 أكبر مما يبذلها السلك 1 على السلك 2.

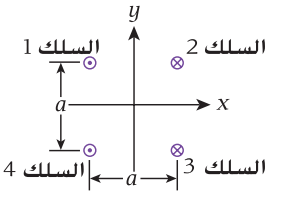
مسألة محلولة 8.1 المجال المغناطيسي الناتج عن أربعة أسلاك

أربعة أسلاك يحمل كل منها تيارًا مقداره $i = 1.00\ \text{A}$. وتوجد الأسلاك في الزوايا الأربع لمربع طول ضلعه $a = 3.70\ \text{cm}$. ويحمل سلكان منهما التيار إلى داخل الصفحة، بينما يحمل الاثنان الآخران التيار خارج الصفحة (الشكل 8.8).

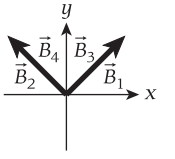
المسألة

ما مركَّبة y للمجال المغناطيسي في مركز المربع؟

– يُتبع



الشكل 8.8 أربعة أسلاك واقعة عند زوايا مربع. يحمل سلكان منها تيارًا في الصفحة، ويحمل السلكان الآخران تيارًا خارج الصفحة.



الشكل 8.9 المجال المغناطيسي من الأسلاك الأربعة الحاملة للتيار.

الحل

فكِّر المجال المغناطيسي في مركز المربع هو مجموع متجهات المجالات المغناطيسية الناتجة من الأسلاك الأربعة الحاملة للتيار. ويكون مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن كلٍّ من الأسلاك الأربعة متماثلاً. ويُحدَّد اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن كل سلك باستخدام القاعدة الثالثة لليد اليمنى.

ارسم يوضِّح الشكل 8.9 المجالات المغناطيسية الناتجة عن الأسلاك الأربعة: $\vec{B}_1$ هو المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 1، و$\vec{B}_2$ هو المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 2، و$\vec{B}_3$ هو المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 3، و$\vec{B}_4$ هو المجال المغناطيسي الناتج عن السلك 4. لاحظ أنّ كلاً من $\vec{B}_2$ و$\vec{B}_4$ متساويان، و$\vec{B}_1$ و$\vec{B}_3$ متساويان.

ابحث يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن كلٍّ من الأسلاك الأربعة من خلال

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} = \frac{\mu_0 i}{2\pi\left(a/\sqrt{2}\right)}$$

حيث $a/\sqrt{2}$ هو المسافة من كل سلك إلى مركز المربع.

تحدِّد القاعدة الثالثة لليد اليمنى اتجاهات المجالات المغناطيسية، الموضَّحة في الشكل 8.9. وتتحدَّد مركِّبة y لكلٍّ من المجالات المغناطيسية من خلال

$$B_y = B\sin 45°$$

حوّل إلى أبسط صورة إنّ مجموع مركِّبات y للمجالات المغناطيسية الأربعة يساوي

$$B_{y,\text{sum}} = 4B_y = 4B\sin 45° = 4\frac{\mu_0 i}{2\pi\left(a/\sqrt{2}\right)}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \frac{2\mu_0 i}{\pi a}$$

حيث استخدمنا $\sin 45° = 1/\sqrt{2}$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية نحصل على

$$B_{y,\text{sum}} = \frac{2\mu_0 i}{\pi a} = \frac{2\left(4\pi\times10^{-7}\ \text{T m/A}\right)(1.00\ \text{A})}{\pi\left(3.70\times10^{-2}\ \text{m}\right)} = 2.16216\times10^{-5}\ \text{T}$$

قرِّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$B_{y,\text{sum}} = 2.16\times10^{-5}\ \text{T}$$

تحقَّق ثانية للتحقّق ثانية من النتيجة، يمكننا حساب مقدار المجال المغناطيسي في مركز المربع الناتج عن أحد الأسلاك:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi\left(a/\sqrt{2}\right)} = \frac{\left(4\pi\times10^{-7}\ \text{T m/A}\right)(1.00\ \text{A})\sqrt{2}}{2\pi\left(3.70\times10^{-2}\ \text{m}\right)} = 7.64\times10^{-6}\ \text{T}$$

ومن ثمَّ، يكون مجموع مركِّبات y

$$B_{y,\text{sum}} = \frac{4\left(7.64\times10^{-6}\ \text{T}\right)}{\sqrt{2}} = 2.16\times10^{-5}\ \text{T}$$

وهذا يتوافق مع النتيجة التي توصلنا إليها.

تعريف الأمبير

تُستخدَم القوة $F_{1\to2}$ التي تعبر عنها المعادلة 8.7 في تعريف النظام الدولي للأمبير: *الأمبير* (A) هو التيار الثابت الذي، إذا مر في موصِّلين متوازيين مستقيمين بطول لانهائي، ويبعدان عن بعضهما مسافة 1 m في الفراغ، سيؤثر كل منهما في وحدة الطول (1 m) من الآخر بقوةٍ مقدارها $2\text{X}10^{-7}$ N. وتعبر عن هذه الحالة الفيزيائية المعادلة 8.7 لإيجاد القوة بين سلكين متوازيين حاملَيْن للتيار حيث $i_1 = i_2 = 1$ A و $d = 1$ m و $F_{1\to2} = 2\text{X}10^{-7}$ N. ويمكننا من المعادلة 8.7 ايجاد μ_0:

$$\mu_0 = \frac{(2\pi d)F_{1\to2}}{i_1 i_2 L} = \frac{2\pi(1\ \text{m})\left(2\times10^{-7}\ \text{N}\right)}{(1\ \text{A})(1\ \text{A})(1\ \text{m})} = 4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}$$ بالضبط

وهذا يشير إلى أنّ النفاذية المغناطيسية للفراغ محددة على أنها تساوي $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ T m/A (انظر المعادلة 8.2).

عندما تناولنا قانون كولوم، تحدَّدت قيمة السماحية الكهربائية للفراغ ϵ_0: $\epsilon_0 = 8.85\times10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N\ m^2)}$. وبما أنَّ $1\ \mathrm{A} = 1\ \mathrm{C/s}$ و $1\ \mathrm{T} = 1\ \mathrm{(N\ s)/(C\ m)}$ (انظر الوحدة 7)، فإنّ ناتج الثابتين، ϵ_0 و μ_0، يساوي

$$\mu_0\epsilon_0 = \left(4\pi\times10^{-7}\ \frac{\mathrm{T\ m}}{\mathrm{A}}\right)\left(8.85\times10^{-12}\ \frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N\ m^2}}\right) = 1.11\times10^{-17}\ \frac{\mathrm{s^2}}{\mathrm{m^2}}$$

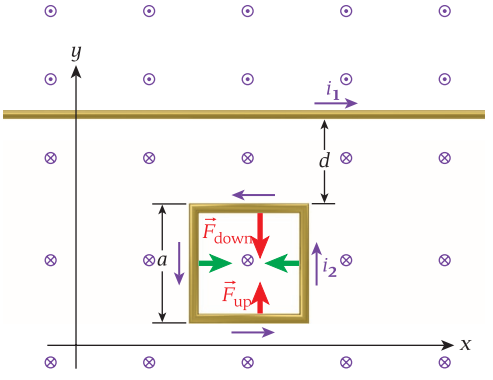
وهي تحتوي على وحدة معكوس وحدة مربع السرعة. ومن ثَمَّ، يُحدِّد $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ قيمة هذه السرعة على أنها قيمة سرعة الضوء، $c = 3.00\times10^8\ \mathrm{m/s}$. وهذه ليست مصادفة بأي حالٍ من الأحوال كما سنرى في الوحدات القادمة. وفي الوقت الحالي، يكفي ذكر النتيجة التجريبية:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$$

بما أنَّ النفاذية المغناطيسية للفراغ محدّدة على أنها تساوي $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}\ \mathrm{T\ m/A}$ بالضبط، وسرعة الضوء محدّدة على أنها تساوي $c = 299{,}792{,}458\ \mathrm{m/s}$ بالضبط، فإنَّ المعادلة $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ ويمكن أيضًا ايجاد قيمة السماحية الكهربائية للفراغ.

مثال 8.1 القوة المغناطيسية المؤثرة في حلقة يمر فيها تيار

يحمل سلك طويل مستقيم تيارًا مقداره $i_1 = 5.00\ \mathrm{A}$ باتجاه اليمين (الشكل 8.10). وتُوضَع حلقة مربعة يبلغ طول ضلعها $a = 0.250\ \mathrm{m}$ بحيث تكون أضلاعها كما في الشكل 8.10 والمسافة $d = 0.100\ \mathrm{m}$ من السلك. وتحمل الحلقة المربعة تيارًا مقداره $i_2 = 2.20\ \mathrm{A}$ في عكس اتجاه عقارب الساعة.



الشكل 8.10 سلك يحمل تيارًا وحلقة مربعة.

المسألة

ما محصّلة القوى المغناطيسية المؤثرة في الحلقة المربعة؟

الحل

ترجع القوة المبذولة على الحلقة المربعة إلى المجال المغناطيسي المُتولِّد عن التيار المتدفق في السلك المستقيم. وتخبرنا القاعدة الثالثة لليد اليمنى أنّ المجال المغناطيسي الناتج عن التيار المتدفق في السلك يكون موجَّهًا في الصفحة في المنطقة التي توجد فيها الحلقة (انظر الشكل 8.10). ونعلم من قاعدة اليد اليمنى والمعادلة 8.4 أنَّ القوة الناتجة المبذولة على الضلع الأيسر من الحلقة تكون باتجاه اليمين، بينما تكون القوة المبذولة على الضلع الأيمن من الحلقة باتجاه اليسار. في الشكل 8.10، تُمثَّل هاتان القوتان بالأسهم الخضراء. وتكون القوتان متساويتين في المقدار ومتضادتين في الاتجاه، لذا يكون مجموعهما صفرًا. ويكون اتجاه القوة المبذولة على الضلع العلوي للحلقة إلى أسفل (السهم الأحمر في الشكل 8.10، الذي يشير إلى اتجاه y السالب)، ويتحدَّد مقدارها من خلال المعادلة 8.7:

$$F_{\mathrm{down}} = \frac{\mu_0 i_1 i_2 a}{2\pi d}$$

حيث a هو طول الضلع العلوي للحلقة. بينما يكون اتجاه القوة المبذولة على الضلع السفلي إلى أعلى (السهم الأحمر الآخر في الشكل 8.10، الذي يشير إلى اتجاه y الموجب)، ويتحدَّد مقدارها من خلال

$$F_{\mathrm{up}} = \frac{\mu_0 i_1 i_2 a}{2\pi(d+a)}$$

ومن ثَمَّ، يمكننا التعبير عن محصّلة القوة المغناطيسية المبذولة على الحلقة على النحو التالي:

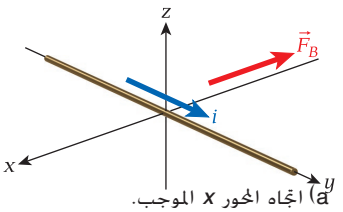
$$\vec{F} = (F_{\mathrm{up}} - F_{\mathrm{down}})\hat{y}$$

وبالتعويض بالقيم، نحصل على

$$\vec{F} = \frac{\left(4\pi\times10^{-7}\ \mathrm{T\ m/A}\right)(5.00\ \mathrm{A})(2.20\ \mathrm{A})(0.250\ \mathrm{m})}{2\pi}\left(\frac{1}{0.350\ \mathrm{m}} - \frac{1}{0.100\ \mathrm{m}}\right)\hat{y} = (-3.93\times10^{-6})\,\hat{y}\ \mathrm{N}$$

مراجعة المفاهيم 8.5

يحمل سلكٌ تيارًا، i، في اتجاه y الموجب، كما يظهر في الشكل. يقع السلك في مجال مغناطيسي منتظم، $\vec{B}$، مُوجَّه بطريقة تعمل على زيادة القوة المغناطيسية إلى أقصى درجة. تسري القوة المغناطسية المؤثرة على السلك، $\vec{F}_B$، في اتجاه x السالب. ما اتجاه المجال المغناطيسي؟



a) اتجاه المحور x الموجب.

b) اتجاه المحور x السالب

c) اتجاه المحور y السالب.

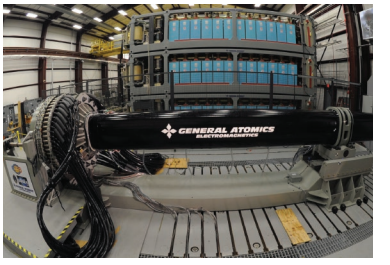
d) اتجاه المحور z الموجب

e) اتجاه المحور z السالب.

مسألة محلولة 8.2 المسرع الكهرومغناطيسي

يجري تطوير مسرعات كهرومغناطيسية لتسريع حبيبات الوقود في تجارب الاندماج النووي، ولإطلاق المركبات الفضائية إلى مداراتها. وتُجري البحرية الأمريكية تجارب باستخدام هذه المسرعات لإطلاق

– يُتبع



الشكل 8.11 مطلق قذائف كهرومغناطيسي جديد.

مقذوفاتٍ بسرعاتٍ عالية للغاية، مثل مُطلِق القذائف الموضّح في الشكل 8.11. في مُطلِق القذائف هذا، تسري التيارات عبر ساقي توصيلٍ متوازيين، متصلين بموصِّل قابل للتحرك وموجّه بشكل متعامد على الساقين. ويتم توصيل المقذوف بالموصِّل القابل للتحرك. بالنسبة إلى هذا المثال، سنفترض أنّ مُطلِق القذائف يتكوَّن من ساقين متوازيين بمقطع عرضي يبلغ نصف قطره $r = 5.00\ \text{cm}$، وتفصل بين مَركزيه المسافة $d = 25.0\ \text{cm}$، ويبلغ طولهما $L = 5.00\ \text{m}$، وأنّ مُطلِق القذائف يُسرِّع المقذوف لبلوغ طاقة حركية مقدارها $K = 32.0\ \text{MJ}$. كما يعمل المقذوف أيضًا كموصِّل قابل للتحرك.

المسألة

ما مقدار التيار اللازم لتسريع المقذوف؟

الحل

فكِّر يسري التياران في الساقين في اتجاهين متعاكسين. ويكون التيار المتدفق عبر الموصِّل القابل للتحرك متعامدًا على التيارين المتدفقين في الساقين. وتكون المجالات المغناطيسية الناتجة عن الساقين في الاتجاه نفسه، كما أنّها تبذل قوى على الموصِّل القابل للتحرك في الاتجاه نفسه. وتعتمد القوة الناتجة عن المجال المغناطيسي لكل ساق على المسافة من الساق. ومن ثَمَّ، يجب علينا إجراء تكامل للقوة على طول المسافة بين الساقين للحصول على القوة الكلية. تكون القوة الكلية المبذولة على الموصِّل القابل للتحرك ضِعف القوة الناتجة عن المجال المغناطيسي من ساق واحد. وتكون الطاقة الحركية التي اكتسبها المقذوف هي القوة الكلية التي تبذلها المجالات المغناطيسية للساقين مضروبةً في المسافة التي تؤثر فيها القوة.

ارسم يوضِّح الشكل 8.12 المنظر العلوي والمقطع العرضي للساقين والموصِّل القابل للتحرك.

ابحث إنّ الموصِّل القابل للتحرك الحامل للتيار، والذي يكمل الدائرة بين الساقين، هو مقذوف أيضًا، ويتسارع تحت تأثير القوى المغناطيسية الناتجة عن الساقين. وتعتمد القوة المبذولة على المقذوف على المسافة، x، من مركز ساق، كما هو موضّح في الشكل 8.12b. ومن ثَمَّ، لحساب القوة الكلية المبذولة على المقذوف، يجب علينا حساب التكامل على طول المقذوف. نستخدم المعادلة 8.4 لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي، B_1، من التيار i المتدفق في الساق 1 عند المسافة x من مركز الساق:

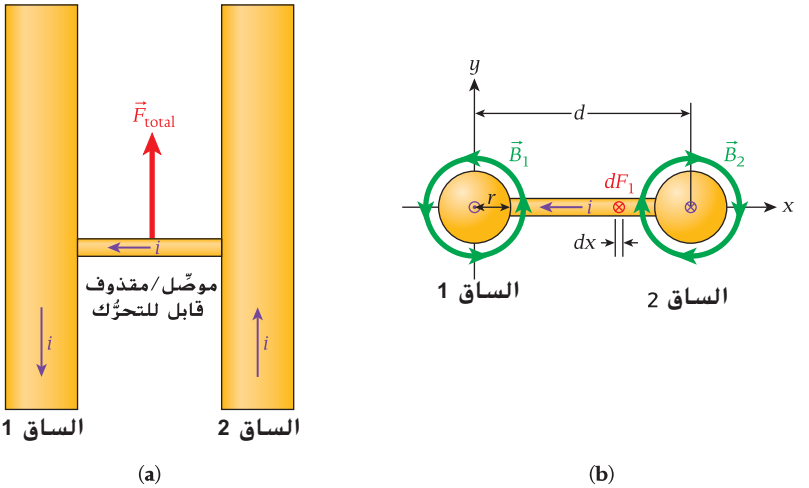
$$B_1 = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}$$

وفقًا للمعادلة 8.6، فإنّ مقدار القوة التفاضلية، dF_1، المبذولة على الطول التفاضلي dx، للمقذوف من خلال المجال المغناطيسي الناتج عن الساق 1 يساوي

$$dF_1 = i(dx)B_1 = i(dx)\left(\frac{\mu_0 i}{2\pi x}\right)$$

يتحدَّد اتجاه القوة من خلال القاعدة الثالثة لليد اليمنى، والتي تخبرنا أنَّ اتجاه القوة إلى أعلى في مستوى الصفحة في الشكل 8.12a، وفي الصفحة في الشكل 8.12b. ويتحدَّد مقدار القوة المبذولة على المقذوف من خلال حساب التكامل dF_1 على طول المقذوف:

$$\text{(i)}\quad F_1 = \int_r^{d-r} dF_1 = \int_r^{d-r} \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}\frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}[\ln x]_r^{d-r} = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}\left(\ln(d-r) - \ln r\right) = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)$$



الشكل 8.12 رسم تخطيطي لمطلق قذائف: (a) منظر علوي، (b) منظر المقطع العرضي.

نظرًا لأنّ المجال المغناطيسي الناتج عن الساق 2 يكون في نفس اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن الساق 1، فإنّ القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي الناتج عن الساق 2 على المقذوف هي نفسها القوة الناتجة عن الساق 1. ومن ثَمَّ، فإنّ مقدار القوة الكلية المبذولة على المقذوف يساوي

$$F_{\text{total}} = 2F_1 \tag{ii}$$

تساوي الطاقة الحركية التي اكتسبها المقذوف مقدار القوة المبذولة مضروبةً في المسافة التي تؤثر فيها القوة

$$K = F_{\text{total}}L \tag{iii}$$

حوّل إلى أبسط صورة يمكننا دمج المعادلات (i) و(ii) و(iii) للحصول على

$$K = 2F_1L = 2\left[\frac{\mu_0 i^2}{2\pi}\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)\right]L = \frac{\mu_0 L i^2}{\pi}\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)$$

بحل هذه المعادلة لإيجاد التيار، نحصل على

$$i = \sqrt{\frac{K\pi}{\mu_0 L\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)}}$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$i = \sqrt{\frac{K\pi}{\mu_0 L\ln\left(\frac{d-r}{r}\right)}} = \sqrt{\frac{\left(32.0\times10^6\ \text{J}\right)\pi}{\left(4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}\right)(5.00\ \text{m})\ln\left(\frac{25.0\ \text{cm}-5.00\ \text{cm}}{5.00\ \text{cm}}\right)}} = 3.397287\times10^6\ \text{A}$$

قرّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$i = 3.40\cdot10^6\ \text{A} = 3.40\ \text{MA}$$

تحقَّق ثانية لنتحقَّق ثانية من النتيجة بالنظر إلى القوة المبذولة على المقذوف. بالتعويض بالنتيجة الخاصة بالتيار في المعادلة (i) لإيجاد مقدار القوة التي يبذلها المجال المغناطيسي للساق 1، نحصل على

$$F_1 = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi}\ln\left(\frac{d-r}{r}\right) = \frac{\left(4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}\right)\left(3.40\times10^6\ \text{A}\right)^2}{2\pi}\ln\left(\frac{25.0\ \text{cm}-5.00\ \text{cm}}{5.00\ \text{cm}}\right) = 3.20\times10^6\ \text{N}$$

يمكننا تقريب مقدار هذه القوة بافتراض أنّ القوة ثابتة على طول الموصِّل ومتساوية مع القيمة عند $x = d/2$:

$$F_1 = i(d-2r)B = i\left(\frac{\mu_0 i(d-2r)}{2\pi\left(\frac{d}{2}\right)}\right) = \frac{\mu_0 i^2}{\pi}\frac{d-2r}{d}$$

$$= \frac{\left(4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}\right)\left(3.40\times10^6\ \text{A}\right)^2}{\pi}\frac{[25.0\ \text{cm}-2(5.00\ \text{cm})]}{25.0\ \text{cm}} = 2.77\times10^6\ \text{N}$$

تقع هذه القيمة في نطاق المعامل 2 من القيمة التي حسبناها للقوة، والتي تبدو منطقية. ومع ذلك، للتأكُّد فحسب، دعونا نحسب الطاقة الحركية للمقذوف باستخدام القيمة المحسوبة للقوة:

$$K = F_{\text{total}}L = 2F_1L = 2\left(3.20\times10^6\ \text{N}\right)(5.00\ \text{m}) = 32.0\times10^6\ \text{J}$$

تتفق هذه النتيجة مع 32.0 MJ المُفترَضة في حالة المسألة.

لاحظ أنّه إذا تحدَّد من خلال مطلِق القذائف هذا أن الطاقة الحركية لمقذوفٍ كتلته $m = 5.00\ \text{kg}$ هي 32.0 MJ، فستكون سرعته

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = \sqrt{\frac{2\left(32.0\times10^6\ \text{J}\right)}{5.00\ \text{kg}}} = 3.58\ \text{km/s}$$

سيكون مُطلِق القذائف قادرًا على إطلاق مقذوف بسرعة مقدارها 10 أضعاف سرعة الصوت، وهي ما تُعد أكبر بكثير من السرعة التقليدية لرصاصة، أي ما يعادل 3 أضعاف سرعة الصوت.

المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في حلقة سلك

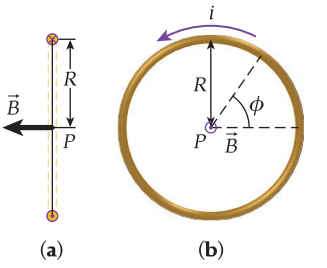
لإيجاد المجال المغناطيسي في مركز حلقة سلك دائرية حاملة للتيار. يوضّح الشكل 8.13a مقطعًا عرضيًا لحلقة دائرية نصف قطرها R تحمل التيار، i. وبتطبيق المعادلة 8.3، $dB = \mu_0 i\,ds\,\sin\theta/(4\pi r^2)$. على هذه الحالة، يمكننا أن نلاحظ أنّ $r = R$ و$\theta = 90°$ لكل عنصر تيار $i\,ds$ على طول الحلقة. وبالنسبة إلى مقدار المجال المغناطيسي في مركز الحلقة الناتجة عن كل عنصر تيار، فإنّنا نحصل على

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds\sin 90°}{R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds}{R^2}$$

بالدوران حول الحلقة في الشكل 8.13b، يمكننا ربط الزاوية ϕ بعنصر التيار من خلال $ds = R\,d\phi$. ما يسمح لنا بحساب مقدار المجال المغناطيسي في مركز الحلقة:

$$B = \int dB = \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{iR\,d\phi}{R^2} = \frac{\mu_0 i}{2R} \qquad (8.8)$$

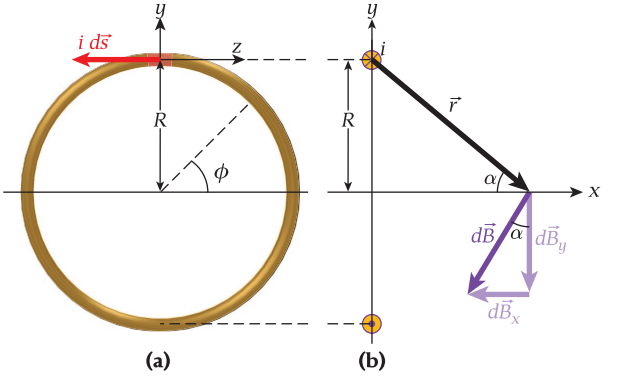
ضع في اعتبارك أنّ المعادلة 8.8 تُحدِّد مقدار المجال المغناطيسي فقط في مركز الحلقة، حيث يبلغ المقدار $B(r = 0) = \frac{1}{2}\mu_0 i/R$. ولتحديد اتجاه المجال المغناطيسي، نستخدم مرةً أخرى شكلاً مختلفًا من القاعدة الأولى لليد اليمنى. باستخدام يدك اليمنى، أشِر بإبهامك في اتجاه عنصر التيار (في الصفحة للدائرة العليا في الشكل 8.13a المميَّز بتقاطع). وبالسبابة في اتجاه المتجه القطري الناتج عن عنصر التيار (إلى أسفل)؛ ومن ثمَّ سيشير إصبعك الأوسط إلى اليسار. وباستخدام القاعدة الثالثة لليد اليمنى (الشكل 8.5)، نجد أيضًا أن التيار الموضَّح في الشكل 8.13 ينتج مجالاً مغناطيسيًا $\vec{B}$ متجهًا نحو اليسار.



الشكل 8.13 حلقة دائرية نصف قطرها R تحمل تيارًا، i. a) منظر جانبي، b) منظر أمامي. يشير التقاطع في الدائرة الصفراء العليا في الجزء (a) أنّ التيار أعلى الحلقة يكون في الصفحة، وتشير النقطة الموجودة في الدائرة الصفراء السفلى في الجزء (a) إلى أنّ التيار الوجود أسفل الحلقة يكون خارج الصفحة تقع النقطة P عند مركز الحلقة.

والآن، لنوجِد المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة على طول محور الحلقة بدلاً منه في المركز (الشكل 8.14). علينا أن ننشئ نظامًا إحداثيًا، بحيث يقع محور الحلقة على طول المحور x، ويقع مركز الحلقة عند $x = 0$ و$y = 0$ و$z = 0$. المتجه القطري $\vec{r}$ عبارة عن الإزاحة إلى أي نقطة على طول المحور x من عنصر التيار، $i\,d\vec{s}$ على طول الحلقة. ويقع عنصر التيار الموضَّح في الشكل 8.14 في اتجاه z السالب. بينما يقع المتجه القطري $\vec{r}$ في المستوى xy، ويكون متعامدًا على عنصر التيار. وتكون هذه الحالة مماثلة لأي عنصر تيار حول الحلقة. ومن ثمَّ، يمكننا استخدام المعادلة 8.3 حيث $\theta = 90°$ والحصول على تعبير لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي dB عند أي نقطة على طول المحور x:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds\sin 90°}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds}{r^2}$$



الشكل 8.14 الهندسة المستخدمة لحساب المجال المغناطيسي على طول محور حلقة الحاملة للتيار: (a) منظر أمامي، (b) منظر جانبي.

يُحدِّد شكل مختلف من القاعدة الأولى لليد اليمنى اتجاه المجال المغناطيسي dB: باستخدام يدك اليمنى، أشِر بإبهامك في اتجاه عنصر التيار (اتجاه z السالب)، وبالسبابة في اتجاه المتجه القطري (اتجاه x الموجب واتجاه y السالب)؛ وسيتحدَّد اتجاه المجال المغناطيسي dB من خلال إصبعك الأوسط (اتجاه x السالب واتجاه y السالب). يظهر المجال المغناطيسي dB في الشكل 8.14. وللحصول على المجال المغناطيسي الكلي، يتعيَّن علينا حساب التكامل على عنصر التيار التفاضلي. ومن تماثل الحالة، يمكننا ملاحظة أنَّ مركِّبة y للمجال المغناطيسي، dB_y، سيجري تكاملها إلى الصفر. وتتحدّد مركِّبة x للمجال المغناطيسي، dB_x، من خلال

$$dB_x = dB\sin\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds}{r^2}\sin\alpha$$

حيث α هي الزاوية بين $\vec{r}$ والمحور x (انظر الشكل 8.14b). ويمكننا التعبير عن مقدار $\vec{r}$ بدلالة x وR حيث $r = \sqrt{x^2 + R^2}$ والتعبير عن $\sin\alpha$ بدلالة x ونصف قطر الحلقة R على النحو التالي: $\sin\alpha = R/\sqrt{x^2 + R^2}$ ويمكننا بعد ذلك إعادة كتابة التعبير لإيجاد مركِّبة x للمجال المغناطيسي dB على هذا النحو

$$dB_x = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,ds}{x^2 + R^2}\frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}} = \frac{\mu_0 i\,ds}{4\pi}\frac{R}{\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

إنَّ هذه المعادلة الخاصة بإيجاد B_x يكون مستقلاً عن موقع عنصر التيار، وبالتالي يمكن تبسيط التكامل لإيجاد مقدار المجال الكلي إلى

$$B_x = \int dB_x = \frac{\mu_0 iR}{4\pi\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}} \int ds$$

بالدوران حول الحلقة، يمكننا ربط الزاوية ϕ بعنصر التيار من خلال $ds = R\,d\phi$ (انظر الشكل 8.14a)، ما يتيح لنا حساب المجال المغناطيسي على طول محور الحلقة:

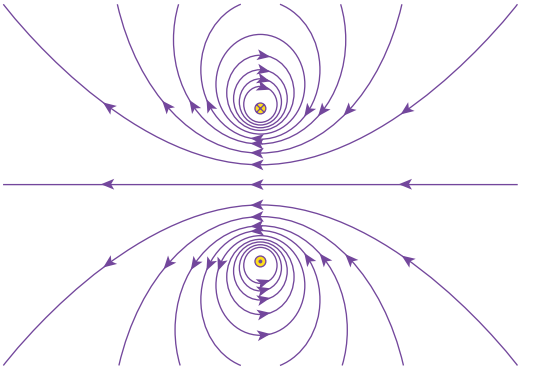
$$B_x = \frac{\mu_0 iR}{4\pi\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}} \int_0^{2\pi} R\,d\phi = \frac{\mu_0 i 2\pi}{4\pi} \frac{R^2}{\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

or

$$B_x = \frac{\mu_0 i}{2} \frac{R^2}{\left(x^2 + R^2\right)^{3/2}} \quad (8.9)$$

من خلال تطبيقنا السابق للشكل المختلف من القاعدة الأولى لليد اليمنى، نعلم أنَّ المجال المغناطيسي على طول محور الحلقة يكون في اتجاه x السالب، كما هو موضّح في الشكل 8.14. ويمكننا أيضًا تطبيق القاعدة الثالثة لليد اليمنى للحصول على اتجاه المجال المغناطيسي: في أي نقطة على الحلقة، أشِر بظلّ إبهامك على الحلقة في اتجاه التيار، وستنقبض أصابعك في اتجاهٍ يشير إلى أنَّ المجال داخل الحلقة يكون في اتجاه x السالب.

باستخدام أساليب أكثر تقدمًا وبمساعدة جهاز الكمبيوتر، يمكننا تحديد المجال المغناطيسي الناتج عن حلقة حاملة للتيار في نقاط أخرى في الفضاء. تظهر خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن حلقة سلكية في الشكل 8.15. ولا تكون قيمة المجال المغناطيسي التي تحدّدها المعادلة 8.8 صحيحةً إلا في نقطة المركز في الشكل 8.15. بينما لا تكون قيمة المجال المغناطيسي التي تحدّدها المعادلة 8.9 صحيحةً إلا على طول محور الحلقة.



الشكل 8.15 خطوط المجال المغناطيسي من حلقة سلك تحمل تيارًا. بالنظر إلى حافة الحلقة. تشير الدائرة الصفراء العلوية المحتوية على خطين متقاطعين إلى التيار المتجه داخل الصفحة، بينما تشير الدائرة الصفراء السفلية المحتوية على نقطة إلى التيار المتجه خارج الصفحة.

مسألة محلولة 8.3 المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في سلك يحتوي على حلقة

تتكوَّن حلقة يبلغ نصف قطرها $r = 8.30$ mm في منتصف سلكٍ طويل مستقيم معزول يحمل تيارًا مقداره $i = 26.5$ mA (الشكل 8.16a).

المسألة

ما مقدار المجال المغناطيسي في مركز الحلقة؟

الحل

فكّر يساوي المجال المغناطيسي في مركز الحلقة مجموع متجهات المجالات المغناطيسية الناتجة عن كلٍّ من السلك الطويل المستقيم والحلقة.

ارسم يظهر المجال المغناطيسي الناتج عن السلك الطويل المستقيم، $\vec{B}_{\text{wire}}$ والمجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة، $\vec{B}_{\text{loop}}$ في الشكل 8.16b.

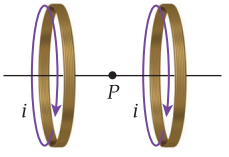
ـ يُتبع

سؤال الاختبار الذاتي 8.3

أثبت أن المعادلة 8.9 لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي على طول محور حلقة حاملة للتيار تُختزَل إلى المعادلة 8.8 لإيجاد مقدار المجال المغناطيسي عند مركز الحلقة الحاملة للتيار.

مراجعة المفاهيم 8.6

تحمل حلقتان متماثلتان من السلك التيار نفسه، i، كما يظهر في الشكل. ما اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة P؟



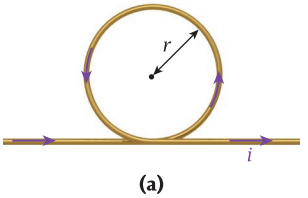
a) لأعلى (باتجاه أعلى الصفحة)

b) باتجاه اليمين

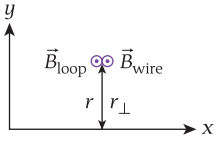
c) لأسفل

d) باتجاه اليسار

e) المجال المغناطيسي عند النقطة P يساوي صفرًا.



(a)



(b)

الشكل 8.16 (a) حلقة نصف قطرها r في سلك طويل مستقيم معزول يحمل تيارًا، i. (b) أُزيحَ المجال المغناطيسي من السلك والمجال المغناطيسي من الحلقة قليلاً للتوضيح.

ابحث باستخدام القاعدة الثالثة لليد اليمنى، نجد أنَّ كلا المجالين المغناطيسيين يشيران خارج الصفحة في مركز الحلقة، كما هو موضَّح في الشكل 8.16b. ومن ثَمَّ، يمكننا جمع مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن السلك ومقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة. يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن السلك في مركز الحلقة من خلال المعادلة 8.4:

$$B_{\text{wire}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r_\perp}$$

حيث $r_\perp$ هي المسافة العمودية من السلك، والتي تساوي r، نصف قطر الحلقة. بينما يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة في مركزها من خلال المعادلة 8.8:

$$B_{\text{loop}} = \frac{\mu_0 i}{2r}$$

حوّل إلى أبسط صورة يجب أن نجمع مقداري المجالين المغناطيسيين بما أنَّ اتجاه المتجهات واحد:

$$B = B_{\text{wire}} + B_{\text{loop}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} + \frac{\mu_0 i}{2r} = \frac{\mu_0 i}{2r}\left(\frac{1}{\pi} + 1\right).1$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية نحصل على

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r}\left(\frac{1}{\pi} + 1\right) = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(26.5 \times 10^{-3}\ \text{A}\right)}{2\left(8.30 \times 10^{-3}\ \text{m}\right)}\left(\frac{1}{\pi} + 1\right) = 2.64463 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

قرِّب نقرِّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية، ونلاحظ اتجاه المجال:

$$\vec{B} = 2.64 \times 10^{-6}\ \text{T}\ \textbf{خارج الصفحة}$$

تحقَّق ثانية للتحقق ثانية من النتيجة التي توصلنا إليها، يمكننا حساب مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن كلٍّ من السلك والحلقة بشكلٍ منفصل. يبلغ مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن السلك

$$B_{\text{wire}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(26.5 \times 10^{-3}\ \text{A}\right)}{2\pi\left(8.30 \times 10^{-3}\ \text{m}\right)} = 6.385 \times 10^{-7}\ \text{T}$$

بينما يبلغ مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة

$$B_{\text{loop}} = \frac{\mu_0 i}{2r} = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(26.5 \times 10^{-3}\ \text{A}\right)}{2\left(8.30 \times 10^{-3}\ \text{m}\right)} = 2.006 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

ويتطابق مجموع هذين المقدارين مع النتيجة التي توصلنا إليها:

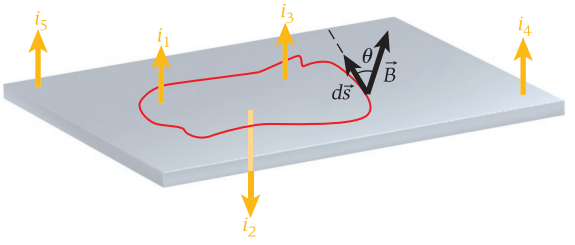
$$6.385 \times 10^{-7}\ \text{T} + 2.006 \times 10^{-6}\ \text{T} = 2.64 \times 10^{-6}\ \text{T}$$

8.3 قانون أمبير Ampere's Law

إن حساب المجال الكهربائي الناتج عن توزيع شحنة كهربائية يمكن أن يتطلب إجراء حساب تكاملٍ ليس بالسهل. ومع ذلك، إذا كان لتوزيع الشحنة تماثل أسطواني أو كروي أو سطحي، فيمكننا تطبيق قانون غاوس والحصول على المجال الكهربائي بطريقة رائعة. وبالمثل، قد تنطوي عملية حساب المجال المغناطيسي الناتج عن توزيع عشوائي لعناصر التيار باستخدام قانون بيو–سافار (المعادلة 8.1) على تقييم تكاملٍ صعب. وبدلاً من ذلك، يمكننا تجنّب استخدام قانون بيو–سافار وتطبيق **قانون أمبير** بدلاً منه لحساب المجال المغناطيسي الناتج عن توزيع عناصر التيار عندما يكون للتوزيع تماثل أسطواني أو غير ذلك من أنواع التماثل. وفي كثيرٍ من الأحيان، يمكن حل المسائل بجهدٍ أقل بكثير بهذه الطريقة مقارنةً باستخدام التكامل المباشر. العبارة الرياضية لقانون أمبير هي

$$\oint \vec{B} \bullet d\vec{s} = \mu_0 i_{\text{enc}} \qquad (8.10)$$

يعني الرمز $\oint$ أنَّ حساب التكامل الخاص بالتكاملية، $\vec{B} \bullet d\vec{s}$، تمَّ على حلقةٍ مغلقة، تُسمَّى **الحلقة الأمبيرية**. يتم اختيار هذه الحلقة بحيث لا يكون حساب التكامل في المعادلة 8.10 صعبًا، وهو إجراءٌ مماثل للإجراء المُستخدَم في تطبيق قانون جاوس. يساوي التيار الكلي المغلق في هذه الحلقة i_{enc}، والذي يُعد مشابهًا أيضًا لقانون جاوس، حيث يَحصُر السطح المغلق المحدَّد شحنةً كلية.



الشكل 8.17 خمسة تيارات وحلقة أمبيرية.

وكمثالٍ على كيفية استخدام قانون أمبير، تأمل التيارات الخمسة الموضَّحة في الشكل 8.17، والتي تكون جميعها متعامدة على المستوى. تخصر الحلقة الأمبيرية، التي يمثلها الخط الأحمر، التيارات i_1، وi_2، وi_3، وتستبعد التيارين i_4 وi_5. ووفقًا لقانون أمبير، يتحدَّد تكامل الحلقة المغلقة على المجال المغناطيسي الناتج عن هذه التيارات الثلاثة من خلال

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint B\cos\theta\, ds = \mu_0 (i_1 - i_2 + i_3)$$

حيث θ هي الزاوية بين اتجاه المجال المغناطيسي، $\vec{B}$ واتجاه عنصر الطول، $d\vec{s}$ عند كل نقطة على طول الحلقة الأمبيرية. ويمكن إجراء التكامل على الحلقة الأمبيرية في أيٍّ من الاتجاهين. ويشير الشكل 8.17 إلى اتجاه تكامل من الاتجاه $d\vec{s}$ إلى جانب المجال المغناطيسي الناتج. ويمكن تحديد رمز إشارة التيارات المساهمة باستخدام إحدى قواعد اليد اليمنى: اقبض أصابعك في اتجاه التكامل، ومن ثَمَّ تكون التيارات المتجهة في نفس اتجاه إبهامك موجبة. ويكون تياران من التيارات الثلاثة في الحلقة الأمبيرية موجبين، ويكون الثالث سالبًا. من السهل جمع التيارات الثلاثة، لكنّ التكامل $\oint B\cos\theta\, ds$ لا يمكن حسابه بسهولة. ومع ذلك، لنتناول بعض الحالات الخاصة التي تحتوي فيها الحلقات الأمبيرية على توزيعاتٍ متماثلة للتيار يمكن استغلالها لإجراء التكامل.

المجال المغناطيسي داخل سلك طويل مستقيم

يوضِّح الشكل 8.18 التيار، i، المتدفق خارج الصفحة في سلك بمقطع عرضي دائري يبلغ نصف قطره R. وهذا التيار موزّع بانتظام على مساحة المقطع العرضي للسلك. ولإيجاد المجال المغناطيسي الناتج عن هذا التيار، نستخدم حلقة أمبيرية يبلغ نصف قطرها $r_\perp$، تمثلها الدائرة الحمراء. إذا كانت لـ $\vec{B}$ مركَّبة خارجية (أو داخلية)، فستكون لها، بالتماثل، مركَّبة خارجية (أو داخلية) عند كل النقاط الموجودة حول الحلقة، ولا يمكن أن يكون خط المجال المغناطيسي المتناظر مغلقًا أبدًا. ولذلك، يجب أن يكون $\vec{B}$ مماسيًا للحلقة الأمبيرية. ومن ثَمَّ، يمكننا إعادة كتابة تكامل قانون أمبير على النحو التالي:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint d\vec{s} = B 2\pi r_\perp$$

يمكننا حساب التيار المغلق من نسبة مساحة الحلقة الأمبيرية إلى مساحة المقطع العرضي للسلك.

$$i_{\text{enc}} = i \frac{A_{\text{loop}}}{A_{\text{wire}}} = i \frac{\pi r_\perp^2}{\pi R^2}$$

وبالتالي، نحصل على

$$2\pi B r_\perp = \mu_0 i \frac{\pi r_\perp^2}{\pi R^2}$$

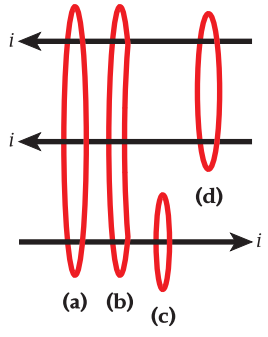
أو

$$B = \left(\frac{\mu_0 i}{2\pi R^2}\right) r_\perp \qquad (8.11)$$

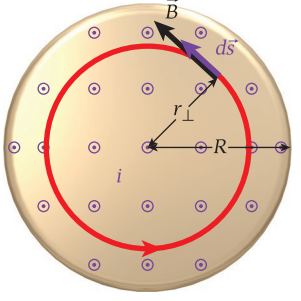
لنقارن بين المعادلات التي تصف مقادير المجال المغناطيسي خارج السلك وداخله — المعادلتان 8.4 و8.11. أولاً، بالتعويض عن R بـ $r_\perp$ في كلا المعادلتين، نحصل على النتيجة المماثلة لمقدار المجال المغناطيسي على سطح السلك في كلتا الحالتين: $B(R) = \mu_0 i/2\pi R$. تعطي كلتا المعادلتين الحل نفسه على سطح السلك. داخل السلك، نجد أنّ مقدار المجال المغناطيسي يزداد خطيًا حيث $r_\perp$ حتى يصل إلى القيمة $B(R) = \mu_0 i/(2\pi R)$، ثم يقل مع معكوس $r_\perp$. ويوضِّح الشكل 8.19 هذه التغيرات في الرسم البياني في الأسفل. يوضِّح الجزء العلوي من الشكل المقطعَ العرضي عبر السلك (الجزء الذهبي)، وخطوط المجال المغناطيسي (الدوائر السوداء، وهي متباعدة للإشارة إلى شدة المجال المغناطيسي)، ومتجهات المجال المغناطيسي عند نقاط محدَّدة في الفضاء (الأسهم الحمراء).

مراجعة المفاهيم 8.7

تحمل الأسلاك الثلاثة تيارات بالمقدار نفسه، i، في الاتجاهات الموضَّحة في الشكل. وتظهر أربع حلقات أمبيرية (a)، و(b)، و(c)، و(d). ما الحلقة الأمبيرية التي يكون فيها مقدار $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ عند أقصى قيمة له؟



a) الحلقة a
b) الحلقة b
c) الحلقة c
d) الحلقة d
e) تنتج كلُّ الحلقات الأربع القيمة نفسها لـ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$



الشكل 8.18 استخدام قانون أمبير لإيجاد المجال المغناطيسي المتولِّد داخل سلك مستقيم طويل.

8.4 المجالات المغناطيسية الخاصة بالملفات اللولبية والحلقية
Magnetic Fields of Solenoids and Toroids

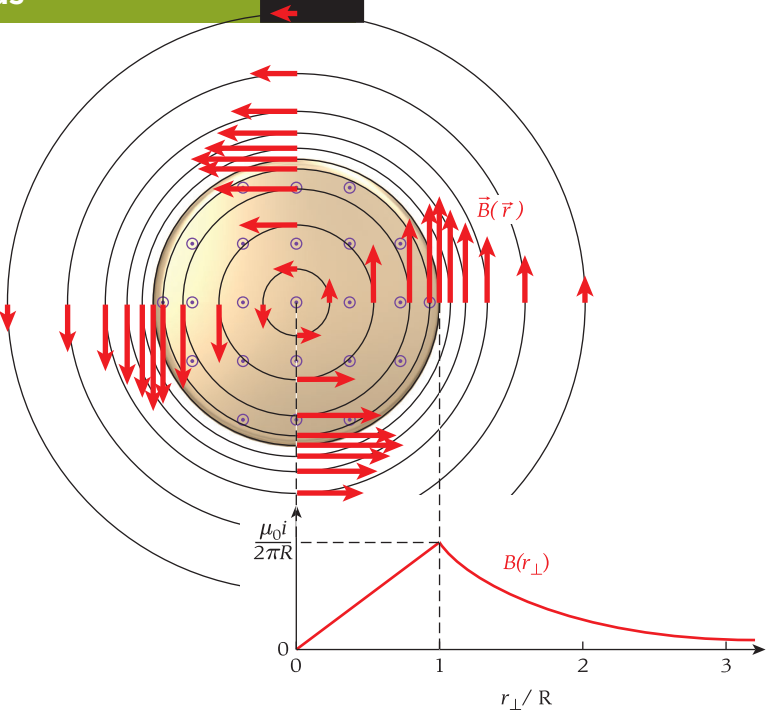
رأينا أنّ التيار المتدفق عبر حلقة واحدة من السلك يُنتِج مجالاً مغناطيسيًا غير منتظم، كما هو موضَّح في الشكل 8.15. ومع ذلك، غالبًا ما تتطلب تطبيقات الحياة اليومية مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا. يُسمى الجهاز المُستخدَم عادةً لتوليد مجال مغناطيسي منتظم **ملف هلمهولتز** (الشكل 8.20a). يتكوَّن ملف هلمهولتز من حلقتين محوريتين من السلك. وتتكوَّن كل حلقة محورية من حلقاتٍ متعددة (ملفاتٍ أو لفات) من سلك واحد، وبالتالي تعمل من الناحية المغناطيسية كحلقة واحدة.

تظهر خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن ملف هلمهولتز في الشكل 8.20b. ويمكنك ملاحظة أنَّ ثمة منطقة ذات مجال مغناطيسي منتظم (تتميز بأجزاءٍ فيها خطوط المجال متوازية) في المركز بين الحلقات، على عكس المجال الناتج عن حلقة واحدة الموضَّح في الشكل 8.15. مرةً أخرى، حُسبَت خطوط المجال هذه بمساعدة جهاز كمبيوتر لتوفير فهم نوعي لهندسة المجالات المغناطيسية.

بالانتقال إلى خطوةٍ أبعد بشأن الحلقات المتعددة، يوضِّح الشكل 8.21 خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن أربع حلقاتٍ محورية من السلك. تُوسَّع منطقة المجال المغناطيسي المنتظم في مركز الحلقات، ولكن لاحظ أنَّ المجال لا يكون منتظمًا بالقرب من الأسلاك وبالقرب من الطرفين.

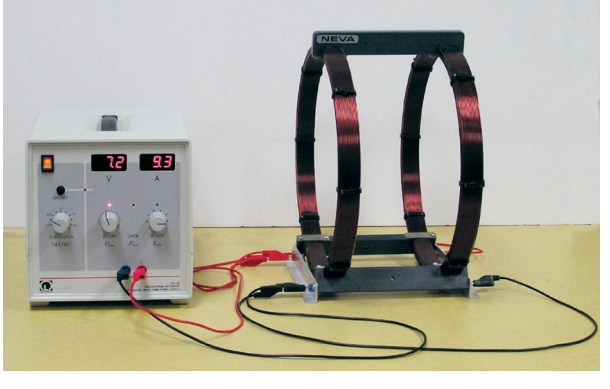
ويتولَّد المجال المغناطيسي المنتظم القوي من **ملف لولبي**، يتكوَّن من حلقاتٍ كثيرة، متقاربة من سلك ملفوف. ويوضِّح الشكل 8.22 خطوط المجال المغناطيسي الناتجة عن ملف لولبي ذي 600 لفة. ويمكنك ملاحظة أنَّ خطوط المجال المغناطيسي قريبة للغاية من بعضها داخل الملف اللولبي ومتباعدة في الجزء الخارجي منه. وكما هو الحال داخل ملف هلمهولتز (الشكل 8.20b)، يكون المجال المغناطيسي منتظمًا داخل الملف اللولبي. ويُعد تباعد خطوط المجال مقياسًا لشدة المجال المغناطيسي، ويمكنك ملاحظة أنَّ المجال المغناطيسي أقوى بكثير داخل الملف اللولبي مقارنةً بالجزء الخارجي من الملف اللولبي.

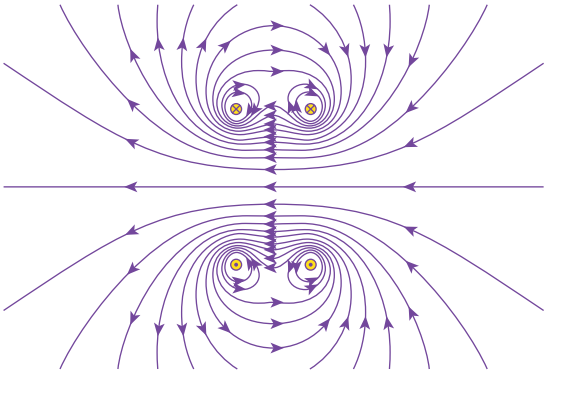
تكون قيمة المجال المغناطيسي في الجزء الخارجي من الملف اللولبي *النموذجي* صفرًا، بينما تكون القيمة داخله عبارة عن قيمة محددة ثابتة منتظمة. ولتحديد مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي نموذجي، يمكننا تطبيق قانون أمبير (المعادلة 8.10) على جزءٍ من ملف لولبي متباعد عن طرفيه (الشكل 8.23). وللقيام بذلك، نختار أولاً حلقة أمبيرية لإجراء عملية التكامل عليها. يتمثل الاختيار الأفضل،



الشكل 8.19 تغيرات المجال المغناطيسي بتغير البعد من مركز سلك يتدفق فيه تيار خارج الصفحة.

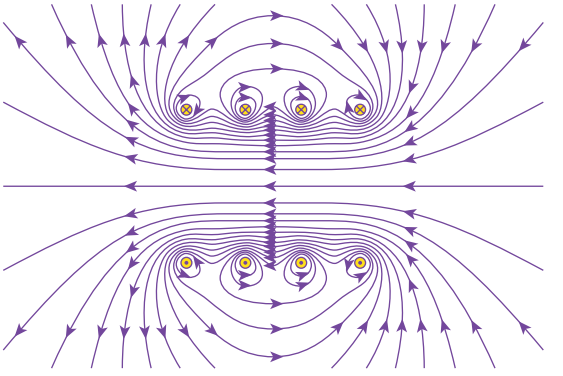




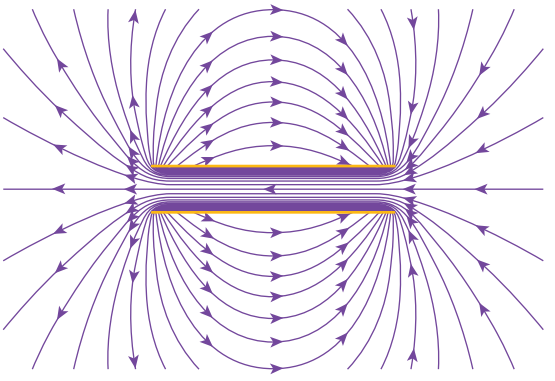


(a) (b)

الشكل 8.20 (a) ملف هلمهولتز نموذجي يُستخدَم في التجارب الفيزيائية لتوليد مجال مغناطيسي منتظم في الجزء الداخلي منه. (b) خطوط المجال المغناطيسي للملف هلمهولتز.



الشكل 8.21 المجال المغناطيسي الناتج عن أربع ملفات من أسلاك محورية بها الكثير من اللفات.

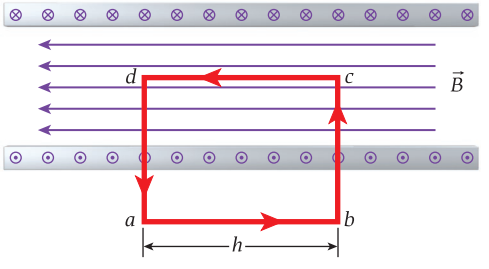


الشكل 8.22 خطوط المجال المغناطيسي لملف لولبي مكوَّن من 600 لفة. يتدفق التيار في الجزء العلوي من الملف اللولبي إلى داخل الصفحة، بينما يتدفق التيار في الجزء السفلي من الملف اللولبي إلى خارجها.

الموضَّح بالمستطيل الأحمر في الشكل 8.23، في مسار مغلق للتيار والاستفادة من تماثل الملف اللولبي، وكذلك تحويل تقييم التكامل إلى أبسط صورة:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

تبلغ قيمة التكامل الثالث على الضلع الأيمن، الواقع بين النقطتين c وd في الجزء الداخلي من الملف اللولبي، Bh. بينما تبلغ قيمة التكاملين الثاني والرابع صفرًا؛ لأنّ المجال المغناطيسي يكون متعامدًا على اتجاه التكامل. ويبلغ التكامل الأول، الواقع بين النقطتين a وb في الجزء الخارجي من الملف اللولبي النموذجي، صفرًا لأنَّ مقدار المجال المغناطيسي يكون صفرًا خارج الملف اللولبي. ومن ثَمَّ، تبلغ قيمة التكامل على الحلقة الأمبيرية بالكامل Bh.



الشكل 8.23 حلقة أمبيرية لتحديد مقدار المجال المغناطيسي لملف لولبي نموذجي.

التيار المغلق هو التيار المحصور في لفات الملف اللولبي الموجودة ضمن الحلقة الأمبيرية. ويكون التيار واحدًا في كل لفة لأنَّ الملف اللولبي مصنوع من سلك واحد، ويتدفق التيار نفسه عبر كل لفة. وبالتالي، فإنَّ التيار المغلق يساوي عدد اللفات مضروبًا في التيار:

$$i_{\text{enc}} = nhi$$

حيث n هو عدد اللفات لكل وحدة طول. لذلك، وفقًا لقانون أمبير، فإنّنا نحصل على

$$Bh = \mu_0 nhi$$

وبالتالي، يبلغ مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي نموذجي

$$B = \mu_0 ni \tag{8.12}$$

لا تكون المعادلة 8.12 صحيحةً إلا بعيدًا عن طرفي الملف اللولبي. ولاحظ أنَّ B لا يعتمد على موقع داخل الملف اللولبي: يُنتِج الملف اللولبي النموذجي مجالاً مغناطيسيًا ثابتًا ومنتظمًا داخله ولا يُنتِج مجالاً خارجه. تكون للملف اللولبي الفعلي، مثل الملف اللولبي الموضَّح في الشكل 8.22، مجالاتٌ حافيَّة بالقرب من طرفيه، ولكن لا يزال بإمكانه إنتاج مجال مغناطيسي منتظم عالي الجودة.

مثال 8.2 الملف اللولبي

للملف اللولبي الخاص بالكاشف STAR الموجود في مختبر بروكهافن الوطني في نيويورك، والذي تناولناه بالمناقشة في الوحدة 7، مجال مغناطيسي مقداره 0.50 T عندما يمر فيه تيار مقداره 0.40 kA. ويبلغ طول الملف اللولبي 8.0 m.

المسألة

ما عدد اللفات في هذا الملف اللولبي، بافتراض أنّه ملف لولبي نموذجي؟

– يُتبع

الحل

نستخدم المعادلة 8.12 لحساب مقدار المجال المغناطيسي لملف لولبي نموذجي:

$$B = \mu_0 n i \quad \text{(i)}$$

يتحدَّد عدد اللفات لكل وحدة طول من خلال

$$n = \frac{N}{L} \quad \text{(ii)}$$

حيث N هو عدد اللفات، بينما L هو طول الملف اللولبي. بالتعويض عن n من المعادلة (ii) في المعادلة (i)، نحصل على

$$B = \mu_0 i \frac{N}{L} \quad \text{(iii)}$$

بحل المعادلة (iii) لإيجاد عدد اللفات، نحصل على

$$N = \frac{BL}{\mu_0 i} = \frac{(0.50\ \text{T})(8.0\ \text{m})}{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \frac{\text{T m}}{\text{A}}\right)\left(0.40 \times 10^{3}\ \text{A}\right)} = 8.0 \times 10^{3}\ \text{لفة}$$

مراجعة المفاهيم 8.8

لديك ملفٌّ لولبي يحتوي على عدد محدد من اللفات، موصَّل بمصدر طاقة يمكنه إمداد كمية ثابتة من التيار. لمضاعفة المجال داخل الملف اللولبي، يمكنك

a) مضاعفة نصف قطر الملف اللولبي.

b) شطر نصف قطر الملف اللولبي نصفين.

c) مضاعفة طول الملف اللولبي.

d) شطر طول الملف اللولبي نصفين.

في حال ثني الملف اللولبي بحيث يمكن أن يلتقي طرفاه (الشكل 8.24)، فإنّه يكتسب شكلاً دائريًا (طارة) بحيث يكوِّن السلك سلسلةً من الحلقات، يحمل كلٌّ منها التيار نفسه المتدفق عبره. ويُسمَّى هذا الملف *المغناطيس الحلقي*، أو **الملف الحلقي**. كما هو الحال بالنسبة إلى الملف اللولبي النموذجي، يبلغ مقدار المجال المغناطيسي خارج ملفات مغناطيس حلقي نموذجي صفرًا. يمكن حساب مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف حلقي باستخدام قانون أمبير واختيار حلقة أمبيرية على هيئة دائرة نصف قطرها r، مثل هذه $r > r_2 < r_1$، حيث r_1 وr_2 هما نصفا القطر الداخلي والخارجي للملف الحلقي. ودائمًا ما يكون المجال المغناطيسي مماسًا للحلقة الأمبيرية، ومن ثمَّ يكون لدينا

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 2\pi r B$$

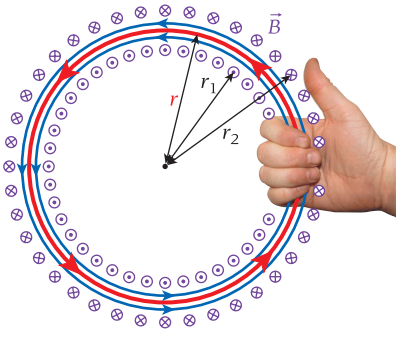
التيار المغلق هو عدد الحلقات (أو اللفات)، N، في الملف الحلقي مضروبًا في التيار، i، المار في السلك (لكل حلقة)، ومن ثمَّ، يعطينا قانون أمبير

$$2\pi r B = \mu_0 N i$$

ولذلك، يتحدَّد مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف الحلقي من خلال

$$B = \frac{\mu_0 N i}{2\pi r} \quad (8.13)$$

لاحظ أنَّ على عكس المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي، يعتمد مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف حلقي على نصف القطر. فكلما زاد نصف القطر، قلَّ مقدار المجال المغناطيسي. يُمكن معرفة اتجاه المجال المغناطيسي باستخدام *القاعدة الرابعة لليد اليمنى*: إذا لففتَ أصابع يدك اليمنى حول الملف الحلقي في اتجاه التيار، كما يظهر في الشكل 8.24، فإنَّ الإبهام سيشير في اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف الحلقي.



الشكل 8.24 ملف حلقي
يحتوي على حلقة أمبيرية (حمراء) على شكل دائرة نصف قطرها r. تنص القاعدة الرابعة لليد اليمنى على أنك إذا وضعت أصابع يدك اليمنى في اتجاه تدفق التيار، فسيوضح الإبهام اتجاه المجال المغناطيسي داخل المغناطيس الحلقي.

مسألة محلولة 8.4 المجال المغناطيسي لملف حلقي

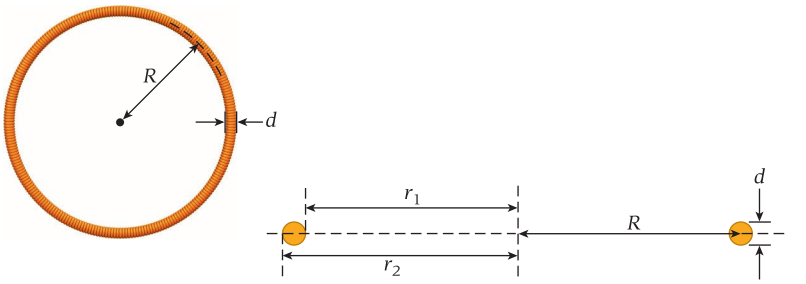
مغناطيس حلقي مصنوع من سلك نحاسي طوله 202 m له القدرة على حمل تيار مقداره $i = 2.40$ A. يبلغ متوسط نصف قطر المغناطيس الحلقي له $R = 15.0$ cm ويبلغ قطر مقطعه العرضي $d = 1.60$ cm (الشكل 8.25a).

المسألة

ما أكبر مجال مغناطيسي عند مركز مغناطيس حلقي نصف قطره، R؟

الحل

فكِّر يُحدَّد عدد اللفات في المغناطيس الحلقي من خلال قسمة طول السلك على محيط مساحة المقطع العرضي له. وباستخدام هذه المُعلِّمات، يمكن حساب المجال المغناطيسي للمغناطيس الحلقي عندما تكون $r = R$.



الشكل 8.25 (a) مغناطيس حلقي. (b) مقطع عرضي للمغناطيس الحلقي.

ارسم يعرض الشكل 8.25b مقطعًا عرضيًا للمغناطيس الحلقي.

ابحث تمثل المعادلة 8.13 مقدار المجال المغناطيسي لمغناطيس حلقي:

$$B = \frac{\mu_0 N i}{2\pi R} \quad \text{(i)}$$

حيث N هو عدد اللفات وR هو نصف القطر الذي يُقاس عنده المجال المغناطيسي. يمكن إيجاد عدد اللفات، N، من خلال قسمة طول سلك الملف، L، على محيط مساحة المقطع العرضي:

$$N = \frac{L}{\pi d} \quad \text{(ii)}$$

حيث d هو قطر مساحة المقطع العرضي للملف.

حوّل إلى أبسط صورة يمكننا دمج المعادلتين (i) و(ii) للحصول على تعبير B:

$$B = \frac{\mu_0 (L/\pi d) i}{2\pi R} = \frac{\mu_0 L i}{2\pi^2 R d}$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية نحصل على

$$B = \frac{\mu_0 L i}{2\pi^2 R d} = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)(202\ \text{m})(2.40\ \text{A})}{2\pi^2 \left(15.0 \times 10^{-2}\ \text{m}\right)\left(1.60 \times 10^{-2}\ \text{m}\right)} = 0.0128597\ \text{T}$$

قرّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$B = 1.29 \times 10^{-2}\ \text{T}$$

تحقَّق ثانية للتحقق ثانيةً، فإننا نحسب مقدار المجال داخل ملف لولبي طوله مساوٍ لمحيط المغناطيس الحلقي. عدد اللفات لكل وحدة طول هو

$$n = \frac{L/\pi d}{2\pi R} = \frac{L}{2\pi^2 R d} = \frac{(202\ \text{m})}{2\pi^2 \left(15.0 \times 10^{-2}\ \text{m}\right)\left(1.60 \times 10^{-2}\ \text{m}\right)} = 4264\ \text{لفة/m}$$

مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي يحتوي على هذا العدد من اللفات لكل وحدة طول هو

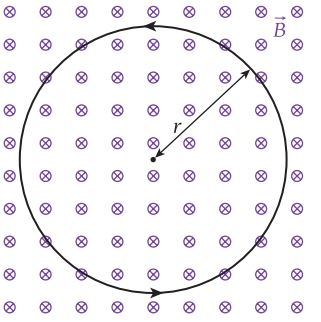
$$B = \mu_0 n i = \left(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(4264\ \text{m}^{-1}\right)(2.40\ \text{A}) = 1.29 \times 10^{-2}\ \text{T}$$

ومن ثَمَّ، تبدو الإجابة التي توصلنا إليها بخصوص مقدار المجال داخل الملف الحلقي منطقية.

مسألة محلولة 8.5 حركة الإلكترون داخل ملف لولبي يمر فيه تيار

يحتوي الملف اللولبي النموذجي على 200 لفة لكل cm. يتحرّك الإلكترون داخل الملف اللولبي في دائرة نصف قطرها $r = 3.00$ cm متعامدًا على محور الملف اللولبي. يتحرّك الإلكترون بسرعة $v = 0.0500c$، حيث c هي سرعة الضوء.

– يُتبع



الشكل 8.26 إلكترون يتحرّك في مسار دائري داخل ملف لولبي.

المسألة

ما مقدار التيار في الملف اللولبي؟

الحل

فكّر يُنتج الملف اللولبي مجالاً مغناطيسيًا منتظمًا، يتناسب مع التيار المتدفق في ملفه. يرتبط نصف قطر حركة الإلكترون الدائرية بسرعة الإلكترون والمجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي.

ارسم يوضح الشكل 8.26 المسار الدائري للإلكترون في المجال المغناطيسي المنتظم للملف اللولبي.

ابحث يُحدَّد مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي من خلال

$$B = \mu_0 ni \quad \text{(i)}$$

حيث i هو التيار داخل الملف اللولبي وn هو عدد اللفات لكل وحدة طول. توفِّر القوة المغناطيسية قوة الجذب المركزي التي يحتاج إليها الإلكترون ليتحرّك في مسار دائري، وبذلك يُمكن ربط نصف قطر مسار الإلكترون بـ $\vec{B}$:

$$r = \frac{mv}{eB} \quad \text{(ii)}$$

حيث m هي كتلة الإلكترون، و v هي سرعته، و e هو مقدار شحنة الإلكترون.

حوّل إلى أبسط صورة بدمج المعادلتين (i) و(ii)، يصبح لدينا

$$r = \frac{mv}{e(\mu_0 ni)}$$

بحل هذه المعادلة لإيجاد التيار المتدفق في الملف اللولبي، نحصل على

$$i = \frac{mv}{er\mu_0 n} \quad \text{(iii)}$$

احسب تم تحديد سرعة الإلكترون بدلالة سرعة الضوء:

$$v = 0.0500c = 0.0500\left(3.00\times10^{8}\ \text{m/s}\right) = 1.50\times10^{7}\ \text{m/s}$$

بالتعويض بسرعة الإلكترون والقيم العددية الأخرى في المعادلة (iii)، نحصل على

$$i = \frac{mv}{er\mu_0 n} = \frac{\left(9.11\times10^{-31}\ \text{kg}\right)\left(1.50\times10^{7}\ \text{m/s}\right)}{\left(1.602\times10^{-19}\ \text{C}\right)\left(3.00\times10^{-2}\ \text{m}\right)\left(4\pi\times10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(200\times10^{2}\ \text{m}^{-1}\right)}$$

$$= 0.113132\ \text{A}.$$

قرّب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$i = 0.113\ \text{A}$$

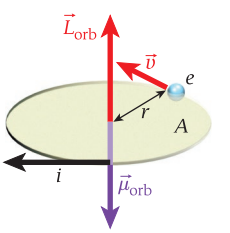
تحقَّق ثانية للتحقق ثانيةً من النتيجة، فإننا نستخدمها لحساب مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي:

$$B = \mu_0 ni = \left(4\pi\times10^{-7}\ \text{T m/A}\right)\left(200\times10^{2}\ \text{m}^{-1}\right)(0.113\ \text{A}) = 0.00284\ \text{T}$$

يبدو مقدار المجال المغناطيسي هذا منطقيًا. ومن ثَمَّ، تبدو القيمة التي حسبناها للتيار داخل الملف اللولبي منطقية.

8.5 الذرات كمغناطيسات Atoms as Magnets

تحتوي الذرات التي تتكوَّن منها كل مادة على إلكتروناتٍ متحركة، تُكوِّن حلقات تيار تُنتج مجالاتٍ مغناطيسية. وفي معظم المواد، تكون حلقات التيار هذه مُوجَّهة بشكل عشوائي وتكون محصلة المجال المغناطيسي الذي تُنتجه معدومة. في بعض المواد، يصطف جزءٌ من حلقات التيار هذه بمحاذاة بعضها البعض. وتُنتج هذه المواد، التي يُطلق عليها *المواد المغناطيسية* (القسم 8.6)، محصلة مجال مغناطيسي. ويمكن أن تحتوي مواد أخرى على حلقات تيار تتم محاذاتها عن طريق مجال مغناطيسي خارجي وتصبح مُمغنطة.



الشكل 8.27 إلكترون يتحرّك بسرعة ثابتة في مدار دائري في ذرة.

لنتأمل نموذجًا مبسَّطًا جدًا للذرة: إلكترون يتحرّك بسرعة ثابتة v في مدار دائري نصف قطره r (الشكل 8.27). يُمكننا أن نفكّر في شحنة الإلكترون المتحركة على أنها التيار، i. يتم تعريف التيار على أنه الشحنة المارة بنقطة معينة في كل وحدة زمنية. في هذه الحالة، الشحنة هي شحنة الإلكترون، حيث مقدارها هو e، والزمن هو الزمن الدوري، T، لمدار الإلكترون. ومن ثَمَّ، يُمكن الحصول على مقدار التيار عن طريق

$$i = \frac{e}{T} = \frac{e}{2\pi r/v} = \frac{ve}{2\pi r}$$

يُمكن الحصول على مقدار عزم ثنائي القطب المغناطيسي للإلكترون المتحرك عن طريق

$$\mu_{\text{orb}} = iA = \frac{ve}{2\pi r}\left(\pi r^2\right) = \frac{ver}{2} \tag{8.14}$$

يُمكن الحصول على مقدار كمية الحركة الزاوية (الزخم الزاوي) المدارية للإلكترون عن طريق

$$L_{\text{orb}} = rp = rmv$$

حيث m هي كتلة الإلكترون. بحل المعادلة 8.14 لإيجاد v والتعويض في معادلة كمية الحركة الزاوية المدارية سنحصل على

$$L_{\text{orb}} = rm\left(\frac{2\mu_{\text{orb}}}{er}\right) = \frac{2m\mu_{\text{orb}}}{e}$$

نظرًا لأن عزم ثنائي القطب المغناطيسي وكمية الحركة الزاوية عبارة عن كمياتٍ متجهة، يُمكننا أن نكتب

$$\vec{\mu}_{\text{orb}} = -\frac{e}{2m}\vec{L}_{\text{orb}} \tag{8.15}$$

ويجب وضع رمز السالب؛ لأن التيار يُعرَّف بدلالة اتجاه تدفق الشحنة الموجبة.

مثال 8.3 العزم المغناطيسي المداري لذرة الهيدروجين

افترض أنَّ ذرة الهيدروجين تتكوَّن من إلكترون يتحرّك بسرعة v في مدار دائري نصف قطره r حول بروتون ثابت. وافترض كذلك أنَّ قوة الجذب المركزي التي تُحافظ على حركة الإلكترون في مداره عبارة عن قوة كهروستاتيكية بين البروتون والإلكترون. نصف قطر مدار الإلكترون هو $r = 5.29 \times 10^{-11}\ \text{m}$.

المسألة

ما مقدار العزم المغناطيسي المداري لذرة الهيدروجين؟

الحل

مقدار العزم المغناطيسي المداري هو

$$|\mu_{\text{orb}}| = \frac{e}{2m}L_{\text{orb}} = \frac{e}{2m}(rmv) = \frac{erv}{2} \tag{i}$$

بمساواة مقدار قوة الجذب المركزي التي تُحافظ على حركة الإلكترون في مداره بالقوة الكهروستاتيكية بين الإلكترون والبروتون، نحصل على

$$\frac{mv^2}{r} = k\frac{e^2}{r^2}$$

حيث k هو ثابت كولوم. يُمكننا حل هذه المعادلة لإيجاد سرعة الإلكترون:

$$v = e\sqrt{\frac{k}{mr}} \tag{ii}$$

بالتعويض عن v من المعادلة (ii) في المعادلة (i) نحصل على

$$|\mu_{\text{orb}}| = \frac{er}{2}\left(e\sqrt{\frac{k}{mr}}\right) = \frac{e^2}{2}\sqrt{\frac{kr}{m}}$$

عند التعويض بالقيم العددية السابقة، نحصل على

$$|\mu_{\text{orb}}| = \frac{\left(1.602\times10^{-19}\text{C}\right)^2}{2}\sqrt{\frac{\left(8.99\times10^{9}\text{N m}^2/\text{C}^2\right)\left(5.29\times10^{-11}\text{m}\right)}{9.11\times10^{-31}\text{ kg}}} = 9.27\times10^{-24}\text{ A m}^2$$

– يُتبع

تتوافق هذه النتيجة مع القياسات التجريبية للعزم المغناطيسي المداري لذرة الهيدروجين. ومع ذلك، ثمة توقعاتٌ أخرى حول خصائص ذرة الهيدروجين وذراتٍ أخرى تستند إلى فكرة أنَّ الإلكترونات الموجودة في الذرات لها مداراتٌ مدارية، ولا تتوافق هذه التوقعات مع الملاحظات التجريبية. ومن ثَمَّ، فالوصف التفصيلي للخصائص المغناطيسية للذرات يجب أن يتضمّن ظواهر يتم وصفها من خلال فيزياء الكم.

اللف المغزلي

لا يُعد عزم ثنائي القطب المغناطيسي الناتج عن الحركة المدارية للإلكترونات المساهم الوحيد في العزم المغناطيسي للذرات. فالإلكترونات وجسيماتٌ أولية أخرى لها عزومها المغناطيسية الداخلية نتيجةً للفها المغزلي. ظاهرة اللف المغزلي سيتم مناقشة في فيزياء الكم، ولكن ثمة بعض الحقائق التي اكتُشِفت عن اللف المغزلي وعلاقته بكمية الحركة الزاوية الداخلية للجسيم ولا تتطلَّب فهمًا لميكانيكا الكم. لكلٍّ من الإلكترونات والبروتونات النيوترونات لف مغزلي مقداره $s = \frac{1}{2}$. مقدار كمية الحركة الزاوية (الزخم الزاوي) لهذه الجسيمات هو $S = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ ويمكن أن تكون لمركَّبة z الخاصة بكمية الحركة الزاوية القيمة $S_z = -\frac{1}{2}\hbar$ أو $S_z = +\frac{1}{2}\hbar$، حيث $\hbar$ هو ثابت بلانك مقسوم على 2π. لا يُمكن تفسير هذا اللف المغزلي بالحركة المدارية لبنيةٍ أساسية ما في الجسيمات. فالإلكترونات، على سبيل المثال، جسيماتٌ نقطية حقيقية. ومن ثَمَّ، فاللف المغزلي خاصية داخلية، مثلها مثل الكتلة أو الشحنة الكهربائية.

تُحدَّد الخاصية المغناطيسية لمعظم المادة بالعزوم المغناطيسية للّف المغزلي للإلكترون. ويرتبط العزم المغناطيسي لجسيم يتمتع بخاصية اللف المغزلي $\vec{\mu}_s$ بكمية الحركة الزاوية للف المغزلي للجسيم، $\vec{S}$، من خلال العلاقة

$$\vec{\mu}_s = g\frac{q}{2m}\vec{S} \tag{8.16}$$

حيث q هي شحنة الجسيم وm هي كتلته. وتكون الكمية g بلا أبعاد وتُسمَّى *العامل* g. بالنسبة إلى الإلكترون، فإنَّ قيمته العددية هي $g = -2.0023193043622(15)$. وهي من أكثر الكميات المَقيسة بدقة في الطبيعة. إذا قارنت هذه المعادلة بالمعادلة 8.15 لعزم ثنائي القطب المغناطيسي الناتج عن كمية الحركة الزاوية المدارية، فستلاحظ أنهما متشابهتان للغاية.

8.6 الخواص المغناطيسية للمادة Magnetic Properties of Matter



في الوحدة 7، رأينا أن ثنائيات الأقطاب المغناطيسية لا تتأثر بمحصلة القوة في مجال مغناطيسي خارجي متجانس، ولكن يكون لها عزم دوران. يُحرِّك عزم الدوران ثنائي القطب الحر في اتجاه متوازٍ عكسيًا مع المجال الخارجي؛ لأن هذه هي الحالة التي تكون فيها طاقة الوضع المغناطيسية أقل ما يكون. رأينا في القسم 8.5 أنَّ الذرات يمكن أن تكون لها ثنائيات أقطاب مغناطيسية. ماذا سيحدث عندما تتعرض للمادة (المكوَّنة من ذرات) لمجال مغناطيسي خارجي؟

قد تشير عزوم ثنائيات أقطاب الذرات في مادةٍ ما في اتجاهاتٍ مختلفة أو في اتجاهٍ واحد. تُعرَّف **المَغنطة**، $\vec{M}$، المادة على أنها محصلة عزم ثنائي القطب الناتج عن عزوم ثنائيات أقطاب الذرات في المادة لكل وحدة حجم. ومن ثَمَّ، يعتمد المجال المغناطيسي $\vec{B}$ داخل المادة على المجال المغناطيسي الخارجي $\vec{B}_0$ والمَغنطة $\vec{M}$.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0\vec{M} \tag{8.17}$$

حيث μ_0 مرةً أخرى هي النفاذية المغناطيسية للفراغ. وبدلاً من تضمين المجال المغناطيسي الخارجي، $\vec{B}_0$، من المعتاد استخدام **شدة المجال المغناطيسي**، $\vec{H}$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \tag{8.18}$$

من خلال هذا التعريف لقوة المجال المغناطيسي، يُمكن كتابة المعادلة 8.17

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \tag{8.19}$$

بما أنَّ وحدة المجال المغناطيسي هي $[B] = \text{T}$ ووحدة النفاذية المغناطيسية هي $[\mu_0] = \text{T m/A}$. فإنَّ وحدتي المَغنطة وشدة المجال المغناطيسي هما $[M] = [H] = \text{A/m}$.

الدايامغناطيسية والبارامغناطيسية

إنَّ السؤال الذي لم يُجَب عنه حتى الآن هو كيف تعتمد المَغنطة على المجال المغناطيسي الخارجي $\vec{B}_0$، أو بشكل مكافئ، على شدة المجال المغناطيسي $\vec{H}$ في معظم المواد (ليس كلها!). تكون هذه العلاقة خطيَّة:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \tag{8.20}$$

حيث يُطلق على ثابت التناسب χ_m **القابلية المغناطيسية** للمادة (الجدول 8.1). لكن، ثمة مواد لا تخضع لهذه العلاقة الخطيَّة البسيطة للمعادلة 8.20، وأشهر هذه المواد هي المواد الفيرومغناطيسية التي سنناقشها في القسم التالي. ولنتناول أولاً المواد الدايامغناطيسية والبارامغناطيسية التي تنطبق عليها المعادلة 8.20.

إذا كان $\chi_m < 0$، فإنَّ ثنائيات الأقطاب داخل المادة تُنظِّم نفسها بحيث تُعاكِس المجال المغناطيسي الخارجي، تمامًا مثل ثنائيات الأقطاب الحرة. وفي هذه الحالة، يُشير متجه المَغنطة في الاتجاه المعاكس لمتجه شدة المجال المغناطيسي. يُطلَق على المواد ذات $\chi_m < 0$ *المواد* الدايامغناطيسية. تظهر خاصيّة **الدايامغناطيسية** على معظم المواد. في المواد الدايامغناطيسية، يُستحَث عزم ثنائي قطب مغناطيسي ضعيف عن طريق مجال مغناطيسي خارجي في اتجاه معاكس لاتجاه المجال الخارجي. ويختفي المجال المغناطيسي المُستحَث عند إزالة المجال الخارجي. وإذا كان المجال الخارجي غير منتظم، فإنَّ التفاعل بين عزم ثنائي القطب المُستحَث للمادة الدايامغناطيسية والمجال الخارجي يُولِّد قوةً مُوجهَّة من منطقة ذات شدة مجال مغناطيسي أكبر إلى منطقة ذات شدة مجال مغناطيسي أقل.

يعرض الشكل 8.28 مثالاً على مادة بيولوجية تظهر عليها الخاصيّة الدايامغناطيسية. تؤدي قوى الدايامغناطيسية المُستحثَة عن طريق مجال مغناطيسي خارجي غير منتظم مقداره 16 T إلى رفع ضفدع حي. (لم ينزعج الضفدع فيما يبدو بهذه التجربة.) وتكون القوة الدايامغناطيسية الضئيلة عادةً كبيرةً بما يكفي في هذه الحالة للتغلب على الجاذبية.

إذا كانت القابلية المغناطيسية في المعادلة 8.20 أكبر من صفر، $\chi_m > 0$، فإنَّ مَغنطة المادة تشير في الاتجاه نفسه الخاص بشدة المجال المغناطيسي. لاحظ أنَّ χ_m للفراغ تساوي 0. تُسمّى هذه الخاصيّة **البارامغناطيسية**، ويُطلق على المواد التي تظهر عليها *المواد* البارامغناطيسية. تظهر الخاصيّة البارامغناطيسية على المواد التي تحتوي على عناصر انتقالية معيّنة (بما في ذلك الأكتنيدات والعناصر الأرضية النادرة). وتحتوي كل ذرة في هذه العناصر على ثنائي قطب مغناطيسي دائم، لكن عادةً ما تكون عزوم ثنائيات الأقطاب هذه موجَّهة بشكل عشوائي ولا تُنتج محصلة مجال مغناطيسي. ومع ذلك، في وجود مجال مغناطيسي خارجي، تتراص بعض ثنائيات الأقطاب المغناطيسية هذه في اتجاه المجال الخارجي. عند إزالة المجال الخارجي، يختفي عزم ثنائي القطب المغناطيسي المُستحَث. وإذا كان المجال الخارجي غير منتظم، فإنَّ عزم ثنائي القطب المغناطيسي المُستحَث يتفاعل مع المجال الخارجي ليُولِّد قوة مُوجهَّة من منطقة ذات شدة مجال مغناطيسي أقل إلى منطقة ذات شدة مجال مغناطيسي أكبر — عكس تأثير الدايامغناطيسية.

بالتعويض بتعبير $\vec{M}$ من المعادلة 8.20 في المعادلة 8.19 الخاصة بالمجال المغناطيسي $\vec{B}$ داخل مادةٍ ما، نحصل على

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi_m \vec{H}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} \tag{8.21}$$

بالتشابه مع معامل السماحية الكهربائية النسبي، يعرف **معامل النفاذية المغناطيسية النسبي**، κ_m، بأنه

$$\kappa_m = 1 + \chi_m \tag{8.22}$$

ومن ثَمَّ، يُمكن التعبير عن النفاذية المغناطيسية، μ، لمادةٍ ما بـ

$$\mu = (1 + \chi_m)\mu_0 = \kappa_m \mu_0 \tag{8.23}$$

يتيح لنا استبدال μ_0 بـ μ في قانون بيو–سافار (المعادلة 8.1) وقانون أمبير (المعادلة 8.10) استخدامَ هذين القانونين لحساب المجال المغناطيسي في مادة معينة.

وأخيرًا، فإنَّ مقدار المَغنطة في المواد البارامغناطيسية يعتمد على درجة الحرارة. يتم التعبير عادةً عن تبعية درجة الحرارة هذه بـ *قانون كوري*:

$$M = \frac{cB}{T} \tag{8.24}$$

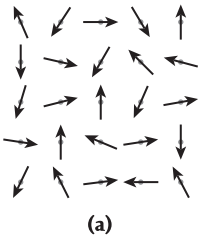
حيث c هو ثابت كوري، وB هو مقدار المجال المغناطيسي، وT هي درجة الحرارة بالكلفن.

الجدول 8.1 قيم القابلية المغناطيسية لبعض المواد الشائعة الدايامغناطيسية و البارامغناطيسية

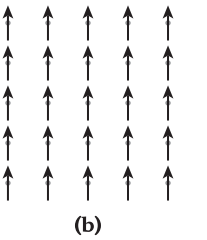
المادة	القابلية المغناطيسية x_m
الألمنيوم	$+2.2 \times 10^{-5}$
البزموت	1.66×10^{-4}
الماس (الكربون)	-2.1×10^{-5}
الجرافيت (الكربون)	-1.6×10^{-5}
الهيدروجين	-2.2×10^{-9}
الرصاص	-1.8×10^{-5}
الليثيوم	$+1.4 \times 10^{-5}$
الزئبق	-2.9×10^{-5}
الأكسجين	$+1.9 \times 10^{-6}$
البلاتين	$+2.65 \times 10^{-4}$
السيليكون	-3.7×10^{-6}
الصوديوم	$+7.2 \times 10^{-6}$
كلوريد الصوديوم (NaCl)	-1.4×10^{-5}
التنجستين	$+6.8 \times 10^{-5}$
اليورانيوم	$+4.0 \times 10^{-4}$
الفراغ	0
الماء	$-9. \times 10^{-6}$



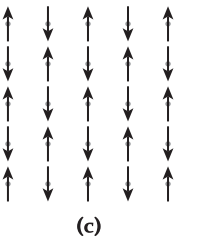
الشكل 8.28 ضفدع حي مرفوع بواسطة مجال مغناطيسي قوي في مختبر High Field Magnet Laboratory، بجامعة رادبود في مدينة نايميخن في هولندا.



(a)

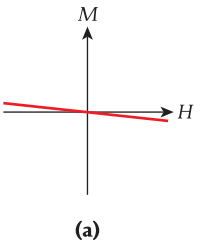


(b)

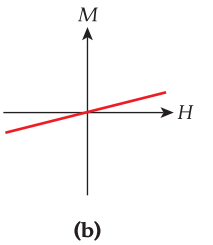


(c)

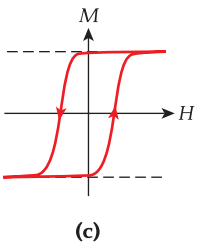
الشكل 8.29 نطاقات مغناطيسية: (a) مُوجَّهة عشوائيًا؛ (b) ترتيب فيرومغناطيسي نموذجي؛ (c) ترتيب فيرومغناطيسي مضاد نموذجي. (لاحظ أن هذا الشكل التوضيحي يعرض فقط النطاقات المغناطيسية الفردية في سيناريو مثالي. ويمكن أيضًا أن تكون للنطاقات المغناطيسية مقادير مختلفة تمامًا، وعادةً ما تكون كذلك.)



(a)



(b)



(c)

الشكل 8.30 المَغنطة كإحدى وظائف شدة المجال المغناطيسي: (a) لمواد الدايامغناطيسية؛ (b) لمواد البارامغناطيسية؛ (c) حلقة التباطؤ للمواد الفيرومغناطيسية.

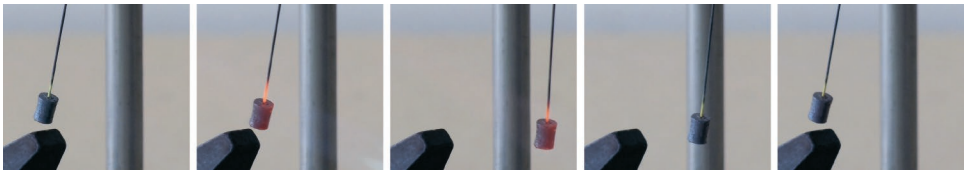
الفيرومغناطيسية

تظهر خاصيّة **الفيرومغناطيسية** على عناصر الحديد والنيكل والكوبلت والجادولينيوم والدسبروزيوم، والسبائك المحتوية على هذه العناصر. وتتسم المادة ذات الفيرومغناطيسية بترتيب طويل المدى على المستوى الذري، ما يجعل عزوم ثنائيات أقطاب الذرات تصطف بمحاذاة بعضها البعض في منطقة محدودة يُطلَق عليها **النطاق**. يُمكن أن يكون المجال المغناطيسي داخل النطاق قويًا. لكن في معظم نماذج المادة، تكون النطاقات مُوجَّهة بشكل عشوائي، وهو ما لا يترك محصلة مجال مغناطيسي. يوضِّح الشكل 8.29a عزوم ثنائيات أقطاب مغناطيسية مُوجهَّة بشكل عشوائي في نطاق ما، ويوضِّح الشكل 8.29b ترتيبًا فيرومغناطيسيًا نموذجيًا. يوضِّح الشكل 8.29c الحالة المثيرة لترتيب فيرومغناطيسي مضاد نموذجي، حيث يتسبب التفاعل بين عزوم ثنائيات الأقطاب المغناطيسية المتجاورة في توجيه العزوم في اتجاهاتٍ متعاكسة. ولا يُمكن ملاحظة هذا الترتيب إلا عند درجات الحرارة المنخفضة للغاية.

يُمكن لمجال مغناطيسي خارجي أن يُوجِّه القطاعات كما يظهر في الشكل 8.29b، نتيجةً للتفاعل بين عزوم ثنائيات الأقطاب المغناطيسية للنطاق والمجال الخارجي. ونتيجةً لذلك، تحتفظ المادة الفيرومغناطيسية بكل المغناطيسية المُستحَثة أو بعضها عند إزالة المجال المغناطيسي الخارجي، حيث تظل النطاقات متحاذية. بالإضافة إلى ذلك، سيكون المجال المغناطيسي الناتج من التيار المار في ملفٍ لولبي أو حلقي أكبر في حال وجود مادة فيرومغناطيسية في الجهاز. لكن على عكس المواد الدايامغناطيسية والمواد البارامغناطيسية، لا تخضع المواد الفيرومغناطيسية للعلاقة الخطيّة البسيطة المحددة في المعادلة 8.20. تحتفظ النطاقات باتجاهاتها، ومن ثَمَّ تظهر على المادة مَغنطةٌ لاصفرية حتى في غياب المجال المغناطيسي الخارجي. (وهذا هو سبب وجود المغناطيسات الدائمة.)

يوضِّح الشكل 8.30 علاقة المَغنطة بشدة المجال المغناطيسي واعتمادها عليه في أنواع المواد الثلاثة التي ناقشناها. يوضِّح الشكل 8.30a والشكل 8.30b التبعية الخطية وفقًا للمعادلة 8.20 للمواد الدايامغناطيسية والمواد البارامغناطيسية على التوالي. ويوضِّح الشكل 8.30c حلقة التباطؤ النموذجية التي تم الحصول عليها للمواد الفيرومغناطيسية. توضِّح الأسهم على المنحنى الأحمر الاتجاه الذي تسير فيه عملية المَغنطة، بينما تُمثل الخطوط المتقطعة أقصى مَغنطة (موجبة وسالبة) ممكنة. يُمكن التعبير عن المَغنطة، لأي نقطة على حلقة التباطؤ هذه، بدلالة القيمة الفعلية للنفاذية المغناطيسية μ للمادة الفيرومغناطيسية، على نحو مماثل لما تم تحديده في المعادلة 8.23. ولكن هذه النفاذية *ليست* قيمة ثابتة، فهي تعتمد على شدة المجال المغناطيسي الواقعة عليها وكذلك على المسار الذي تصل فيه شدة المجال إلى تلك القيمة. وبغض النظر عن ذلك، يُمكن أن تكون القيم الفعلية للنفاذية، μ، للمواد الفيرومغناطيسية أكبر بكثير من قيم المواد البارامغناطيسية (أكبر بمعامل يصل إلى 10^4).

تتسم الفيرومغناطيسية بأنها تعتمد على درجة الحرارة. فعند درجة حرارة معينة، يُطلَق عليها *درجة حرارة كوري*، تتوقف المواد الفيرومغناطيسية عن إظهار الفيرومغناطيسية. وعند هذه النقطة، تتغلب الحركة الحرارية على الترتيب الفيرومغناطيسي الناتج عن تفاعل عزوم ثنائيات الأقطاب في هذه المواد. درجة حرارة كوري للحديد هي 768°C يعرض الشكل8.31 عرضًا توضيحيًا بسيطًا، حيث يعمل تسخين مغناطيس حديدي دائم (الشكل 8.31b) على تقليل التجاذب بين المادة ومغناطيس آخر



(a) (b) (c) (d) (e)

الشكل 8.31 عرض توضيحي لعلاقة درجة الحرارة الخاصة بالفيرومغناطيسية: (a) يمثِّل مغناطيس دائم ثقل البندول وينحرف من الوضع الرأسي بفعل مغناطيس آخر (الركن الأيسر السفلي من كل إطار)؛ (b) يُسخَّن المغناطيس وتبدأ درجة حرارته في الارتفاع؛ (c) درجة حرارة المغناطيس مرتفعة بما يكفي لتلاشي مجاله المغناطيسي ويتدلى بزاوية أقل بكثير؛ (d) بينما يبرد المغناطيس، يبدأ في استعادة مجاله المغناطيسي الأصلي؛ و(e) يعود إلى موقعه الأصلي.

(الشكل 8.31c). وبينما يبرد المغناطيس بعد ذلك (الشكل 8.31d)، فإنه يصبح مغناطيسًا دائمًا مرةً أخرى (الشكل 8.31e).

8.7 المغناطيسية والموصلية الفائقة
Magnetism and Superconductivity

يُمكن إنشاء مغناطيساتٍ للاستخدامات الصناعية والبحث العلمي باستخدام سلك مقاوِم عادي يتدفق عبره تيار. والمغناطيس النموذجي من هذا النوع هو المغناطيس اللولبي الكبير. يُولِّد التيار المتدفق في سلك المغناطيس حرارةً مقاومة، وعادةً ما يتم التخلص من الحرارة باستخدام ماء ذو موصلية منخفضة تسري عبر موصلاتٍ مجوفة. (تمت تنقية الماء ذو الموصلية المنخفضة حتى لا يوصِّل الكهرباء.) عادةً ما تُولِّد هذه المغناطيسات الموجودة في درجة حرارة الغرفة مجالاتٍ مغناطيسية تصل شدتها إلى 1.5 T، وتكون عادةً غير مكلِّفة نسبيًا في إنشائها ولكنها مكلِّفة في تشغيلها نظرًا لارتفاع تكاليف الكهرباء.

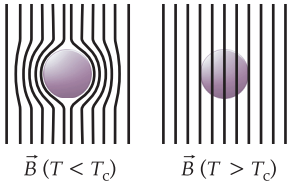
تتطلب بعض الاستخدامات، مثل التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)، مجالاتٍ مغناطيسية بأعلى مقدار ممكن لضمان الحصول على أفضل نسبة إشارة إلى الضجيج في القياسات. وللحصول على هذه المجالات، تُنشأ المغناطيسات باستخدام ملفاتٍ فائقة التوصيل بدلاً من الملفات المقاومة. يمكن أن يُولِّد هذا المغناطيس مجالاً أقوى من المغناطيس الموجود في درجة حرارة الغرفة بمقدار 10 T أو أكبر. تظهر خاصيّة الموصلية الفائقة في بعض المواد مثل الزئبق والرصاص عند درجات حرارة الهيليوم السائل، ولكن بعض الفلزات التي تتسم بأنها موصلات جيدة في درجة حرارة الغرفة، مثل النحاس والذهب، لا تصبح أبدًا فائقة التوصيل. يتمثل العيب الذي ينطوي عليه المغناطيس فائق التوصيل في ضرورة إبقاء الموصل عند درجة حرارة الهيليوم السائل، والتي تساوي تقريبًا 4 K (على الرغم من أنَّ بعض الاكتشافات الحديثة التي سنتناولها لاحقًا في هذا القسم تُقلِّل هذا الحد). ومن ثَمَّ، يجب وضع المغناطيس في مبرد مملوءٍ بالهيليوم السائل للحفاظ على برودة المغناطيس. تتمثل إحدى مميزات المغناطيس فائق التوصيل في أنه بمجرد أن يثبُت التيار في ملف المغناطيس، سيستمر في التدفق حتى تتم إزالته بوسيلة خارجية. ومع ذلك، يتم تعويض الطاقة المتوفرة نتيجة عدم حدوث فقد مقاومي في الملف – ولو جزئيًا على الأقل – باستخدام الطاقة اللازمة للحفاظ على برودة الملف فائق التوصيل.

عندما يتدفق التيار عبر الزئبق أو الرصاص فائق التوصيل، يصبح المجال المغناطيسي داخل المادة صفرًا. ويُطلَق على تقليل المجال المغناطيسي إلى الصفر داخل المادة التي تم تبريدها بصورة كافية حتى تصبح فائقة التوصيل *ظاهرة مايسنر*. فوق درجة الحرارة الحرجة T_c، للانتقال إلى الموصلية الفائقة، تختفي ظاهرة مايسنر، وتصبح المادة موصلاً عاديًا (الشكل 8.32).

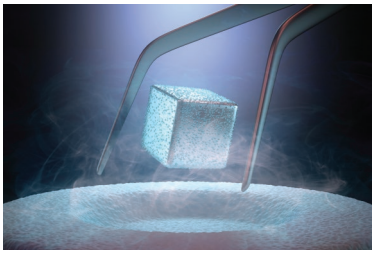
يعرض الشكل 8.33 عرضًا توضيحيًا رائعًا لظاهرة مايسنر: تتسبب قطعةٌ من موصل فائق التوصيل (تم تبريدها إلى درجة حرارة أدنى من درجة حرارتها الحرجة) في طفو مغناطيس دائم فوقها عن طريق فصل المجال المغناطيسي الداخلي للمغناطيس. تستطيع القطعة القيام بذلك لأن التيارات فائقة التوصيل على سطحها تُولِّد مجالاً مغناطيسيًا معاكسًا للمجال المطبَّق، ما ينتج عنه مجالٌ محصلته صفر داخل الموصل فائق التوصيل وتنافرٌ بين المجالات فوق الموصل الفائق.

إنَّ الموصل المُستخدَم في مغناطيس فائق التوصيل مصمَّمٌ خصيصًا للتغلب على ظاهرة مايسنر. ويتم إنشاء الموصلات فائقة التوصيل الحديثة من خيوطٍ من سبيكة نيوبيوم وتيتانيوم مُدمجَة في نحاس صلب. تحتوي خيوط النيوبيوم والتيتانيوم على نطاقات مجهرية يُمكن أن يوجد فيها مجال مغناطيسي دون أن يتم استبعاده. ويكون النحاس بمثابة دعم ميكانيكي ويُمكن أن يتجاوز حمل التيار إذا أصبح الموصل فائق التوصيل موصلاً عاديًا. ويمكن لهذا النوع من الموصلات فائقة التوصيل أن يُولِّد مجالاتٍ مغناطيسية يصل مقدارها إلى 15 T.

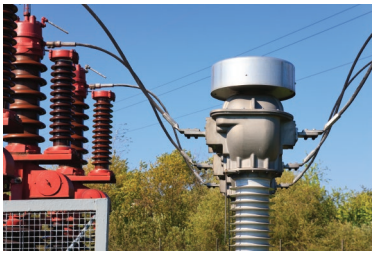
خلال العقدين الماضيين، اكتشف الفيزيائيون والمهندسون مواد جديدة تتسم بأنها موصلاتٌ فائقة التوصيل عند درجات الحرارة الأعلى من 4 K. وقد سُجِّلت درجات حرارة حرجة تصل إلى 160 K لهذه *الموصلات فائقة التوصيل ذات درجات الحرارة المرتفعة*، وهو ما يعني إمكانية جعلها موصلاتٍ فائقة التوصيل عن طريق تبريدها باستخدام النيتروجين السائل. يبحث الكثير من الباحثين حول العالم عن مواد تكون بمثابة موصلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة الغرفة. ستُحدِث هذه المواد تغيُّرًا جذريًا في مجالاتٍ صناعية كثيرة، ولا سيَّما مجال النقل وشبكة الكهرباء. يُعد مشروع Tres Amigas SuperStation في مدينة كلوفيس بولاية نيو مكسيكو أحد أكبر المشروعات المستقبلية التي تستخدم أسلاك



الشكل 8.32 ظاهرة مايسنر، وفيها تستبعد المادة المجالات المغناطيسية الخارجية من الجزء الداخلي منها عندما تنخفض درجة حرارتها إلى ما دون درجة الحرارة الحرجة والتي تصبح عندها فائقة التوصيل.



الشكل 8.33 من خلال ظاهرة مايسنر، يخرج موصِّل فائق التوصيل من المجال المغناطيسي لمغناطيس دائم، والذي يحوم فوقه بعد ذلك.



الشكل 8.34 محوِّل تيار عالي الجهد في محطة فرعية لتوليد الطاقة.

فائقة التوصيل لنقل ما يصل إلى 5 جيجاوات لكل كابل من قدرة التيار العالي. سيربط المشروع بين شبكتي الكهرباء الرئيستين في أمريكا الشمالية، وهما Eastern Interconnection وWestern Interconnection، وشبكة Texas Interconnection.

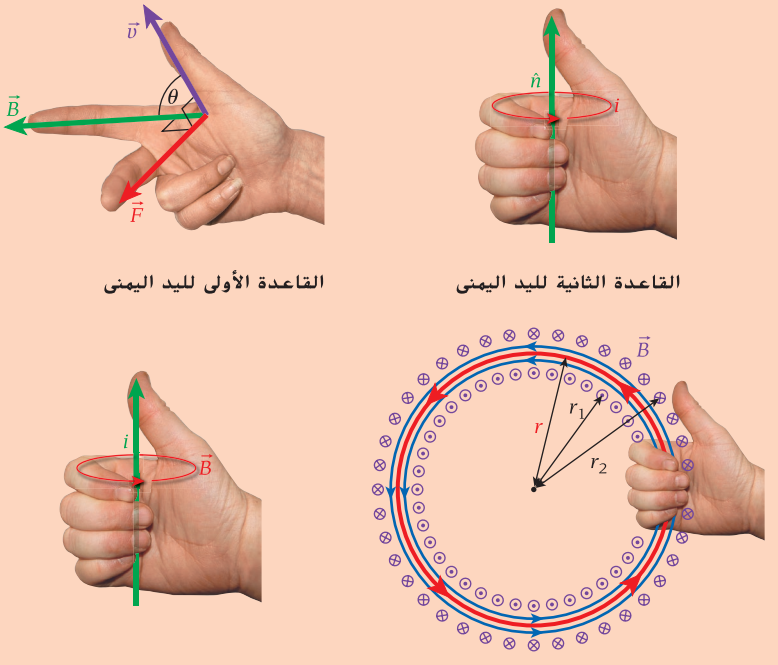
ما تعلمناه | دليل المذاكرة للاختبار

- النفاذية المغناطيسية للفراغ μ_0 تساوي $4\pi \times 10^{-7}$ T m/A
- يصف قانون بيو–سافار، $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,d\vec{s}\times\hat{r}}{r^2}$ المجال المغناطيسي، $d\vec{B}$ الناتج عن عنصر التيار، $i\,d\vec{s}$ عند الموضع $\vec{r}$ بالنسبة إلى عنصر التيار.
- مقدار المجال المغناطيسي على المسافة $r_\perp$ من سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا i هو $B = \mu_0 i/2\pi r_\perp$.
- مقدار المجال المغناطيسي عند مركز حلقة سلكية نصف قطرها R تحمل تيارًا i هو $B = \mu_0 i/2R$.
- يُمثِّل $\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{enc}$ قانون أمبير حيث $d\vec{s}$ هو مسار التكامل وi_{enc} هو التيار المغلق في الحلقة الأمبيرية المحدَّدة.
- مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي يحمل تيارًا i ويحتوي على عدد n من اللفات لكل وحدة طول هو $B = \mu_0 ni$
- تُمثِّل $B = \mu_0 Ni/2\pi r$ مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف حلقي يحتوي على عدد N من اللفات ويبلغ نصف قطره r ويحمل تيارًا.
- يُمكن الربط بين عزم ثنائي القطب المغناطيسي وكمية الحركة الزاوية المدارية لإلكترون شحنته $-e$ وكتلته m يتحرَّك في مدار دائري من خلال المعادلة $\vec{\mu}_{orb} = -\frac{e}{2m}\vec{L}_{orb}$
- بالنسبة إلى المواد الدايامغناطيسية والبارامغناطيسية، تتناسب المَغنطة مع شدة المجال المغناطيسي: $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ تتبع المواد الفيرومغناطيسية حلقة تباطؤ، ومن ثمَّ لا تكون العلاقة الخطية.
- يرجع المجال المغناطيسي المتولِّد داخل مادة دايامغناطيسية أو بارامغناطيسيةإلى شدة المجال المغناطيسي الخارجي والمَغنطة:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi_m\vec{H}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \mu_0\kappa_m\vec{H} = \mu\vec{H}$$

حيث k_m هو معامل النفاذية المغناطيسية النسبي

- يُوضِّح الشكل 8.35 قواعد اليد اليمنى الأربع المرتبطة بالمجالات المغناطيسية. تحدِّد القاعدة الأولى لليد اليمنى اتجاه القوة المغناطيسية على جسيم مشحون يتحرَّك في مجال مغناطيسي. تحدِّد القاعدة الثانية لليد اليمنى اتجاه متجه الوحدة العمودي لحلقة تحمل تيارًا. تحدِّد القاعدة الثالثة لليد اليمنى اتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن سلك يحمل تيارًا. تحدِّد القاعدة الرابعة لليد اليمنى اتجاه المجال المغناطيسي داخل ملف حلقي.



الشكل 8.35 القواعد الأربع لليد اليمنى المرتبطة بالمجالات المغناطيسية.

إجابات أسئلة الاختبار الذاتي

8.1 يُشير المجال المغناطيسي عند النقطة P_1 إلى اتجاه y الموجب. ويُشير المجال المغناطيسي عند النقطة P_2 إلى اتجاه x السالب.

8.2 يجذب السلكان المتوازيان اللذان يحملان تيارًا في الاتجاه نفسه بعضهما البعض. بينما السلكان المتوازيان اللذان يحملان تيارًا متدفقًا في اتجاهاتٍ متعاكسة مع بعضهما.

8.3
$$B_x = \frac{\mu_0 i}{2}\frac{R^2}{\left(0^2 + R^2\right)^{3/2}} = \frac{\mu_0 i}{2}\frac{R^2}{R^3} = \frac{\mu_0 i}{2R}$$

إرشادات حل المسائل

1. عند استخدام قانون بيو–سافار، يجب دائمًا أن ترسم مخططًا للحالة مع تمييز عنصر التيار. تحقَّق من تحويل التماثلات إلى أبسط صورة قبل البدء في إجراء العمليات الحسابية؛ حيث يمكنك أن توفر على نفسك قدرًا كبيرًا من العمل.

2. عند تطبيق قانون أمبير، اختر حلقة أمبيرية تتسم ببعض التماثل الهندسي لتحويل تقييم التكامل إلى أبسط صورة. ويمكنك غالبًا أن تستخدم اقاعدة الثالثة لليد اليمنى لتختار اتجاه التكامل على طول الحلقة: أشِرْ بإصبع الإبهام في اتجاه محصلة التيار المار عبر الحلقة واقبض أصابعك في اتجاه التكامل. ستُذكِّرك أيضًا هذه الطريقة بجمع التيارات المارة عبر حلقة أمبيرية لتحديد التيار المغلق.

3. تذكَّر مبدأ التراكب للمجالات المغناطيسية: محصلة المجال المغناطيسي عند أي نقطة في الفضاء هي مجموع متجهات المجالات المغناطيسية الفردية المتولِّدة عن أجسام مختلفة. تأكّد أنك لا تجمع المقادير فحسب. بدلاً من ذلك، يجب بوجه عام أن تجمع المركَّبات المكانية لمصادر المجال المغناطيسي المختلفة بصورة منفصلة.

4. لا تزال كلُّ المبادئ التي تحكم حركة الجسيمات المشحونة في المجالات المغناطيسية وكلُّ إرشادات حل المسائل الواردة في الوحدة 7 سارية. ولا يهم إنْ كان المجال المغناطيسي ناتجًا عن مغناطيس دائم أو مغناطيس كهربائي.

5. لحساب المجال المغناطيسي في مادةٍ ما، يمكنك استخدام الصيغ المُشتقَّة من قانون أمبير وقانون بيو–سافار، لكن يجب أن تستبدل μ_0 بـ $\mu = (1+\chi_m)\mu_0 = \kappa_m\mu_0$.

أسئلة الاختيار من متعدد

8.1 السلكان الطويلان المستقيمان متوازيان. يمر في السلكين تيارين مختلفين من حيث المقدار. إذا تضاعف مقدار التيار المتدفق في كل سلك، فسيصبح مقدار القوة بين الأسلاك

a) ضعف مقدار القوة الأصلية.
b) أربعة أضعاف مقدار القوة الأصلية.
c) مساويًا لمقدار القوة الأصلية.
d) نصف مقدار القوة الأصلية.

8.2 يُنتج عنصر للتيار مجالاً مغناطيسيًا في المنطقة المحيطة به. عند أي نقطة في الفضاء، يُشير المجال المغناطيسي الناتج عن عنصر التيار في اتجاهٍ

a) قطري من عنصر التيار للنقطة في الفضاء.
b) موازٍ لعنصر التيار.
c) عمودي على عنصر التيار وفي الاتجاه القطري.

8.3 إذا تضاعف عدد اللفات في ملف لولبي، ونقصَ طوله إلى النصف، فكيف سيتغيَّر مقدارمجاله المغناطيسي؟

a) يتضاعف.
b) ينشطر نصفين.
c) يتضاعف أربع مرات.
d) يظل كما هو دون تغيير.

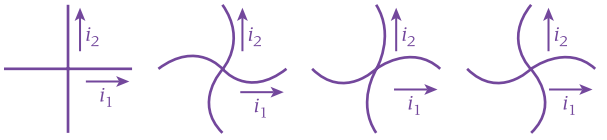
8.4 تأمل سلكين متوازيين يحملان تيارًا. تُولِّد المجالات المغناطيسية قوى تجاذب بين السلكين، ونتيجةً لذلك يبدو أن المجال المغناطيسي الناتج عن أحد السلكين يبذل شغلاً على السلك الآخر. كيف يُفسَّر ذلك؟

a) لا تستطيع القوة المغناطيسية أن تبذل شغلاً على شحناتٍ معزولة؛ وهذا لا يوضِّح أي شيء عن الشغل الذي يُمكن أن تبذله هذه القوة المغناطيسية على شحناتٍ محتجزة داخل موصل.
b) بما أنَّه يمكن للمجال الكهربائي وحده أن يبذل شغلاً على الشحنات، فإنَّ المجالات الكهربائية هي التي تبذل الشغل هنا.
c) يرجع هذا الشغل الظاهر إلى نوع آخر من القوة.

8.5 إذا تمّ لف سلك مغناطيس لولبي بحيث تلمس كل حلقة الحلقات المجاورة لها، أيٌّ مما يلي سيزيد المجال المغناطيسي داخل المغناطيس؟

a) تصغير نصف قطر الحلقات
b) زيادة نصف قطر السلك
c) زيادة نصف قطر المغناطيس اللولبي
d) تصغير نصف قطر السلك
e) غمر المغناطيس في البنزين

8.6 تقاطُع السلكين المعزولين بزاوية 90°. تمّ تمرير تيارَيْن خلال السلكين. أيٌّ من الاشكال التالية يقدم أفضل تمثيل لترتيب السلكين إذا كان التيار في السلك الأفقي يتدفق في اتجاه x الموجب والتيار في السلك الرأسي يتدفق في اتجاه y الموجب؟



(a) (b) (c) (d)

8.7 ما القاعدة العملية الجيدة لتصميم ملف مغناطيسي بسيط؟ إذا كان لدينا ملف دائري يبلغ نصف قطره ~ 1 cm، فما المقدار التقريبي للمجال المغناطيسي بالغاوس لكل أمبير في كل لفة؟ (*ملاحظة*: 1 G = 0.0001 T)

a) (لفة–A)/0.0001 G
b) (لفة–A)/0.01 G
c) (لفة–A)/1 G
d) (لفة–A)/100 G

8.8 أسطوانة صلبة تحمل تيارًا منتظمًا فوق مقطعها العرضي. أين يوجد أكبر مقدار للمجال المغناطيسي؟

a) عند مركز المقطع العرضي للأسطوانة
b) في منتصف الأسطوانة
c) على السطح
d) لا شيء مما سبق

8.9 سلكان طويلان مستقيمان يتدفق فيهما تياران في اتجاهٍ واحد، كما يظهر في الشكل. وتكون القوة بين السلكين

a) جاذبة.
b) تنافرية.
c) صفرًا.

8.10 في تجربة للتأثير المغناطيسي البصري، وُضِعَتْ قارورة كروية الشكل بحجمٍ 10 mL تحتوي على عينة سائل في مجالٍ مغناطيسي منتظم بدرجة كبيرة وسُلِّطَ شعاع ليزر عبر العينة. أيٌّ مما يلي يجب استخدامه لإنشاء المجال المغناطيسي المنتظم اللازم في التجربة؟

a) ملف مُسطَّح قطره 5 cm مُكوَّن من لفة واحدة من سلك معياره 4
b) ملف ملفوف بإحكام مصنوع من سلك معياره 18 مكّون من 20 لفة في طبقة واحدة ويبلغ قطره 10 cm
c) ملف لولبي طوله 10 cm وقطره 2 cm ملفوف بإحكام ومصنوع من سلك معياره 18
d) مجموعة من ملفين محوريين يبلغ قطر كل منهما 10 cm ويحتوي كل منهما على لفة واحدة من سلك معياره 4 ويبعد الملفان عن بعضهما بمسافة 5 cm

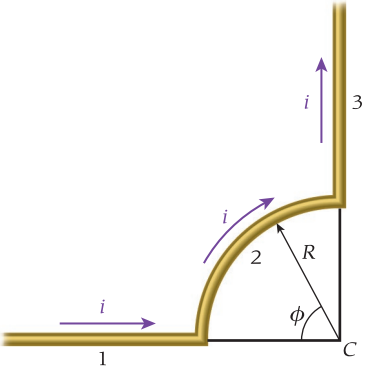
8.11 افترض أنه يُمكن تمثيل صاعقة برقٍ على هيئة تيارٍ في خط مستقيم طويل. إذا مرَّت شحنة مقدارها 15.0 C بنقطةٍ في زمن 1.50×10^{-3} s، فما مقدار المجال المغناطيسي على مسافة 26.0m من صاعقة البرق؟

a) 7.69×10^{-5} T
b) 9.22×10^{-3} T
c) 4.21×10^{-2} T
d) 1.11×10^{-1} T
e) 2.22×10^{2} T

8.12 ملفان لولبيان متساويان في الطول، عدد اللفات في الملف اللولبي 1 أكبر بمقدار 15 مرةً ونصف قطره أكبر بمقدار $\frac{1}{9}$ ويحمل تيارًا يبلغ مقداره 7 أضعاف شدة التيار في الملف اللولبي 2. احسب نسبة مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي 1 إلى مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي 2.

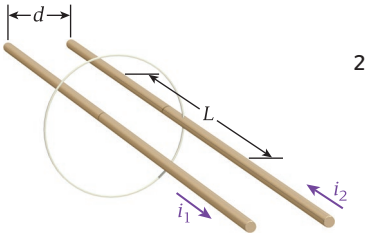
a) 105
b) 123
c) 144
d) 168
e) 197

8.13 يحمل السلك الموضَّح في الشكل تيارًا i ويحتوي على جزءٍ على شكل قوس دائري نصف قطره R وزاوية $2/\pi$ وقسمين مستقيمين متعامدين بشكل متبادل، وفي حال تمديدهما، سيتقاطعان مع مركز القوس، C. ما المجال المغناطيسي عند النقطة C الناتج عن السلك؟



a) $B=\frac{\mu_0 i}{2R}$
b) $B=\frac{\mu_0 i}{4R}$
c) $B=\frac{\mu_0 i}{6R}$
d) $B=\frac{\mu_0 i}{8R}$
e) $B=\frac{\mu_0 i}{12R}$

8.14 يحمل السلك 1 تيارًا i_1 ويحمل السلك 2 تيارًا i_2 في الاتجاه المعاكس، كما يظهر في الشكل. ما اتجاه القوة التي يبذلها السلك 1 على طول L من السلك 2؟



a) باتجاه السلك 1
b) بعيدًا عن السلك 1
c) لا يبذل السلك 1 قوةً على السلك 2 في هذه الحالة.

أسئلة مفاهيمية

8.15 يستخدم الكثير من التطبيقات الكهربائية كابلات زوجية مجدولة يلتف فيها السلك الأرضي وسلك الإشارة حول بعضهما في شكل حلزوني. لماذا؟

8.16 ناقش كيف يؤثر المجال المغناطيسي الناتج عن التيارات المارة في الأسلاك والأجهزة في مبنى سكني في دقة إبرة البوصلة في تحديد اتجاه الشمال الحقيقي.

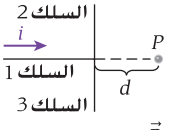
8.17 هل يُمكن أن يوجد ملف لولبي نموذجي، لا يتضمن مجالاً مغناطيسيًا خارجه؟ إذا كان الجواب لا، فهل يجعل ذلك اشتقاق المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي غير صالح (القسم 8.4)؟

8.18 تؤثر القوى المحافظة في الأجسام بطريقة تقلل من طاقة الوضع الخاصة بالنظام. استخدم هذا المبدأ لشرح اتجاه القوة المؤثرة على الحلقة الحاملة للتيار الموضّحة في مثال 8.1.

8.19 يتحرّك جسمان في الفراغ، شحنة كل منهما q وكتلته m، في مساراتٍ متوازية على مسافة d عن بعضهما وبسرعة v (أقل بكثير من سرعة الضوء). احسب نسبة مقدار القوة المغناطيسية التي يبذلها كلٌّ منهما على الآخر إلى مقدار القوة الكهربائية التي يبذلها كلٌّ منهما على الآخر: F_m/F_e.

8.20 يحمل أنبوبٌ أسطواني طويل ومستقيم، نصف قطره الداخلي هو a ونصف قطره الخارجي هو b، تيارًا كليًا i منتظمًا عبر مقطعه العرضي. حدِّد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الأنبوب عند نقطة المنتصف بين نصفي القطر الداخلي والخارجي.

8.21 ثلاث أسلاك مستقيمة متماثلة مُوصَلة على شكل T، كما يظهر في الشكل. في حال تدفق تيار i في نقطة الاتصال، ما المجال المغناطيسي عند النقطة P، الواقعة على مسافة d من نقطة الاتصال؟



8.22 يُوجد مجال مغناطيسي ثابت ومنتظم في منطقةٍ معينة، $\vec{B}$، وكذلك، لا يتغيَّر أي مجال كهربائي في المنطقة بمرور الوقت. أوجِد كثافة التيار $\vec{J}$ في هذه المنطقة.

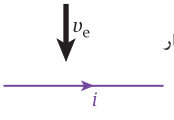
8.23 تُحَدَّد الخاصيّة المغناطيسية لمعظم المواد إلى حدٍ كبير بالعزوم المغناطيسية للذّم المغزلي للإلكترون بدلاً من عزوم ثنائيات الأقطاب المدارية. (تأثير النواة ضئيلٌ للغاية، حيث يكون العزم المغناطيسي للذّم المغزلي للبروتون أصغر من العزم المغناطيسي للإلكترون بحوالي 658 مرة.) في حال حدوث لف مغزلي لإلكتروناتٍ مفردة في ذرات أو جزيئات مادةٍ ما، ستؤدي العزوم المغناطيسية المرتبطة به إلى ظهور خاصيّة المغناطيسية المسايرة أو المغناطيسية الحديدية إذا كانت التفاعلات بين الذرات أو الجزيئات قوية بما يكفي لجعلها تتحاذى في قطاعات. وإذا كانت محصلة اللف المغزلي المفردي في هذه الذرات أو الجزيئات منعدمة، فستؤدي الاضطرابات المغناطيسية في مدارات الإلكترونات إلى ظهور خاصيّة المغناطيسية المعاكسة.

a) غاز الهيدروجين الجزيئي (H_2) ضعيف المغناطيسية المعاكسة. ما دلالة ذلك بالنسبة إلى اللف المغزلي للإلكترونين في جزيء الهيدروجين؟

b) ماذا تتوقع أن يكون السلوك المغناطيسي لغاز الهيدروجين الذري (H)؟

8.24 إذا تمّ تعريض المواد لمجالات مغناطيسية عالية بصورة كافية فإنها تتشبّع بالمغنطة أو تقترب من أقصى درجة منها. هل تتوقع أن يكون (أقصى) تشبع مغناطيسي للمواد ذات المغناطيسية المسايرة أقل بكثير من المواد ذات المغناطيسية الحديدية أم مساويًا لها تقريبًا أم أكبر منها بكثير؟ اشرح لماذا.

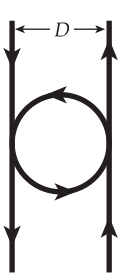
8.25 سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا، كما يظهر في الشكل. قُذِفَ إلكترون واحد من أعلى باتجاه السلك مباشرةً. يوجد مسار الإلكترون والسلك في المستوى نفسه. هل سينحرف الإلكترون عن مساره الابتدائي، وإذا كانت الإجابة نعم، ففي أي اتجاه؟



8.26 حلقة مربعة طول ضلعها L تحمل تيارًا i. أوجِد مقدار المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة عند مركزها، في صورة دالة لـ i وL.

8.27 يتدفق تيار كثافته الثابتة، J_0، عبر هيكل أسطواني طويل جدًا وموصِّل، نصف قطره الداخلي a ونصف قطره الخارجي b. ما المجال المغناطيسي في المناطق $r < a$ و$a < r < b$ و$r > b$؟ هل $B_{a<r<b} = B_{r>b}$ لـ $r = b$؟

8.28 يحمل سلكان متوازيان تيارًا i في اتجاهين متعاكسين ويبعدان عن بعضهما مسافة D كما يظهر الشكل. وتحمل حلقة دائرية، نصف قطرها $R = D/2$، التيار نفسه الذي يتدفق في عكس اتجاه عقارب الساعة. حدّد مقدار واتجاه المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة والسلكين المتوازيين عند مركز الحلقة، في صورة دالة لـ i وR.



8.29 تختلف كثافة التيار في موصِّل أسطواني نصف قطره R تبعًا لـ $J(r) = J_0 e^{-r/R}$ (في المنطقة من صفر إلى R). عبِّر عن مقدار المجال المغناطيسي في المنطقتين $r < R$ و$r > R$. ارسم مخططًا عن التبعية القطرية، $B(r)$.

تمارين

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

القسمان 8.1 و8.2

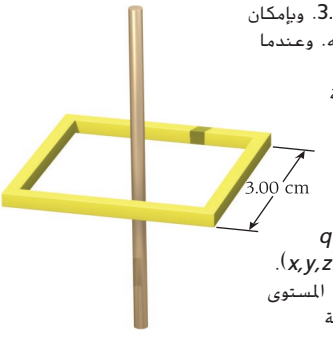
8.30 سلكان طويلان متوازيان يبعدان عن بعضهما بمسافة 3.0 mm. التيار المتدفق في أحدهما ضِعف التيار في السلك الآخر. إذا كان مقدار القوة المبذولة على طول 1.0 m من أحد السلكين هو 7.0 μN، فما مقدار التيارين؟

8.31 قُذِفَ إلكترون من مدفع إلكتروناتٍ بسرعة 4.0×10^5 m/s ثم تحرَّك موازيًا لسلك مستقيم طويل يحمل تيارًا مقداره 15 A وعلى مسافة 5.0 cm فوقه. حدِّد مقدار عجلة الإلكترون واتجاهها لحظة خروج الإلكترون من المدفع.

8.32 يتحرّك إلكترون في خطٍ مستقيم بسرعة 5.00×10^6 m/s. ما مقدار المجال المغناطيسي واتجاهه الناتج عن الإلكترون المتحرك على مسافة $d = 5.00$ m في مسار حركته؟ كيف ستتغيَّر الإجابة إذا كان الجسيم المتحرك بروتونًا؟

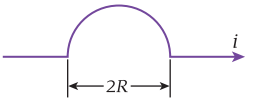
8.33 افترض أنَّ المجال المغناطيسي للأرض ناتج عن تيار مفرد يتحرّك في دائرة نصف قطرها 2.00×10^3 km عبر لُبّ الأرض المنصهر. وتبلغ شدة المجال المغناطيسي للأرض على السطح القريب من قطب مغناطيسي 6.00×10^{-5} T تقريبًا. كم تبلغ تقريبًا شدة التيار الازمة لتوليد هذا المجال؟

8.34 يبلغ طول ضلع أميتر مربع 3.00 cm. وبإمكان أضلاعه قياس المجال المغناطيسي المُعرضَة له. وعندما يُثبَّت الأميتر حول سلك يحمل تيارًا مستمرًا كما يظهل في الشكل، تكون القيمة المتوسطة للمجال المغناطيسي المَقيس على الأضلاع 3.00 G.ما مقدار التيار في السلك؟

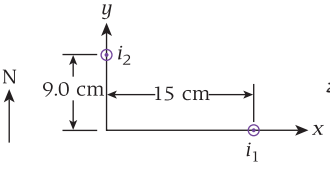


8.35• يقع سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا مقداره 2.00-A على المحور x. ويتحرّك جسيم شحنته $q = -3.00$ μC موازيًا للمحور y عند النقطة $(x,y,z) = (0,2,0)$. أين يجب وضع سلك مستقيم طويل آخر في المستوى xy حتى لا يتأثر الجسيم بأي قوة مغناطيسية عند عبوره المستوى؟

8.36• أوجِد المجال المغناطيسي عند مركز سلك على شكل نصف دائرة كالموضَّح في الشكل، نصف قطره $R = 10.0$ cm. إذا كان التيار في السلك $i = 12.0$ A.



8.37• سلكان طويلان للغاية يسيران موازيين للمحور z كما يظهر في الشكل. ويحمل كلٌّ منهما تيارًا $i_1 = i_2 = 25.0$ A، متدفق في اتجاه المحور z الموجب. يتحدَّد المجال المغناطيسي للأرض من خلال $\vec{B} = (2.60\cdot10^{-5})\hat{y}$ T (في المستوى xy وفي اتجاه الشمال). وُضعت إبرة بوصلة مغناطيسية عند نقطة الأصل. حدِّد الزاوية θ بين إبرة البوصلة والمحور x. (*تلميح:* ستحاذي إبرة البوصلة محورها على طول اتجاه محصلة المجال المغناطيسي.)

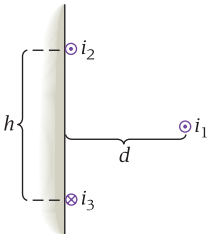


8.38• ملفان محوريان متماثلان، مصنوعان من سلك يبلغ نصف قطره 20.0 cm، وموضوعان فوق بعضهما مباشرةً، ويبعدان بمسافة 2.00 mm. يُوجد الملف السفلي على منضدة مسطحة ويمر به تيار i في اتجاه عقارب الساعة، بينما يحمل الملف العلوي تيارًا مماثلاً وتبلغ كتلته 0.0500 kg. حدِّد المقدار والاتجاه الذي يجب أن يكون عليه التيار في الملف العلوي للحفاظ على الملف مرفوعًا على مسافة 2.00 mm عن الملف السفلي.

8.39• يحمل سلك مستقيم طويل يقع على المحور x تيارًا، i، يتدفق في اتجاه x الموجب. ويقع سلك مستقيم طويل آخر على المحور y ويحمل تيارًا i في اتجاه y الموجب. ما مقدار واتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة $z = b$ على المحور z؟

8.40• تحمل حلقة سلك مربعة، يبلغ طول ضلعها 10.0 cm، تيارًا مقداره 0.300 A.ما المجال المغناطيسي في مركز الحلقة المربعة؟

8.41• يعرض الشكل المقطعَ العرضي عبر ثلاثة أسلاك طويلة، يبلغ التوزيع الخطي لكتلتها 100. g/m. تحمل هذه الأسلاك التيارات i_1 وi_2 وi_3 في الاتجاهات الموضَّحة. يبعد السلكان 2 و3 بمسافة 10.0 cm عن بعضهما ويحمل كلٌّ منهما تيارًا مقداره 600. ومثبتان بسطح رأسي A. ما التيار، i_1، الذي سيسمح للسلك 1 أن "يطفو" على مسافة متعامدة مقدارها $d = 10.0$ cm من السطح الرأسي؟ (تجاهَل سُمك الأسلاك.)



8.42• تتكوَّن بنية دبوس شعر من سلكين مستقيمين شبه لامنتهيين يبعدان عن بعضهما بمسافة 2.00 cm وتربطهما معًا قطعة سلك نصف دائرية (يجب أن يكون نصف قطرها 1.00 cm ويقع مركزها عند نقطة الأصل للإحداثيات xyz). يمتد السلك العلوي على طول المستقيم $y = 1.00$ cm، ويمتد السلك السفلي على طول المستقيم $y = -1.00$ cm؛ ويقع هذان السلكان في الجانب الأيسر $(x < 0)$ للمستوى xy. تبلغ شدة التيار في بنية دبوس الشعر 3.00 A، ويتجه التيار يمينًا في السلك العلوي، في اتجاه عقارب الساعة حول نصف الدائرة، ويسارًا في السلك السفلي. أوجِد المجال المغناطيسي عند نقطة أصل النظام الإحداثي.

8.43• يقع سلك مستقيم طويل على طول المحور x ($y = 0$ و$z = 0$). يحمل السلك تيارًا مقداره 7.00 A في اتجاه المحور x الموجب. ما مقدار واتجاه القوة على جسيم شحنته 9.00 C يقع عند النقطة (+1.00 m,+2.00 m,0)، عندما تصل سرعته المتجهة إلى 3000 m/s في كلٍّ من الاتجاهات التالية؟

a) اتجاه المحور x الموجب.

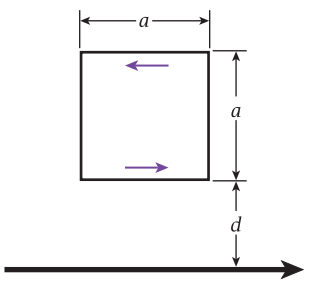
b) اتجاه المحور y الموجب.

c) اتجاه المحور z السالب.

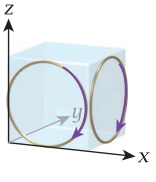
8.44• يحمل سلك مستقيم طويل تيارًا مقداره 10.0 A باتجاه المحور x الموجب، كما يظهر في الشكل. توجد بالقرب من السلك حلقةٌ مربعة من سلك نحاسي تحمل تيارًا مقداره 2.00 A في الاتجاه الموضَّح. ويبعد الجانب القريب من الحلقة مسافة $d = 0.500$ m عن السلك. يبلغ طول كل ضلع من أضلاع المربع $a = 1.00$ m.

a) أوجِد محصَّلة القوى بين الجسمين الحاملين للتيار.

b) أوجِد محصَّلة عزم الدوران في الحلقة.



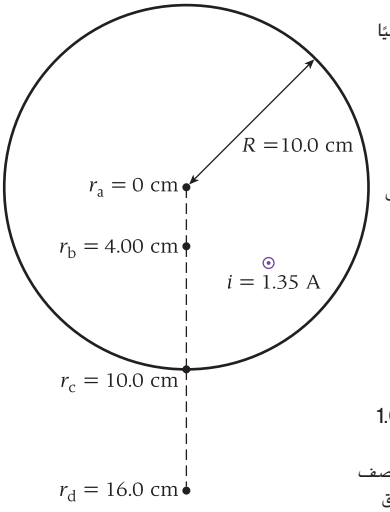
8.45 صندوق مربع يبلغ طول ضلعه 1.00 m، يقع أحد أركانه عند نقطة أصل نظامٍ إحداثي، كما يظهر في الشكل. رُبِطَ ملفان بالجزء الخارجي من الصندوق. يقع أحد الملفين على وجه الصندوق في المستوى xz عند النقطة $y = 0$. ويقع الملف الثاني على وجه الصندوق في المستوى yz عند النقطة $x = 1.00$ m. ويبلغ طول قطر كل ملف 1.00 m ويحتوي كلٌّ منهما على 30.0 لفة من سلك يحمل تيارًا مقداره 5.00 A في كل لفة. يسري التيار المتدفق في كل ملف في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إلى الملف من خارج الصندوق. ما مقدار واتجاه المجال المغناطيسي في مركز الصندوق؟



القسم 8.3

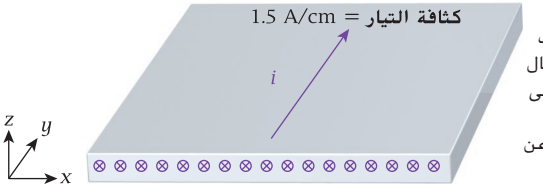
8.46 تختلف كثافة التيار في موصل أسطواني نصف قطره R حيث $J(r) = J_0 r/R$ (في المنطقة من صفر إلى R). عبِّر عن مقدار المجال المغناطيسي في المنطقتين $r < R$ و$r > R$. ارسم مخططًا عن التبعية القطرية، $B(r)$.

8.47 يعرض الشكل مقطعًا عرضيًا عبر قطر دائرة موصل أسطواني طويل مصمت. يبلغ نصف قطر الأسطوانة $R = 10.0\ \text{cm}$. يُوزَع تيار مقداره $1.35\ \text{A}$ بانتظام على الموصل ويتدفق خارجًا من الصفحة. احسب اتجاه ومقدار المجال المغناطيسي في المواقع $r_a = 0.0\ \text{cm}$ و $r_b = 4.00\ \text{cm}$ و $r_c = 10.0\ \text{cm}$ و $r_d = 16.0\ \text{cm}$.



8.48•• يتكوَّن سلك محوري من لب نحاسي نصف قطره $1.00\ \text{mm}$ محاط بغلافٍ نحاسي يبلغ نصف قطره الداخلي $1.50\ \text{mm}$ ويبلغ نصف قطره الخارجي $2.00\ \text{mm}$. ويتدفق التيار، i، في اتجاه واحد في اللب وفي الاتجاه المعاكس في الغلاف. مثِّل مقدار المجال المغناطيسي بيانيًا في صورة دالة للمسافة من مركز السلك.

8.49• صفيحة كبيرة جدًا من مادة موصلة تقع في المستوى xy، كما يظهر في الشكل. يتدفق خلالها تيار منتظم في الاتجاه y. تبلغ كثافة التيار $1.5\ \text{A/cm}$.



استخدم قانون أمبير لـــ حساب اتجاه ومقدار المجال المغناطيسي أعلى مركز الصفيحة مباشرةً (بعيدًا عن أيٍّ من الحواف).

القسم 8.4

8.50 يتدفق تيار مقداره $2.00\ \text{A}$ خلال ملف لولبي يحتوي على 1000 لفة، وتبلغ مساحته $L = 40.0\ \text{cm}$. ما مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي؟

8.51 يبلغ قطر الملف اللولبي A ضِعف قطر الملف اللولبي B، وطوله ثلاثة أضعاف طول الملف اللولبي B. وعدد لفاته أربعة أضعاف عدد لفات الملف اللولبي B. يتدفق خلال الملفين تياران متساويان في المقدار. أوجِد نسبة مقدار المجال المغناطيسي في الجزء الداخلي من الملف اللولبي A إلى مقدار المجال المغناطيسي في الجزء الداخلي من الملف اللولبي B.

8.52 رُبِطَ ملف لولبي طويل (يبلغ نصف قطره $6.00\ \text{cm}$) بسلك رفيع مكوَّن من 1000 لفة في المتر، الذي يمر خلاله تيار مقداره $0.250\ \text{A}$. وأُدخِلَ سلك يحمل تيارًا مقداره $10.0\ \text{A}$ على طول محور الملف اللولبي. ما مقدار المجال المغناطيسي عند نقطة على بُعد $1.00\ \text{cm}$ من المحور؟

8.53 يحمل سلك مستقيم طويل تيارًا مقداره $2.5\ \text{A}$.

a) ما شدة المجال المغناطيسي على مسافة $3.9\ \text{cm}$ من السلك؟

b) إذا كان السلك لا يزال يحمل تيارًا مقداره $2.5\ \text{A}$، ولكنه يُستخدَم في تكوين ملف لولبي طويل يحتوي على 32 لفة في السنتيمتر الواحد ويبلغ نصف قطره $3.9\ \text{cm}$، فما شدة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي؟

8.54 يعرض الشكل 8.20a ملف هلمهولتز يُستخدَم في توليد مجالاتٍ مغناطيسية منتظمة. افترض أن ملف هلمهولتز يتكوّن من مجموعتين من حلقات الأسلاك المحورية المكوَّنة من 15 لفة بنصف قطر $R = 75.0\ \text{cm}$، التي تبعد عن بعضها بمسافة R، ويحمل كل ملف تيارًا مقداره $0.123\ \text{A}$ يتدفق في الاتجاه نفسه. احسب مقدار واتجاه المجال المغناطيسي في المنتصف بين الملفات.

8.55• يستخدم جهاز للكشف عن الجسيم ملفًا لولبيًا مكوَّن من سلك يحتوي على 550 لفة في السنتيمتر الواحد. يحمل السلك تيارًا مقداره $22\ \text{A}$. يبلغ نصف القطر الداخلي لجهاز كشف أسطواني يقع داخل الملف اللولبي $0.80\ \text{cm}$.

وُجِّهت أشعة الإلكترون والبوزيترون نحو الملف اللولبي الموازي لمحوره. ما أقل كمية حركة (زَخْم) متعامدة على محور الملف اللولبي يمكن أن يحتوي عليها الجسيم في حال إمكانية إدخاله في جهاز الكشف؟

الأقسام من 8.5 حتى 8.7

8.56 يبلغ مقدار العزم المغناطيسي للف المغزلي لإلكترون $\mu = 9.285\times10^{-24}\ \text{A m}^2$. ومن ثَمَّ، فإنه يحتوي على طاقة مرتبطة باتجاهه في مجال مغناطيسي. إذا كان الفرق بين طاقة إلكترون "يلف بشكل مغزلي لأعلى" في مجال مغناطيسي مقداره B وطاقة إلكترون آخر "يلف بشكل مغزلي لأسفل" في المجال المغناطيسي نفسه (حيث يشير "لأعلى" و"لأسفل" إلى اتجاه المجال المغناطيسي) هو $9.460\times10^{-25}\ \text{J}$. فما هو المجال المغناطيسي، B؟

8.57 عندما يُوضَع ثنائي قطب مغناطيسي في مجال مغناطيسي، تكون له قابلية طبيعية لتقليل طاقته الكامنة من خلال محاذاة نفسه مع المجال. ولكن في حال وجود طاقة حرارية كافية، فإن القطب قد يدور بحيث لا يظل محاذيًا للمجال. يحدِّد استخدام k_BT كمقياس للطاقة الحرارية، حيث k_B هو ثابت بولتزمان و T هي درجة الحرارة بالكلفن، درجة الحرارة التي توجد فيها طاقة حرارية كافية لتدوير ثنائي القطب المغناطيسي المرتبط بذرة هيدروجين من اتجاهٍ موازٍ لمجال مغناطيسي مُطبَق إلى اتجاهٍ متوازٍ عكسيًا مع المجال المُطبَق. افترض أنَّ شدة المجال هي $0.15\ \text{T}$.

8.58 يصبح الألومنيوم فائق التوصيل عند درجة حرارة $1.0\ \text{K}$ تقريبًا إذا تعرض لمجال مغناطيسي يقل مقداره عن $0.0105\ \text{T}$. حدِّد أقصى تيار يمكن أن يتدفق في سلك ألومنيوم فائق التوصيل يبلغ نصف قطره $R = 1.0\ \text{mm}$.

8.59 إذا أردت إنشاء مغناطيس كهربائي من خلال تمرير تيار مقداره $3.00\ \text{A}$ عبر ملف لولبي مكوَّن من 500 لفة وبطول $3.50\ \text{cm}$ وأردت أن يصل مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي إلى $B = 2.96\ \text{T}$، فيمكنك إدخال قلب حديديك في الملف اللولبي. ما قيمة النفاذية المغناطيسية النسبية التي يجب أن توجد في قلب الحديديك لإتمام هذه العملية بنجاح؟

8.60 ما مقدار المجال المغناطيسي داخل سلك طويل مستقيم من التنغستين، يبلغ قطر المقطع العرضي الدائري له $2.4\ \text{mm}$، ويحمل تيارًا مقداره $3.5\ \text{A}$، على مسافة $0.60\ \text{mm}$ من محوره المركزي؟

8.61• اشحن كرةً مطاطية صغيرة كتلتها $200\ \text{g}$ من خلال حكّها بشعرك. تكتسب الكرة شحنةً مقدارها $2.00\ \mu\text{C}$. اربطها بعد ذلك بخيط طوله $1.00\ \text{m}$ واجعلها تتأرجح في دائرة أفقية، مولِّدةً قوة جذب مركزي مقدارها $25.0\ \text{N}$. ما العزم المغناطيسي للجهاز؟

8.62• تأمل نموذجًا لذرة الهيدروجين التي يدور فيها إلكترون حول بروتون في المستوى المتعامد على كمية الحركة الزاوية (الزخم الزاوي) للف المغزلي للبروتون (وعزم ثنائي القطب المغناطيسي) على مسافة مساوية لنصف قطر بور، $a_0 = 5.292\times10^{-11}\ \text{m}$. (يُعد هذا نموذجًا كلاسيكيًا مبسّطًا للغاية.) يمكن أن يكون اللف المغزلي للإلكترون موازيًا للف المغزلي للبروتون أو متوازيًا عكسيًا معه، ويكون المدار واحدًا في كلتا الحالتين. ولكن، بما أنَّ البروتون يُنتِج مجالاً مغناطيسيًا في موضع الإلكترون، وللإلكترون عزم ثنائي القطب الداخلي الخاص به، فإن طاقة الإلكترون تختلف تبعًا للف المغزلي له. ويمكن نمذجة المجال المغناطيسي الناتج عن اللف المغزلي للبروتون في صورة مجال ثنائي القطب، مثل المجال الكهربائي الناتج عن ثنائي قطب كهربائي الذي ناقشناه في الوحدة 22. احسب فرق الطاقة بين ترتيبي اللف المغزلي للإلكترون. تأمل فقط التفاعل بين عزم ثنائي القطب المغناطيسي واللف المغزلي للإلكترون والمجال الناتج عن اللف المغزلي للبروتون.

8.63•• تخيَّل أن إلكترونًا على شكل كرة تتوزع كثافته بانتظام، يبلغ إجمالي شحنته $-e = -1.602\times10^{-19}\ \text{C}$، يدور بتردد زاوي، ω.

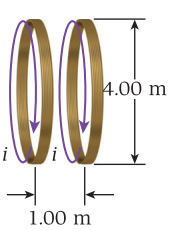
a) اكتب تعبيرًا لإيجاد كمية الحركة الزاوية الكلاسيكية لدورانه، L.

b) اكتب تعبيرًا لإيجاد عزم ثنائي القطب المغناطيسي له، μ.

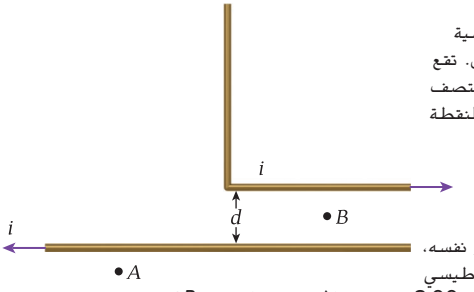
c) أوجِد النسبة، $\gamma_e = \mu/L$، المعروفة باسم *النسبة المغناطيسية الدورانية*.

تمارين إضافية

8.64 وُضِع ملفان مكوّنان من 50 لفةً، يبلغ قطر كل منهما $4.00\ \text{m}$، على مسافة $1.00\ \text{m}$ عن بعضها، كما يظهر في الشكل. ويتدفق تيار مقداره $7.00\ \text{A}$ في أسلاك الملفين؛ ويسري التيار في كلا الملفين في اتجاه عقارب الساعة عند النظر إليهما من الجانب الأيسر. ما مقدار المجال المغناطيسي في المنتصف بين الملفين؟



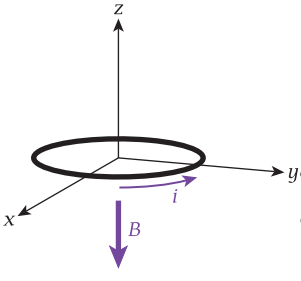
8.65 تفصل مسافةٌ رأسية d بين السلكين في الشكل. تقع النقطة B عند نقطة المنتصف بين السلكين، بينما تقع النقطة A على مسافة $d/2$ من السلك السفلي. والمسافة الأفقية بين A وB أكبر بكثير من d. يحمل كلا السلكين التيار نفسه، i. وتبلغ شدة المجال المغناطيسي عند النقطة A تكون 2.00 mT. ما شدة المجال عند النقطة B؟



8.66 تخيّل أنك تقف في بقعة يكون فيها المجال المغناطيسي للأرض أفقيًا، ويشير ناحية الشمال، ويبلغ مقداره 40.0 μT. وفوق رأسك مباشرةً، على ارتفاع 12.0 m، يحمل كابل أفقي طويل تيارًا مباشرًا مستقرًا مقداره 500. ويتجه ناحية الشمال. احسب الزاوية θ التي تنحرف بها إبرة البوصلة المغناطيسية عن الشمال المغناطيسي الحقيقي بفعل تأثير الكابل. لا تنسَ أنَّ رمز θ— يشير إلى الانحراف ناحية الشرق أو الغرب؟

8.67 يبلغ عزم ثنائي القطب المغناطيسي للأرض حوالي 8.0×10^{22} A m^2. مصدر المجال المغناطيسي للأرض غير معروف؛ وقد يكون أحد الاحتمالات الواردة أنَّه يرجع إلى دوران الأيونات في اللُّب الخارجي المنصهر للأرض. افترض أنَّ الأيونات الدائرة تُحرِّك حلقةً دائرية يبلغ نصف قطرها 2500 km. ما "التيار" الذي يجب أن تُنتِجه (الأيونات) للحصول على المجال الملحوظ؟

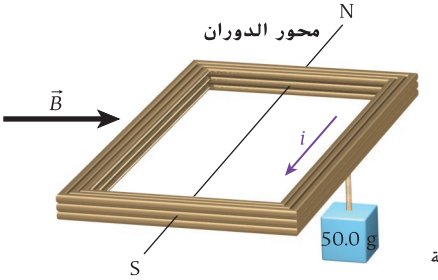
8.68 يبلغ نصف قطر حلقة سلك دائرية $R = 0.12$ m وتحمل تيارًا $i = 0.10$ A. تُوضَع الحلقة في المستوى xy في مجال مغناطيسي منتظم يتحدَّد من خلال $\vec{B} = -1.5\hat{z}$ T كما يظهر في الشكل. حدّد اتجاه ومقدار العزم المغناطيسي للحلقة، واحسب الطاقة الكامنة للحلقة في الموقع الموضَّح. إذا كانت حلقة السلك تتحرَّك بحرية، إذا فكيف ستُوجِّه نفسها لتقليل طاقتها الكامنة، وما هي قيمة أقل طاقة كامنة؟



8.69 ثمة ملف لولبي بطول 0.90 m يبلغ نصف قطره 5.0 m. عندما يحمل السلك تيارًا مقداره 0.20 m، فإنَّ المجال المغناطيسي داخل السلك يكون 5.0 mT. ما عدد لفات السلك في الملف اللولبي؟

8.70 في كابل محوري، يحمل اللُّب المصمت التيار i. ويحمل أيضًا الغلاف التيار i ولكنه يكون في الاتجاه المعاكس، ونصف قطره الداخلي a، ونصف قطره الخارجي b. وتُوزَّع كثافة التيار بالتساوي على كل موصل. أوجِد تعبيرًا لإيجاد المجال المغناطيسي على مسافة $a < r < b$ من مركز اللُّب.

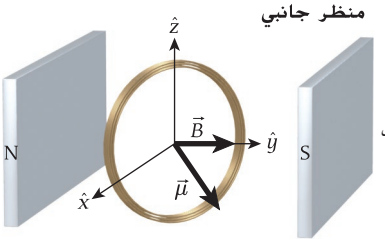
8.71 يقع ملف مستطيل مكوَّن من 50 لفة، أبعاده هي 10.0 cm × 20.0 cm. في مستوى أفقي، كما يظهر في الشكل. محور دوران الملف محاذٍ للشمال والجنوب. ويحمل تيارًا $i = 1.00$ A ويقع في مجال مغناطيسي يتجه من الغرب إلى الشرق. وتتدلى كتلة تزن 50.0 g من جانب واحد من الملف. حدّد شدة المجال المغناطيسي اللازمة للحفاظ على الملف في الاتجاه الأفقي.



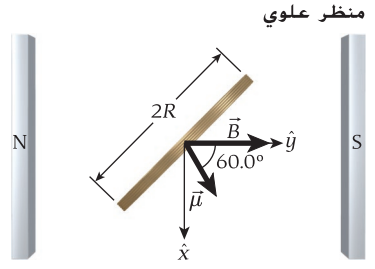
8.72 سلكان طويلان مستقيمان ومتوازيان تفصل بينهما مسافة 20.0 cm. ويحمل كل سلك تيارًا مقداره 10.0 A في الاتجاه نفسه. ما مقدار المجال المغناطيسي الناتج عند نقطةٍ على مسافة 12.0 cm من كل سلك؟

8.73 جسيم كتلته 1.00 mg وشحنته q، يتحرَّك بسرعة 1000 m/s على طول مسار أفقي طوله 10.0 cm أسفل سلك مستقيم حامل للتيار وبشكل موازٍ له. حدّد q إذا كان مقدار التيار في السلك هو 10.0 A.

8.74 وُضِعَ ملف موصِّل يتكوَّن من عدد n من لفات السلك، في مجال مغناطيسي منتظم يتحدَّد من خلال $\vec{B} = 2.00\hat{y}$ T كما يظهر في الشكل. يبلغ نصف قطر الملف $R = 5.00$ A. وتبلغ الزاوية بين متجه المجال المغناطيسي ومتجه الوحدة العمودي على الملف $\theta = 60.0°$ تبلغ شدة التيار المتدفق عبر الملف $i = 5.00$ A.



a) حدّد اتجاه التيار في الملف، في ضوء اتجاه عزم ثنائي القطب المغناطيسي، $\vec{\mu}$ كما يظهر في الشكل.

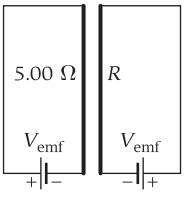


b) احسب عدد اللفات، n، التي ينبغي أن يتضمّنها الملف ليكون عزم الدوران على الحلقة 3.40 N m.

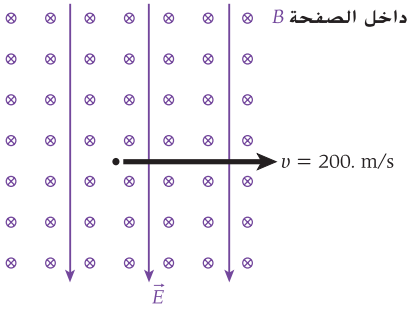
c) في حال تقليل نصف قطر الحلقة $R = 2.50$ cm، ما عدد اللفات، N، اللازم ليظل عزم الدوران كما هو لا يتغيَّر؟ افترض أنَّ i وB وθ ظلت كما هي.

8.75 تحتوي حلقة سلك، يبلغ نصف قطرها $R = 2.50$ cm، على حلقةٍ أصغر عند مركزها يبلغ نصف قطرها $r = 0.900$ cm ومستويات الحلقتين متعامدة أحدها على الآخر. عندما يمر تيار مقداره 14.0 A عبر كلتا الحلقتين، تكتسب الحلقة الصغرى عزم دوران بسبب المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة الكبرى. حدّد عزم الدوران هذا، بافتراض أنَّ الحلقة الصغرى صغيرة بما يكفي لأن يظل المجال المغناطيسي الناتج عن الحلقة الكبرى هو نفسه عبر سطحها بالكامل.

8.76 وُصِّلَ سلكان،يبلغ طول كل منهما 25.0 cm، ببطاريتين منفلصتين شدة كل منهما 9.00–V، كما يظهر في الشكل. تبلغ مقاومة السلك الأول 5.00 V، بينما مقاومة السلك الآخر غير معروفة (R). إذا كانت المسافة الفاصلة بين السلكين هي 4.00 mm، فما قيمة R التي ستُولِّد قوةً مقدارها 4.00×10^{-5} N بينهما؟ وهل هي قوة جذب أم قوة تنافر؟



8.77 يتحرَّك بروتون تحت التأثير المُجمَع لمجال كهربائي ($E = 1000$ V/m) ومجال مغناطيسي ($B = 1.20$ T)، كما يظهر في الشكل.

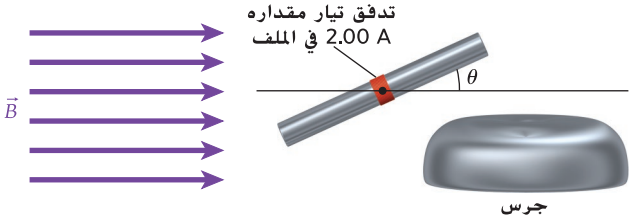


a) ما عجلة البروتون لحظة دخوله المجالين المتقاطعين؟

b) ماذا كانت ستصبح العجلة في حال عكس اتجاه حركة البروتون؟

8.78 تطير طائرة لعبة، تزن كتلتها 0.175 kg، وتبلغ شحنتها 36 mC، بسرعة 2.8 m/s على ارتفاع 17.2 cm فوق سلك، يحمل تيارًا مقداره 25 A وبشكل موازٍ له. تتعرَّض الطائرة لبعض العجلة. حدّد هذه العجلة.

8.79 أُنشئ جرس باب كهرومغناطيسي عن طريق لف سلكٍ 70 لفةً حول قضيب طويل رفيع، كما يظهر في الشكل. تزن كتلة القضيب 30.0 g، ويبلغ طوله 8.00 cm . وتبلغ مساحة مقطعه العرضي 0.200 cm^2.



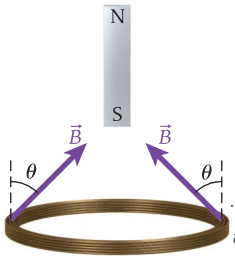
يدور القضيب بحرية حول محورٍ عبر مركزه، الذي هو أيضًا مركز الملف. في البداية، يصنع القضيب زاوية $\theta = 25.0°$ مع المستوى الأفقي. عندما تكون $\theta = 0.00°$، يضرب القضيب الجرسَ. يبلغ المجال المغناطيسي المنتظم 900. تُوجَّه G عند زاوية $\theta = 0.00°$.

a) إذا تدفق تيار مقداره 2.00 A في الملف، فما عزم الدوران على القضيب عندما تكون $\theta = 25.0°$؟

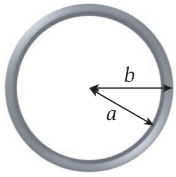
b) ما السرعة الزاويّة للقضيب عندما يضرب الجرس؟

•**8.80** يحمل سلكان طويلان متوازيان، تفصل بينهما مسافة d، تيارين في اتجاهين معكوسين. إذا كان السلك الأيسر يحمل تيارًا $i/2$ ويحمل السلك الأيمن تيارًا i، فحدّد أين ستكون قيمة المجال المغناطيسي صفرًا.

•**8.81** يتم رفع ملف سلك مُوجَّه أفقيًا – يبلغ نصف قطره 5.00 cm ويحمل تيارًا، i – من خلال القطب الجنوبي على قضيب مغناطيسي مُوجَّه رأسيًا ومُعلَّق فوق مركزه، كما يظهر في الشكل. إذا كانت المجال المغناطيسي على كل أجزاء الملف يصنع زاويةً مقدارها $\theta = 45.0°$ مع القضيب الرأسي، فحدِّد مقدار التيار اللازم للحفاظ على طفو الملف في الهواء. يبلغ مقدار المجال المغناطيسي $B = 0.0100$ T. ويبلغ عدد اللفات في الملف $N = 10.0$. ويبلغ إجمالي كتلة الملف 10.0 g.



•**8.82** كما يظهر في الشكل، تحمل أسطوانة موصِّلة طويلة ومجوَّفة، نصف قطرها الداخلي a ونصف القطر الخارجي b، تيارًا يتدفق خارجًا من الصفحة. افترض أنَّ $a = 5.00$ cm و$b = 7.00$ cm، وأنَّ التيار $i = 100.$ mA. موزّع بانتظام على الجدار الأسطواني (بين a وb). أوجد مقدار المجال المغناطيسي في كل من المسافات التالية r من مركز الأسطوانة:



a) $r = 4.00$ cm

b) $r = 6.50$ cm

c) $r = 9.00$ cm

•**8.83** يحمل سلك يبلغ نصف قطره R التيار i. وتُحَدَّد كثافة التيار من خلال $J = J_0(1 - r/R)$، حيث تُقاس r من مركز السلك ويكون J_0 ثابتًا. استخدِم قانون أمبير لإيجاد المجال المغناطيسي داخل السلك على مسافة $r < R$ من المحور المركزي.

•**8.84** يتدفق تيار مقداره 3.0 A في سلك دائري يبلغ نصف قطره 5.0 cm. يُوضَع السلك في مجال مغناطيسي منتظم 5.0 mT.

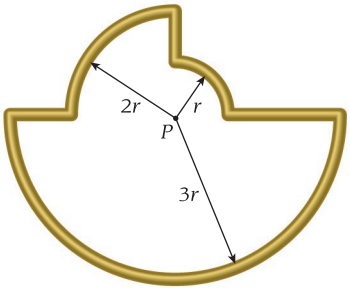
a) حدّد أقصى عزم دوران على السلك.

b) حدّد مدى طاقة الوضع المغناطيسية للسلك.

تمارين بمعطيات متعددة

8.85 تحمل الحلقة الموضَّحة في الشكل تيارًا مقداره 3.857 A، والمسافة $r = 1.411$ m. ما مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة P داخل الحلقة؟

8.86 تحمل الحلقة الموضَّحة في الشكل تيارًا مقداره 3.961 A. ويبلغ مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة P داخل الحلقة 7.213×10^{-7} T. ما قيمة r؟



8.87 في الحلقة الحاملة للتيار الموضَّحة في الشكل، تبلغ المسافة $r = 2.329$ m. ويبلغ مقدار المجال المغناطيسي عند النقطة P داخل الحلقة 5.937×10^{-7} T. ما مقدار التيار في الحلقة؟

8.88 يبلغ نصف القطر الداخلي لمغناطيس حلقي 1.895 m ويبلغ نصف قطره الخارجي 2.075 m. عندما يحمل السلك تيارًا مقداره 33.45 A، فإنَّ المجال المغناطيسي على مسافة 1.985 m من مركز المغناطيس الحلقي يكون 66.78 mT. ما عدد لفات السلك الموجودة في المغناطيس الحلقي؟

8.89 يبلغ نصف القطر الداخلي لمغناطيس حلقي 1.121 m ويبلغ نصف قطره الخارجي 1.311 m. ويبلغ المجال المغناطيسي على مسافة 1.216 m من مركز الملف الحلقي 78.30 mT. توجد 22,381 لفةً من السلك في المغناطيس الحلقي. ما مقدار التيار في المغناطيس الحلقي؟

8.90 يبلغ نصف القطر الداخلي لمغناطيس حلقي 1.351 m ويبلغ نصف قطره الخارجي 1.541 m. يحمل السلك تيارًا مقداره 49.13-A. وتوجد 24,945 لفةً في المغناطيس الحلقي. ما مقدار المجال المغناطيسي على مسافة 1.446 m من مركز المغناطيس الحلقي؟

هذا الملف مقدم بواسطة



مكتبة الفكر

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

متابعة