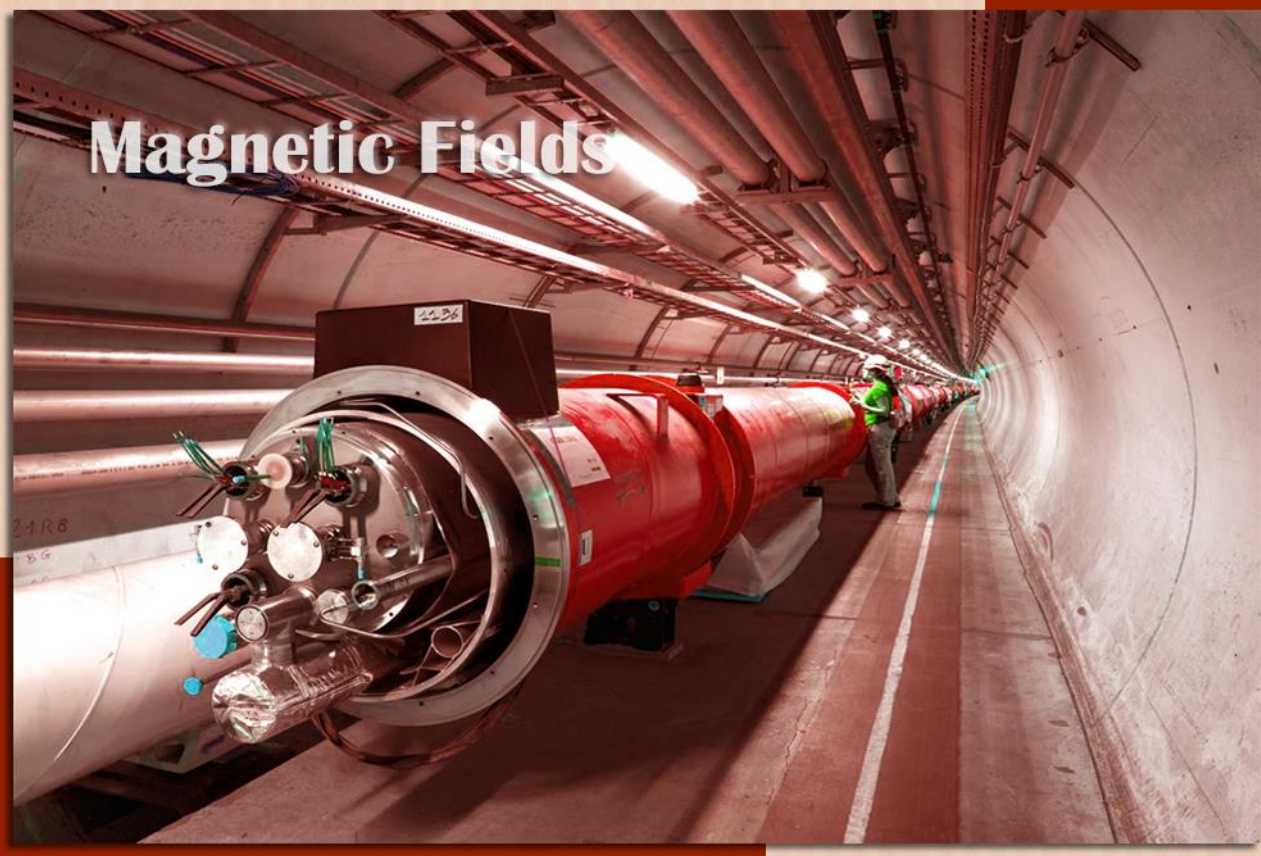
من اصدارات المركز العلمي للترجمة

المجال المغناطيسي

الفصل الأول من كتاب المغناطيسية والتيار المتردد



إعداد وترجمة

الدكتور حازم فلاح سكيك

www.trgma.com

إهداء إلى أبنائي

وطلابي

ومحبي الفيزياء

دكتور حازم فلاح سكيك

www.hazemsakeek.net

مقدمة

يعتبر المغناطيس من أهم المواد الموجودة لنا في عصرنا الحالي وهو من أهم الاختراعات التي ظهرت في مجال الفيزياء فمنذ بداية اكتشاف حجر المغناطيس في مدينة مغنيسيا في تركيا والفكر البشري يحاول أن يجد استخدامات واستعمالات لهذا الحجر الجاذب للمعادن فمع بداية التطور صنع واخترع المغناطيس الصناعي كما نراه اليوم وتم الاستفادة منه بشكل مذهل ومدهش خاصة في مجال المواصلات) القطارات الكهربائية السريعة والحافلات الكهربائية (وتخزين المعلومات في الحاسوب وأجهزة تسجيل الصورة وتسجيل لصوت مثل القرص الصلب والكاسيت وغيرها في الأجهزة التي يستخدمها الفيزيائيون في تجاربهم مثل معجلات الجسيمات، مثل مصادم الهدرونات الكبير وفيرميلاب. في هذا الفصل من كتاب المغناطيسية والتيار المتردد سوف ننقوم بشرح خواص المجال المغناطيسي والقوى المغناطيسية الناتجة عن المجال وتأثير المجال المغناطيسي على شحنة كهربية متحركة مع دراسة للعديد من التطبيقات المعتمدة على المجال المغناطيسي مثل مرشح السرعة ومطياف الكتلة ومعجل السيكلترون وفكرة عملهم كما سوف نتطرق دراسة تأثير المجال المغناطيسي على موصل يمر فيه تيار كهربي وتأثير عزم الازدواج على حلقة سلك يمر فيها تيار كهربي وفي نهاية هذا الفصل سوف ندرس ظاهرة هول المستخدمة في معرفة نوع حاملات الشحنة في المواد المختلفة وعلاقتها بقياس المجال المغناطيسي. يعتبر هذا الفصل الفصل الأول والاساسي في دراسة المجال المغناطيسي، وهذا ترجمة للفصل التاسع والعشرين من كتاب الفيزياء للعلوم والهندسة مع الفيزياء الحديثة Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics للمؤلف ريموند سيروي Raymond A. Serway وتأتي هذه الترجمة ضمن نشاطات المركز العلمي للترجمة في نشر العلوم باللغة العربية وتبسيطها.

أتمنى ان يكون هذا العمل في خدمة أبنائنا الطلبة في مختلف الكليات العلمية ليكون لهم مرجعا رئيسيا دراسة الفيزياء.

مع خالص تحياتي

د. حازم فلاح سكيك

جامعة الأزهر – غزة

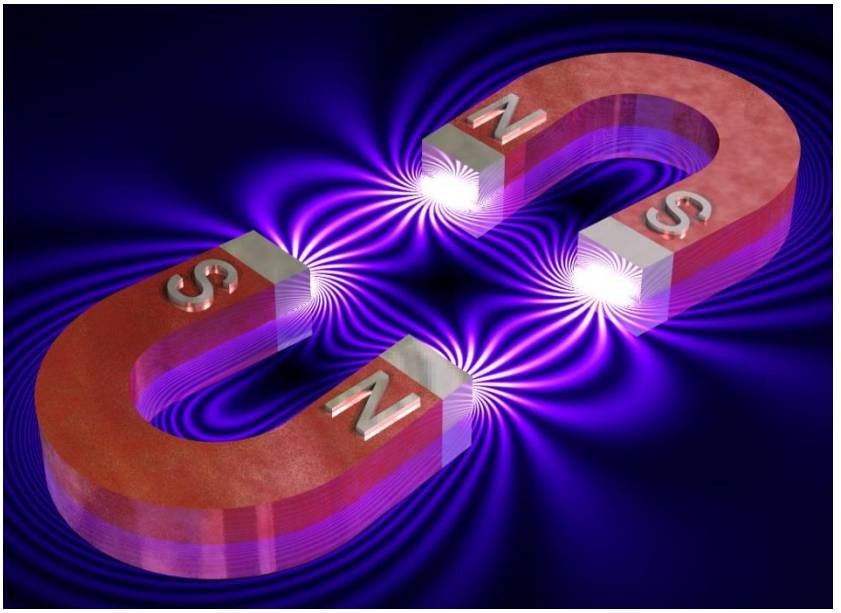
غزة في 25-5-2014

www.hazemsakeek.net

المغناطيسية والتيار المتردد

Magnetizm and Alternating Current

الفصل الأول: المجال المغناطيسي



ترجمة وإعداد
الدكتور حازم فلاح سكيك

المجال المغناطيسي

Magnetic Fields

9	Magnetic Fields and Forces	1.1 المجالات والقوى المغناطيسية
18	Motion of a Charged Particle in a Uniform Magnetic Field	2.1 حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسية منتظم
28	Applications Involving Charged Particles Moving in a Magnetic Field	3.1 تطبيقات تتضمن جسيمات مشحونة تتحرك في مجال مغناطيسي
33	Magnetic Force Acting on a Current-Carrying Conductor	4.1 القوة المغناطيسية المؤثرة على موصل يحمل تيار
39	Torque on a Current Loop in a Uniform Magnetic Field	5.1 الازدواج على حلقة تيار في مجال كهربي منتظم
47	The Hall Effect	6.1 تأثير هول

الكثير من المؤرخين يعتقدون ان البوصلة التي تستخدم الإبرة المغناطيسية قد استخدمت في الصين في مطلق القرن الثالث عشر قبل الميلاد، ويعتقد انها في الأصل من اختراع العرب او الهنود. تعرف اليونانيون على المغناطيسية في مطلق العام 800 قبل الميلاد. لقد اكتشفوا ان حجر الماجنتيت او أكسيد الحديد الأسود (Fe_3O_4) يجذب قطع من الحديد. وتقول الاساطير القديمة ان اسم مغناطيس يعود إلى راعي اغنام يدعى ماغنس شعر بانجذاب المسامير في حذائه بحجارة الماجنتيت على انه اول من اكتشف المغناطيسية تجوله في الأراضي لرعاية الاغنام.

في العام 1269 وجد بير دي ماريكورت Pierre de Maricourt الفرنسي ان اتجاهات ابرة بالقرب من مغناطيس طبيعي كروي الشكل تشكل خطوط تحيط بالكرة وتمر خلال نقطتين متعاكستين لبعضهما البعض، والتي عرفتا بالاسم قطبي المغناطيس. التجارب التي أجريت بعد ذلك اثبتت ان كل مغناطيس مهما كان شكله يمتلك قطبين احدهما يعرف بالقطب الشمالي والأخر بالقطب الجنوبي، ويبذل كل قطب قوى مغناطيسية على القطب الاخر. بحيث ان الأقطاب المتشابهة تتنافر والاقطاب المتعاكسة تتجاذب مع بعضها البعض.

التسمية التي اطلقت على كل قطب جاءت من طريقة تصرف المغناطيس في وجود المجال المغناطيسي للأرض. اذا قمنا بتعليق مغناطيس من نقطة في وسطه وسمح له بالدوران بحرية في الاتجاه الافقي، فانه سوف يستمر في الدوران حتى يتجه قطبه الشمالي إلى الاتجاه الشمال الجغرافي للأرض ويتجه قطبه الجنوبي إلى اتجاه الجنوب الجغرافي للأرض.

في العام 1600 اجرى العالم وليام جيلبيرت William Gilbert (1540 – 1603) المزيد من التجارب على العديد من المواد. لقد عرف ان إبرة البوصلة تتخذ اتجاهات مفضلة، لذلك فقد اقترح ان الأرض نفسها عبارة عن مغناطيس دائم كبير. في العام 1750 أجريت العديد من التجارب باستخدام ميزان اللي لاثبات ان الأقطاب المغناطيسية تبذل قوة تجاذبية او تنافرية على بعضها البعض وان هذه القوى تتغير عكسيا مع مربع المسافة بين الأقطاب المتقابلة. بالرغم من ان القوى بين الأقطاب المغناطيسية تشبه القوى بين شحنيتن كهربيتين، الا ان الشحنات الكهربية يمكن فصلها عن بعضها البعض (كما في

الالكترون والبروتون) في حين انه لا يمكن فصل قطب مغناطيسي عن القطب الاخر. لذلك فاننا نجد ان الأقطاب المغناطيسية تتواجد في شكل ازواج، ومهما قمنا بتقسيم المغناطيس إلى قطع صغيرة يكون دائما لدينا قطبين مغناطيسيين قطب شمالي وقطب جنوبي.

هانز كريستيان اورستيد.Hans Christian Oersted

فيزيائي وكيميائي دينماركي (1777 ـ 1851)

عرف العالم اورستيد بملاحظته لانحراف الابرة المغناطيسية عندما توضع بجوار سلك يمر فيه تيار كهربي. هذا الاكتشاف الهام كان هو الاثبات الاولي للعلاقة بين الكهربية والمغناطيسية. كما ان العالم اورستيد هو اول من حضر الألومنيوم النقي.

اكتشفت العلاقة بين المغناطيسية والكهربية في العام 1819 اثناء قيام العالم هانز كريستيان اورستيد Hans Christian Oersted بعرض تجربة في محاضرة له حيث واجد ان التيار الكهربي في السلك يتسبب في انحراف ابرة مغناطيسية موجودة بالقرب من سلك يمر به التيار الكهربي. في العام 1820 اكتشف بشكل مستقل كلا من العالم فارادي Faraday والعالم جوزيف هنري Joseph Henry (1797 – 1878) نفس العلاقة بين الكهربية والمغناطيسية. لقد اثبتا ان التيار الكهربي يمكن ان ينتج في الدائرة اما بواسطة تحريك مغناطيس بالقرب من دائرة كهربية او بتغير التيار الكهربي بالقرب من دائرة. تظهر هذه الملاحظات ان المجال المغناطيسي المتغير ينتج مجالا كهربيا. بعد مرور عدة أعوام اثبت العالم ماكسويل Maxwell بالاشتقاق النظري ان العكس ممكن أيضا، أي تغير المجال الكهربي ينتج مجالا مغناطيسيا.

في هذا الفصل سوف نقوم بدراسة القوى التي تؤثر على شحنة متحركة وكذلك التي تؤثر على سلك يمر فيه تيار كهربي في وجود مجال مغناطيسي. سوف ندرس مصدر المجال المغناطيسي في الفصل الثاني من هذا الكتاب.

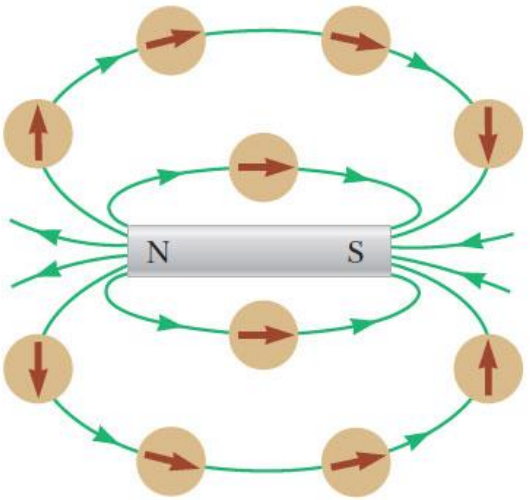
مهندسة تقوم بفحص على الالكترونيات المرتبطة بمغناطيس الموصل الفائق في مصادم الهادرن الكبير في المختبر الأوروبي لفيزياء الجسيمات. يستخدم المغناطيس للتحكم في حركة الجسيمات المشحونة في المعجل. سوف نقوم بدراسة تأثير المجال المغناطيسي على الجسيمات المشحونة المتحركة في هذا الفصل.

1.1 المجالات والقوى المغناطيسية Magnetic Fields and Forces

من دراستنا للكهربية قمنا بوصف التفاعلات بين الاجسام المشحونة بدلالة المجال الكهربي. تذكر المجال الكهربي المحيط باي شحنة كهربية. بالإضافة إلى الشحنات الكهربية الساكنة تمتلك مجالا كهربيا، فان المنطقة المحيطة بشحنة متحركة تمتلك أيضا مجالا مغناطيسيا. كذلك فان المجال المغناطيسي يحيط بالمغناطيس.

استخدم الرمز $\vec{B}$ لتمثيل المجال المغناطيسية وسوف نستخدمه أيضا في هذا الكتاب. اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{B}$ عند أي موضع يكون في اتجاه إبرة بوصلة مغناطيسية عند ذلك الموضع. على نحو مشابع للمجال الكهربي يمكننا ان نمثل المجال المغناطيسي بخطوط تعرف باسم خطوك المجال المغناطيسي.

يوضح الشكل 1.1 خطوط المجال المغناطيسي لساق مغناطيسية يمكن أيضا تتبع هذه الخطوط بواسطة إبرة بوصلة مغناطيسية. لاحظ ان خطوط المجال المغناطيسي خارج المغناطيس تتجه من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي. كما يمكن توضيح خطوط المجال المغناطيسي لساق مغناطيسية باستخدام برادة حديد كما هو موضح في الشكل 2.1.

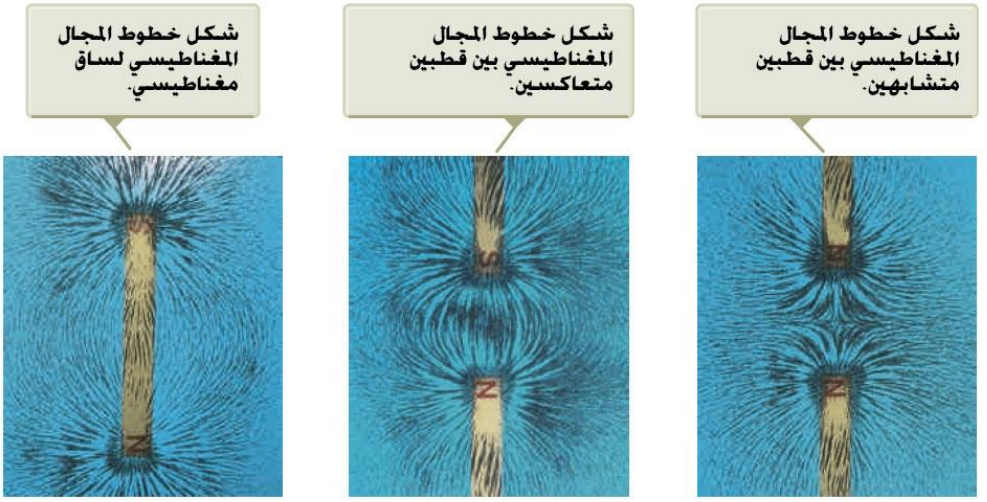


الشكل 1.1 يمكن استخدام إبرة بوصلة لتتبع خطوط المجال المغناطيسي في منطقة خارج ساق مغناطيسية.

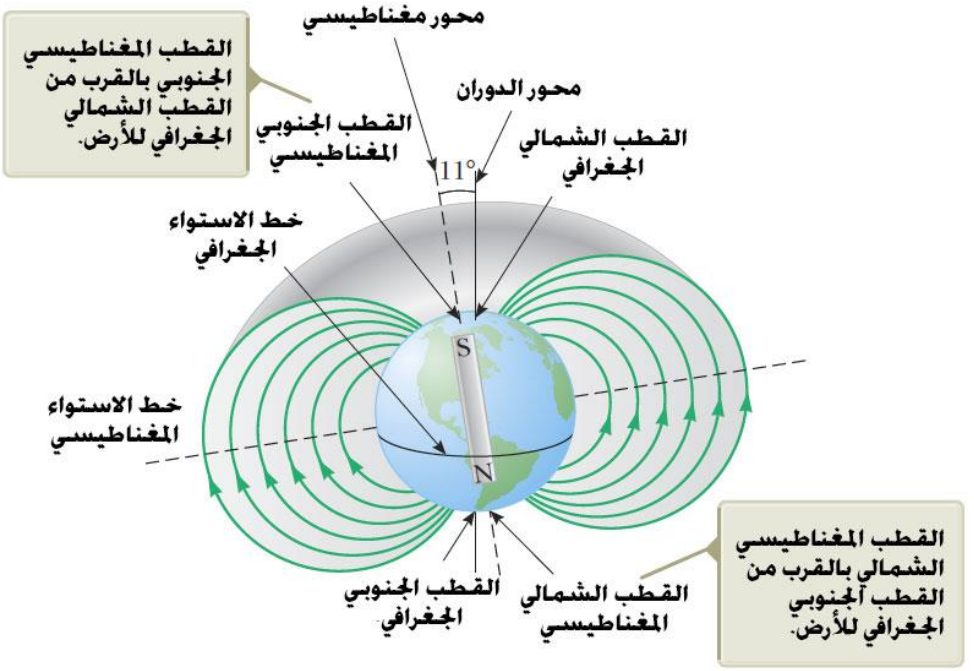
عند الحديث عن قطبي مغناطيس البوصلة وهما القطب الشمالي والقطب الجنوبي فانه من الأنسب ان نقول القطب الباحث عن الشمال والقطب الباحث عن الجنوب. هذا يعني ان القطب الباحث عن الشمال يشير دائما إلى القطب الشمالي الجغرافي، بينما القطب الباحث عن الجنوب يشير دائما إلى القطب الجنوبي الجغرافي. حيث ان القطب الشمالي للمغناطيس ينجذب نحو القطب الشمالي الجغرافي، فإن موضع القطب المغناطيسي الجنوبي يقع بالقرب من القطب الشمالي الجغرافي والقطب المغناطيسي الشمالي يقع بالقرب من القطب الجنوبي الجغرافي. يوضح الشكل 3.1 صورة لمجال المغناطيسية الأرضية والذي يشبه تماما المجال المغناطيسي الناتج عن ساق مغناطيسي افتراضي مدفون في داخل الكرة الأرضية. اذا كانت الإبرة المغناطيسية مثبتة بشكل يسمح لها الدوران بحرية في المستوى الرأسي وكذلك في المستوى الأفقي، فان الإبرة تكون افقية بالنسبة لسطح الأرض فقط عندما تكون بالقرب من خط الاستواء. مع حركة البوصلة نحو الشمال فان الإبرة المغناطيسية للبوصلة سوف تدور بحيث تشير اكثر واكثر نحو سطح الأرض. أخيرا عند نقطة بالقرب من بحيرة هدسون في كندا فان القطب الشمالي للابرة المغناطيسية سوف يشير مباشرة إلى الأسفل. اكتشف هذا الموقع في العام 1832 وقد اعتبر على انه موضع القطب المغناطيسي الجنوبي للأرض. ويبعد حوالي 1300 ميل تقريبا عن القطب الشمالي الجغرافي للأرض، والموضع الدقيق يتغير ببطء شديد مع الزمن. بالمثل فان القطب المغناطيسي الشمالي للارضي يبعد حوالي 1200 ميل عن القطب الجنوبي الجغرافي للأرض.

بالرغم من ان شكل المجال المغناطيسي للأرض يشبه تماما للمجال المغناطيسي لساق كبيرة داخل باطن الأرض، فانه من السهل فهم لماذا لا يكون مصدر هذا المجال المغناطيسي كتلة كبيرة من المواد الدائمة المغناطيسية. يوجد الكثير من الحديد الخام في باطن الأرض الا ان درجة الحرارة العالية في باطن الأرض تمنع الحديد من الاحتفاظ باي مغناطيسية دائمة. اعتبر العلماء ان مصدر المجال المغناطيسي للأرض هو تيارات الحمل convection currents في باطن الأرض. الايونات المشحونة او الالكترونات التي تدور في الوسط السائل في باطن الأرض قد ينتج مجالا مغناطيسيا تماما مثلما تفعل حلقة

تيار كهربي كما سوف نوضحه في الفصل الثاني من هذا الكتاب.



الشكل 2.1 اشكال المجال المغناطيسي المختلفة تظهر بنشر برادة الحديد على ورقة فوق مغناطيس



الشكل 3.1 خطوط المجال المغناطيسي للكرة الأرضية

كما يوجد أيضا دليل قوي على ان مقدار المجال المغناطيسي لكوكب يرتبط مع معدل دوران الكوكب حول نفسه. على سبيل المثال يدور كوكب المشتري بسرعة اكبر من الأرض وقد أفادت المجسات الفضائية ان المجال المغناطيسي لكوكب المشتري اقوى من المجال المغناطيسي للأرض. أما كوكب الزهرة يدرو بسرعة اقل من كوكب الأرض وقد وجد ان مجاله المغناطيسي اضعف من المجال المغناطيسي للأرض. لازالت البحوث والدراسات تجرى على منشأ المغناطيسية الأرضية.

اتجاه المجال المغناطيسي الأرضي قد انعكس عدة مرات خلال الملايين من السنوات السابقة. تتشكل صخور البازلت في أعماق المحيطات تحت تأثير النشاط البركاني.مع انخفاض درجة حرارة الحمم البركانية فانها تتصلب وتحافظ على صورة اتجاه المجال المغناطيسي للأرض. أجريت دراسات لتقدير اعمار هذه الصخور للحصول على معلومات حول الخط الزمني للانعكاسات التي حدثت في المجال المغناطيسي للأرض.

يمكننا ان نعرف المجال المغناطيسي $\vec{\boldsymbol{B}}$ عند نقطة محددة في الفراغ بدلالة القوة المغناطيسية $\vec{\boldsymbol{F}}_B$ التي يبذلها المجال على جسيم مشحون يتحرك بسرعة $\vec{\boldsymbol{v}}$، والتي نطلق عليه باسم جسم الاختبار. في الوقت الراهن دعنا نفترض عدم وجود مجال كهربي او مجال الجاذبية عند موضع جسم الاختبار. التجارب العديدة التي أجريت على اجسام مشحونة ومتحركة في مجال مغناطيسي أعطت النتائج المتنوعة التالية:

خواص القوة المغناطيسية على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي

- مقدار القوة المغناطيسية F_B المبذولة على جسيم تتناسب طرديا مع الشحنة q وسرعة الجسيم v.
- عندما يتحرك الجسيم المشحون بشكل موازيا مع متجه المجال المغناطيسي فان القوة المغناطيسية المؤثرة على الجسيم تساوي صفر.
- عندما يصنع متجه سرعة الجسيم أي زاوية $\theta \neq 0$ مع المجال المغناطيسي، فان القوة المغناطيسية تؤثر في اتجاه عمودي على كلا من $\vec{\boldsymbol{v}}$ و$\vec{\boldsymbol{B}}$ كما هو موضح في الشكل 4.1 a.

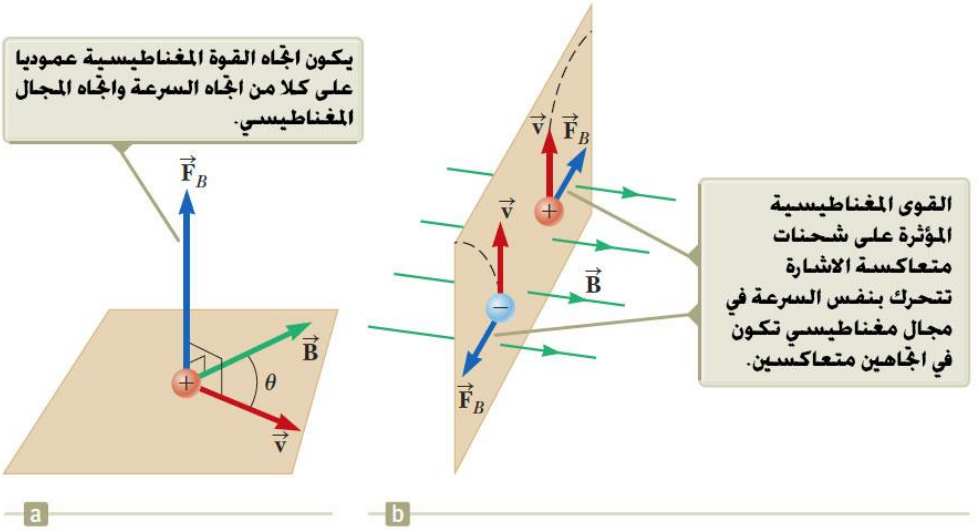
- القوة المغناطيسية المبذولة على الشحنة الموجبة تكون في اتجاه معاكس لاتجاه القوة المغناطيسية المبذولة على شحنة سالبة تتحرك في نفس الاتجاه كما هو موضح في الشكل 4.1 b.
- مقدار القوة المغناطيسية المبذولة على جسيم متحرك يتناسب طرديا مع $\sin\theta$ حيث ان θ هي الزاوية التي يصنعها متجه سرعة الجسيم مع الاتجاه $\vec{B}$.

يمكننا ان نلخص هذه الملاحظات بكتابة القوة المغناطيسية في صورة

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \qquad (1.1)$$

هذه هي الصورة الاتجاهية للقوة المغناطيسية المؤثرة على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي.

واتجاه القوة المغناطيسية نحصل عليه من خلال خصائص الضرب الاتجاهي ويكون عموديا على كلا من $\vec{v}$ و$\vec{B}$. يمكن اعتبار هذه المعادلة على انها تعريف اجرائي (أي تم الحصول عليه بواسطة التجارب) للمجال المغناطيسي عند نقطة محددة في الفراغ. هذا يعني ان المجال المغناطيسي يعرف بدلالة القوة المؤثرة على جسيم مشحون متحرك.



الشكل 4.1 (a) اتجاه القوة المغناطيسية $\vec{F}_B$ المؤثرة على جسيم مشحون متحرك بسرعة $\vec{v}$ في وجود مجال مغناطيسي $\vec{B}$. (b) القوى المغناطيسية على شحنة موجبة وشحنة سالبة. الخطوط المتقطعة تبين مسار الجسيمات تحت الدراسة والتي سوف نوضحها في الفصل القادم 2.1.

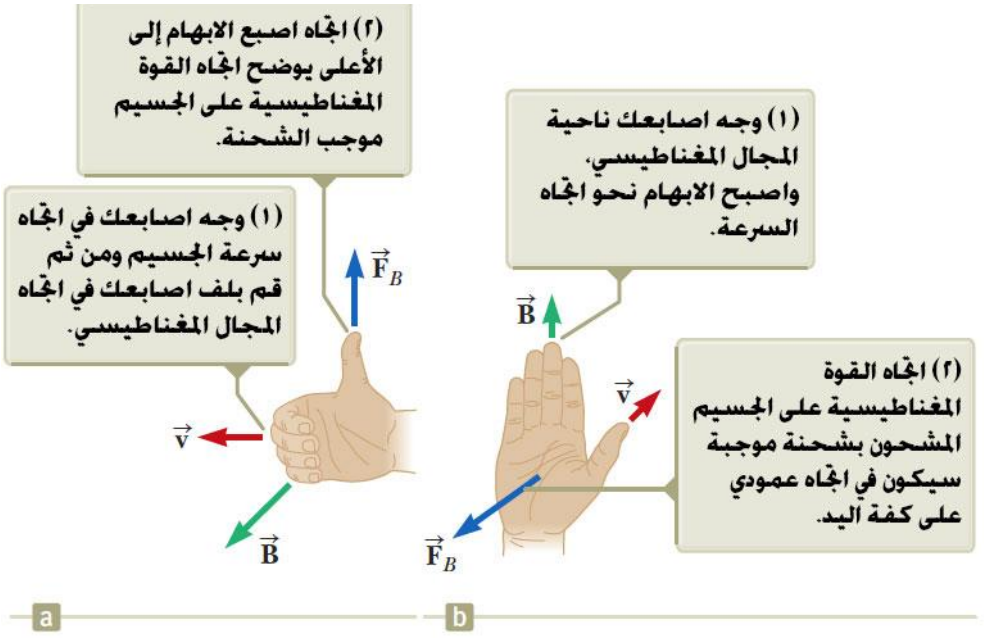
الشكل 5.1 يوضح قواعد اليد اليمنى المستخدمة لتحديد اتجاه الضرب الاتجاهي $\vec{v} \times \vec{B}$ وتحديد اتجاه القوة المغناطيسية $\vec{F}_B$. القاعدة في الشكل 5.1 a تعتمد على اليد اليمنى للضرب الاتجاهي حيث تشير الأربعة أصابع لليد اليمنى إلى اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{B}$، اما اصبع الابهام الممدود الذي يكون عموديا على باقي الأصابع يشير اتجاه $\vec{v} \times \vec{B}$. حيث ان $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$، و$\vec{F}_B$ تكون في اتجاه اصبع الابهام اذا كانت الشحنة q موجبة وتكون في عكس اتجاه اصبع الابهام اذا كانت الشحنة q سالبة.

القاعدة البديلة موضحة في الشكل 5.1 b. هنا يشير اصبع الابهام إلى اتجاه السرعة $\vec{v}$ وتشير الأصابع الممدودة إلى اتجاه المجال $\vec{B}$. الان متجه القوة $\vec{F}_B$ على الشحنة الموجبة يكون متجها إلى الخارج من الكف. الميزة لهذه القاعدة هي ان القوة المؤثرة على الشحنة في اتجاه دفع شيء ما بيدك إلى الخارج من كفك. القوة المؤثرة على الشحنة السالبة تكون في عكس الاتجاه. يمكنك ان تستخدم أي من هاتين القاعدتين.

مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة على الجسيم المشحون هي

$$F_B = |q|vB \sin\theta \qquad (1.2)$$

حيث ان الزاوية θ هي اصغر زاوية بين $\vec{v}$ و$\vec{B}$. من هذه المعادلة نرى ان القوة F_B تكون مساوية للصفر عندما $\vec{v}$ تكون موازية أو في عكس اتجاه $\vec{v}$ (عندما تكون θ تساوي صفر او 180^o) واقصى قيمة لها عندما تكون $\vec{v}$ عمودية على $\vec{B}$ (عندما تكون $\theta = 90^o$).



الشكل 5.1 قاعدتين لليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ المؤثرة على جسيم يحمل شحنة q ويتحرك بسرعة $\vec{v}$ في مجال مغناطيسي $\vec{B}$. (a) في هذه القاعدة يكون اتجاه القوة المغناطيسية في اتجاه اصبع الابهام. (b) في هذه القاعدة يكون اتجاه القوة المغناطيسية في تجاه الكف كما لو كنت تدفع جسيم بيدك.

الجدول 1.1 بعد قيم المجال المغناطيسي

مصدر المجال المغناطيسي	مقدار المجال (T)
مختبر به مغناطيس قوي من الموصلات الفائقة	30
مختبر به مغناطيس قوي من مواد عادية	2
وحدة طبية للتصوير بالرنين المغناطيسي	1.5
ساق مغناطيسية	10^{-2}
سطح الشمس	10^{-2}
سطح الأرض	0.5×10^{-4}
داخل دماغ الانسان (نتيجة للنبضات العصبية)	10^{-13}

الفروقات الأساسية بين القوة الكهربية والمغناطيسية

- متجه القوة الكهربية يكون في اتجاه خطوط المجال الكهربي، بينما متجه القوة المغناطيسية يكون عموديا على المجال المغناطيسي.
- تؤثر القوة الكهربية على الجسيم المشحون بغض النظر اذا كان الجسيم ساكنا او متحركا، بينما القوة المغناطيسية تؤثر على الجسيم المشحون فقط عندما يكون متحركا.
- تبذل القوة الكهربية شغلا في إزاحة الجسيم المشحون، بينما القوة المغناطيسية المرتبطة مع مجال مغناطيسي مستقر لا تبذل شغلا عندما يتحرك الجسيم لان القوة المغناطيسية عمودية على اتجاه الازاحة.

من الجملة الأخيرة ومن نظرية الطاقة الحركية والشغل، نستنتج ان الطاقة الحركية للجسيم المشحون المتحرك خلال مجالا مغناطيسيا لا يمكن ان يتغير بواسطة المجال المغناطيسي فقط. يغير المجال اتجاه متجه السرعة ولكن لا يغير سرعة او طاقة حركة الجسيم.

من المعادلة 2.1 نستنتج ان وحدة المجال المغناطيسي هي نيوتن لكل كولوم في متر لكل ثانية وتعرف هذه الوحدة بالتسلا tesla ويرمز لها بالرمز T:

$$1\ \mathrm{T} = 1\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C.\,m/s}}$$

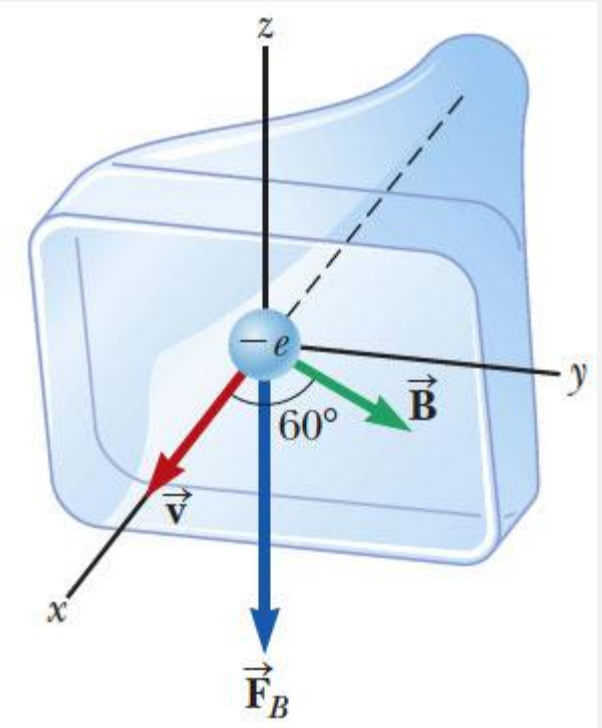
حيث ان الكولوم لكل ثانية هي الامبير فان

$$1\ \mathrm{T} = 1\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A.\,m}}$$

كما يوجد وحدة أخرى للمجال المغناطيسي هي وحدة الجاوس *gauss* ويرمز لها بالرمز G وهي ترتبط بوحدة التسلا من خلال العلاقة $1\ \mathrm{T} = 10^4\ \mathrm{G}$. في الجدول 1.1 بعض قيم المجال المغناطيسي لمصادر مختلفة.

مثال 1.1 الكترون يتحرك في مجال مغناطيسي
An Electron Moving in a Magnetic Field

الكترون في تلفزيون اشعة المهبط يتحرك في اتجاه الشاشة الامامية بسرعة مقدارها 8.0×10^6 m/s على امتداد المحور x كما هو موضح في الشكل 6.1. يحيط بمؤخرة انبوبة المهبط ملفات تنتج مجال مغناطيسي مقداره 0.025 T، في اتجاه يصنع زاوية مقدارها 60^o بالنسبة لمحور x ويقع في المستوى xy. احسب القوة المغناطيسية المؤثرة على الالكترون.



الشكل 6.1 القوة المغناطيسية $\vec{F}_B$ المؤثرة على الالكترون في اتجاه محور z السالب عندما يقع كلا من متجه السرعة $\vec{v}$ ومتجه المجال المغناطيسي $\vec{B}$ في المستوى xy.

الحل

تصور المسألة: تذكر ان القوة المغناطيسية المؤثرة على جسيم مشحون تكون عمودية على المستوى الذي يحتوي على كلا من متجه السرعة ومتجه المجال المغناطيسي. استخدم أي

من قواعد اليد اليمنى في الشكل 5.1 لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على الالكترون وستجد انها تتجه نحو الأسفل كما هو موضح في الشكل 6.1.

تصنيف المسألة: نحسب القوة المغناطيسية باستخدام المعادلة 2.1 ولهذا نعتبر ان هذا المثال هو مسألة تعويض مباشر.

باستخدام المعادلة 2.1 لايجاد مقدار القوة الغناطيسية:

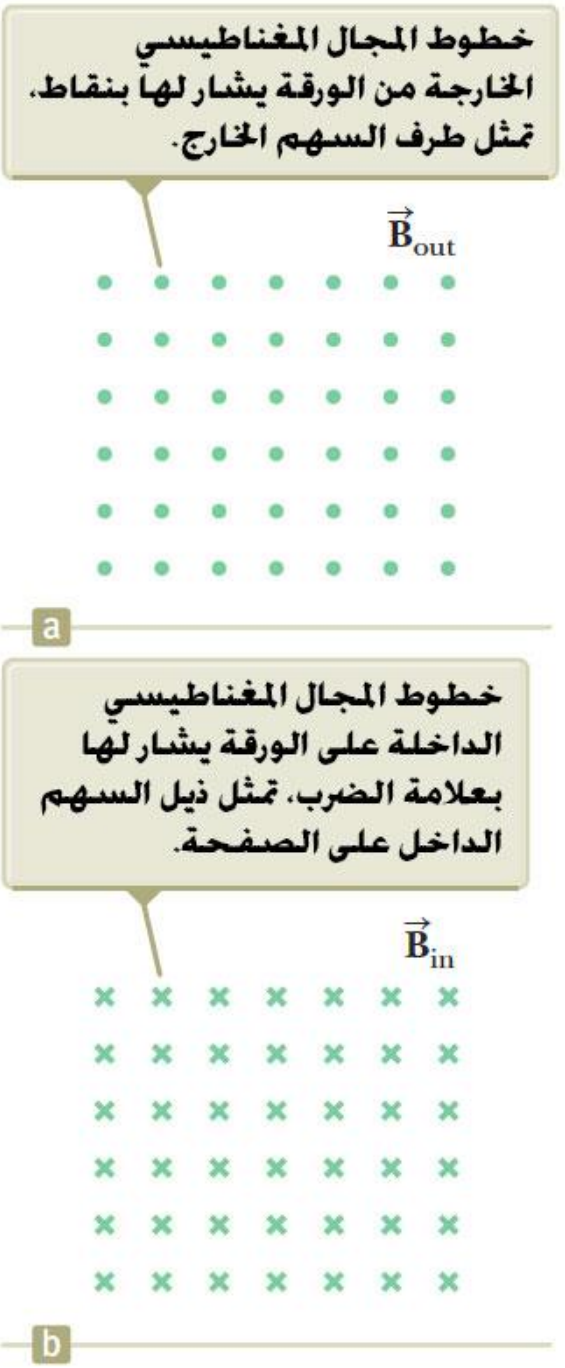
$$F_B = |q|vB \sin\theta$$

$$FB = (1.6\times10^{-19}C)(8.0\times10^{6}m/s)(0.025T)(\sin 60^{o})$$

$$= 2.8\times10^{-14}\ N$$

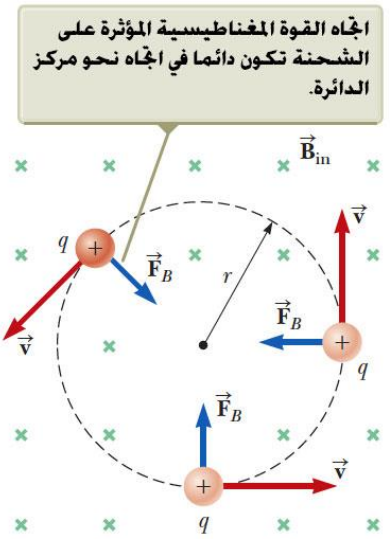
2.1 حركة جسيم مشحون في مجال كهربي منتظم
Motion of a Charged Particle in a Uniform Magnetic Field

قبل ان نستمر في مناقشتنا سوف نقدم تفسيرا للرموز المستخدمة في هذا الكتاب. لاشارة إلى اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{B}$ سوف نستخدم في بعض الأحيان الابعاد الثلاثية كما هو موضح في الشكل 6.1. اذا كان المجال المغناطيسي $\vec{B}$ يقع في مستوى الصفحة او عموديا على مستوى الصفحة، سوف نستخدم متجهات باللون الأخضر او الخطوط مجال خضراء موضح عليها اتجاه المجال برؤوس اسهم. اما اذا كان الرسم التوضيحي يستخدم بعدين فقط فاننا نقوم برسم المجال المغناطيسي العمودي الخارج من الصفحة في صورة نقاط خضراء، وهذه تمثل رؤوس الأسهم الخارجة من الصفحة في اتجاه نظرك كما هو موضح في الشكل 7.1 a. في هذه الحالة نشير إلى المجال المغناطيسي بـ $\vec{B}_{out}$. اذا كان المجال المغناطيسي $\vec{B}$ عموديا على الصفحة وفي اتجاه الدخول عليها فاننا نستخدم إشارات ضرب × خضراء اللون والتي تمثل ذيل الأسهم المبتعدة عنك كما هو موضح في الشكل 7.1 b في هذه الحالة يشار إلى المجال المغناطيسي بـ $\vec{B}_{in}$. يستخدم نفس هذا الترميز لاي كمية فيزيائية أخرى قد تكون عمودية على الصفحة مثل اتجاه القوة او اتجاه التيار.



الشكل 7.1 تمثيل خطوط المجال المغناطيسي العمودية على الصفحة.

وجدنا في الفصل 1.1 ان الشغل المبذول بواسطة قوة مغناطيسية على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي عموي على سرعة الجسيم يساوي صفرا. الان افترض حالة خاصة لجسيم مشحون بشحنة موجبة يتحرك في مجال مغناطيسي بسرعة ابتدائية لها اتجاه عمودية على المجال المغناطيسي. افترض ان اتجاه المجال المغناطيسي عموديا على الصفحة وفي اتجاه الدخول عليها كما هو موضح في الشكل 8.1. مع قيام الجسيم بتغير اتجاه سرعته كاستجابة للقوة المغناطيسية، تبقى القوة المغناطيسية عمودية على السرعة. يوضح الشكل 8.1 جسيم يتحرك في مسار دائري في مستوى عمودي على المجال المغناطيسي. بالرغم من ان المغناطيسية والقوى المغناطيسية قد تكون جديدة عليك وغير مؤلوفة لك حتى الان سوف نرى ان التأثير المغناطيسي الناتج في شيء مألوف لنا: حركة جسيم في مسار دائري منتظم!



الشكل 8.1 عندما تكون سرعة جسيم مشحون عمودية على مجال مغناطيسي منتظم، فان الجسيم يتحرك في مسار دائري في مستوى عمودي على المجال المغناطيسي $\vec{B}$.

يتحرك الجسيم في مسار دائري لان القوة المغناطيسية $\vec{F}_B$ تكون عمودية على كلا من $\vec{v}$ و$\vec{B}$ ولها قيمة ثابتة وتساوي qvB. كما هو موضح في الشكل 8.1 يكون الدوران في عكس عقارب الساعة للشحنة الموجبة في مجال مغناطيسي متجها نحو الصفحة. اما اذا كانت الشحنة q سالبة فان اتجاه الدروان يكون مع عقارب الساعة. سوف نستخدم نموذج جسيم يتحرك تحت تأثير قوة ثابتة لكتابة قانون نيوتن الثاني للجسيم على النحو التالي:

$$\sum F = F_B = ma$$

حيث ان الجسيم يتحرك في مسار دائري فاننا يمكننا ان نستخدم نموذج جسيم يتحرك في مسار دائري ونستبدل التسارع بالتسارع المركزي على النحو التالي:

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

من هذه المعادلة نستنتج معادلة نصف قطر المسار الدائري على النحو التالي:

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (1.3)$$

هذا يعنى ان نصف قطر المسار يتناسب طرديا مع كمية الحركة الخطية mv للجسيم ويتناسب عكسيا مع مقدار الشحنة على الجسيم وكذلك يتنسب عكسيا مع مقدار المجال المغناطيسي. السرعة الزاوية للجسيم هي السرعة على نصف القطر وتعطى على النحو التالي:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \qquad (1.4)$$

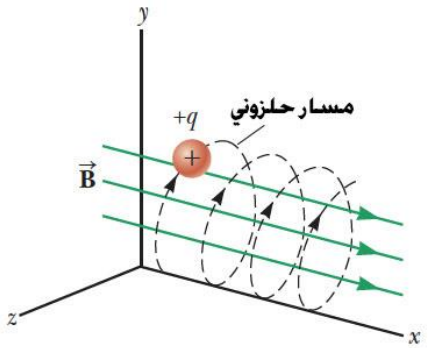
الزمن الدوري للحركة (أي الفترة الزمنية اللازمة للجسيم لاكمال دورة واحدة) تساوي محيط الدائرة مقسوما على سرعة الجسيم.

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \qquad (1.5)$$

تبين هذه النتيجة ان السرعة الزاوية للجسيم والزمن الدوري للحركة الدائرية لا تعتمد على سرعة الجسيم او نصف قطر المدار. السرعة الزاوية ω في الاغلب تعرف باسم تردد المعجل الدرواين او تردد السيكلوترون *cyclotron ferquency* لان الجسيم المشحون يدور عند هذا التردد الزاوي بنفس طريقة نوع من المعجلات يعرف باسم السيكلوترون والذي سوف نتحدث عنه في الفصل 3.1.

اذا تحرك الجسيم المشحون في مجال مغناطيسي منتظم بسرعة عند زاوية ما بالنسبة للمجال

المغناطيسي $\vec{B}$، فان مساره سيكون حلزوني. على سبيل المثال اذا كان اتجاه المجال في اتجاه محور x كما هو موضح في الشكل 9.1، فانه لا يكون هناك مركبة للقوة في اتجاه x. نتيجة لذلك فان $a_x = 0$ والمركبة x للسرعة تبقى ثابتة. يتسبب مقدار القوة المغناطيسية $q\vec{v} \times \vec{B}$ في تغير مركبات السرعة v_y وv_z مع الزمن، ولكن محصلة الحركة في النهاية تكون حلزونية محورها يوازي المجال المغناطيسي. مسقط المسار على المستوى yz (عند النظر له على امتداد المحور x) يكون دائريا. يمكن استخدام المعادلات 3.1 حتى 3.5 مع استبدال v بـ $v_\perp = \sqrt{{v_y}^2 + {v_z}^2}$.



الشكل 9.1 جسيم مشحون يمتلك متجه سرعة له مركبة توازي المجال المغناطيسي المنتظم يتحرك في مسار حلزوني.

سؤال للتفكير 2.1

جسيم مشحون يتحرك عموديا على مجال مغناطيسي في مسار دائري نصف قطره r. (i) يدخل جسيم مماثل المجال بسرعة $\vec{v}$ عموديا على $\vec{B}$ ولكن بسرعة اعلى من سرعة الجسيم الأول. بالمقارنة مع نصف قطر المسار الدائري للجسيم الأول، هل نصف قطر المسار الدائري للجسيم الثاني (a) اصغر، (b) اكبر (c) يساوي نصف قطر المسار الأول؟ (ii) مقدار المجال المغناطيسي يزداد. من نفس الخيارات قارن نصف قطر المسار الدائري الجديد للجسيم الأول مع نصف قطر مساره الابتدائي.

مثال 2.1 بروتون يتحرك عموديا على مجال مغناطيسي منتظم
A Proton Moving Perpendicular to a Uniform Magnetic Field

يتحرك بروتون في مسار دائري نصف قطرها 14 cm في مجال مغناطيسي منتظم 0.35 T عموديا على سرعة البروتون. اوجد سرعة البروتون.

الحل

تصور المسألة: من مناقشتنا في هذا الفصل نعلم ان البروتون يتبع مسار دائري عندما يتحرك عموديا على مجال مغناطيسي منتظم.

تصنيف المسألة: نحسب سرعة البروتون باستخدام المعادلة التي قمنا باشتقاقها في هذا الفصل، لذا فاننا نصنف هذا المثال على انه مسألة تعويض مباشر.

بحل المعادلة 3.1 بالنسبة لسرعة الجسيم:

$$v = \frac{qBr}{m_P}$$

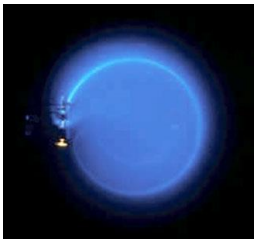
بالتعويض عن بالقيم المعطاة في المثال نحصل على ما يلي:

$$v = \frac{(1.60 \times 10^{-19}C)(0.35T)(0.14m)}{1.67 \times 10^{-27}kg}$$
$$= 4.7 \times 10^{6}m/s$$

ماذا لو؟ ماذا لو كان الكترون بدلا من بروتون هو الذي يتحرك في اتجاه عمودي على نفس المجال المغناطيسي بنفس السرعة؟ هل سوف يكون نصف قطر المسار الدائري مختلفا؟

الإجابة: يمتلك الالكترون كتلة اصغر بكثير من كتلة البروتون لذا فان المجال المغناطيسي سوف يكون قادرا على تغير سرعته بشكل اكبر من البروتون. لهذا فاننا نتوقع ان يكون نصف القطر اصغر. توضح المعادلة 3.1 ان نصف القطر r يتناسب طرديا مع m عندما تكون كلا من q وB وv للالكترون لها نفس القيم للبروتون. وعليه نستنتج ان نصف القطر سيكون اصغر بمعدل يتناسب مع نسبة الكتل m_e/m_P.

مثال 3.1 انحراف شعاع الكتروني Bending an Electron Beam



الشكل 10.1 انحراف شعاع الكتروني في مجال مغناطيسي

في التجربة التي صممت لقياس مقدار المجال المغناطيسي المنتظم، تم تعجيل الكترونات من السكون من خلال فرق جهد مقداره 350 V ومن ثم تدخل المجال المغناطيسي الذي يكون عموديا على متجه سرعة الالكترونات. تنتقل الالكترونات على امتداد مسار منحني لان المجال المغناطيسي يبذل قوة عليها كما هو موضح في الشكل 10.1، ونصف قطر المسار يساوي 7.5 cm. (A) ما مقدار المجال المغناطيسي؟

الحل

تصور المسألة: يتضمن هذا المثال الكترونات تتسارع من السكون بسبب القوة الكهربي ومن ثم تتحرك في مسار دائري بسبب القوة المغناطيسية. بمساعدة الشكل 8.1 والشكل 10.1 يمكن تصور الحركة الدائرية للالكترونات.

تصنيف المسألة: المعادلة 3.1 تبين اننا نحتاج إلى استخدام سرعة الالكترونات v لايجاد مقدر المجال المغناطيسي. وعليه يجب ان نحسب سرعة الالكترونات بالاعتماد على فرق جهد التعجيل . للقيام بذلك نصنف الجزء الأول من المسألة على انها نظام الكترون ومجال كهربي معزول. بمجرد ان يدخل الالكترون المجال المغناطيسي فاننا نصنف الجزء الثاني من المسألة على انها مسألة تعويض مباشر.

تحليل المسألة: بكتابة معادلة الحفاظ على الطاقة لنظام الالكترون والمجال الكهربي

$$\Delta K + \Delta U = 0$$

بالتعويض عن القيم الابتدائية والنهائية للطاقات نحصل على

$$(1/2\ m_e v^2 - 0) + (q\Delta V) = 0$$

بالحل بالنسبة لسرعة الالكترون نحصل على

$$v = \sqrt{\frac{-2q\Delta V}{m_e}}$$

بالتعويض بالقيم العددية نحصل على

$$v = \sqrt{\frac{-2(-1.60 \times 10^{-19}\text{C})(350\text{V})}{9.11 \times 10^{-31}\text{kg}}} = 1.11 \times 10^{7}\text{m/s}$$

الان تخيل ان الالكترون يدخل المجال المغناطيسي بهذه السرعة. بحل المعادلة 3.1 لايجاد مقدار المجال المغناطيسي

$$B = \frac{m_e v}{er}$$

بالتعويض عن القيم العددية

$$B = \frac{(9.11 \times 10^{-31}\text{kg})(1.11 \times 10^{7}\text{m/s})}{(1.60 \times 10^{-19}\text{C})(0.075\text{m})} = 8.4 \times 10^{-4}\text{T}$$

(B) ما مقدار السرعة الزاوية للالكترون؟

الحل

باستخدام معادلة السرعة الزاوية

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{1.11 \times 10^{7}\text{m/s}}{0.075\text{m}} = 1.5 \times 10^{8}\text{rad/s}$$

الخلاصة: تمثل السرعة الزاوية عدد من الدورات في الثانية يساوي

$$\omega=(1.5\times10^{8}\text{ rad/s})(1\text{ rev}/2\pi\text{ rad}) = 2.4\times10^{7}\text{ rev/s}$$

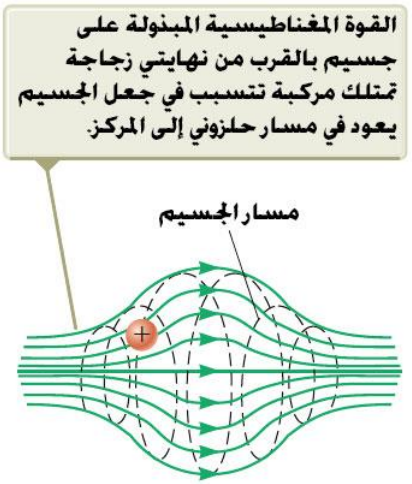
أي ان الالكترون يقوم بـ 24 مليون دورة في الثانية!. هذه النتيجة تتفق تماما مع النتيجة التي حصلنا عليها من الجزء (A).

ماذا لو؟ اذا ازداد فرق جهد التعجيل إلى 400 V؟ كيف سوف يؤثر هذا على السرعة

الزاوية للالكترونات، افترض ان المجال المغناطيسي يبقى ثابتا؟

الإجابة: الزيادة في فرق جهد التعجيل تتسبب في دخول الالكترونات المجال المغناطيسي بسرعة اعلى. هذه السرعة الأعلى تتسبب في انها تتحرك في مسار دائري بنصف قطر اعلى. السرعة الزاوية هي النسبة بين السرعة ونصف القطر، وحيث ان كلا من السرعة ونصف القطر يزدادان فان النسبة تبقى ثابتة وعليه فان السرعة الزاوية تبقى نفسها بدون تغير.

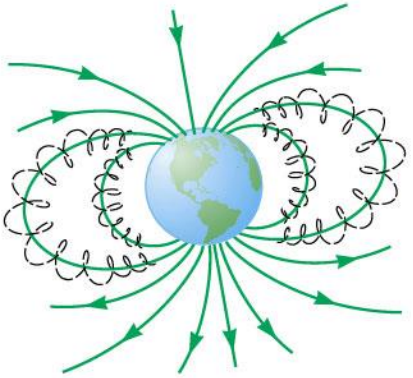
عندما تتحرك جسيمات مشحونة في مجال مغناطيسي غير منتظم، فان الحركة تكون معقدة. على سبيل المثال في مجال مغناطيسي يكون قويا عند طرفيه وضعيفا في الوسط كما هو موضح في الشكل 11.1، فان الجسيمات يمكن ان تتذبذب بين موضعين. يبدأ الجسيم المشحون عند احد الطرفين ويتحرك في حركة حلزونية عيل امتداد خطوط المجال حتى يصل إلى الطرف الثاني، بينما يعكس مساره ويعود إلى الطرف الأول بحركة حلزونية. هذا الشكل يعرف باسم الزجاجة المغناطيسية *magnetic bottle* لحصر البلازما وتقييدها، والبلازما هي غاز مكون من ايونات والكترونات. مخطط حصر البلازما هذا يحقق قاعدة هامة في تجارب التحكم في الاندماج النووي، العلمية التي يأمل العلماء ان توفر لنا طاقة غير منتهية في المستقبل.



الشكل 11.1 جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي غير منتظم (الزجاج المغناطيسية) في مسار حلزوني حول المجال ويتذبذب بين طرفين.

لسوء الحظ فان الزجاجة المغناطيسية لها بعض المشاكل. اذا كان هناك عدد كبير من الجسيمات محصورا، فان التصادمات بينهم سوف تتسبب في تسرب هذه الجسيمات خارج النظام.

تتكون احزمة فان ألن Van Allen الاشعاعية من جسيمات مشحونة (في الاغلب من الالكترونات والبروتونات) تحيط بالكرة الأرضية في صورة شكل الكعكة كما هو موضح في الشكل 12.1. الجسيمات المحصورة في المجال المغناطيسي الغير منتظم للأرض تدور في شكل حلزوني حول خطوط المجال من قطب إلى القطب الاخر، وتغطي المسافة في ثواني معدودة. تنشأ هذه الجسيمات بالأساس من الشمس ولكن بعضها يأتي من النجوم او الاجسام الثقيلة الأخرى. لهذا السبب فان الجسيمات تعرف باسم الأشعة الكونية *cosmic rays*.



الشكل 12.1 احزمة فان الين Van Allen مصنوعة من جسيمات مشحونة محصورة في مجال الأرض المغناطيسي الغير منتظم. خطوط المجال المغناطيسي موضحة باللون الأخضر ومسارات الجسيمات موضحة بالخطوط السوداء المنقطة.

معظم الأشعة الكونية تنحرف بواسطة المجال المغناطيسي الأرضي ولا يمكن ان تصل إلى الغلاف الجوي. بعض الجسيمات تصبح محصورة ولكن هذه الجسيمات تصنع احزمة فان الن Van Allen الاشعاعية. عندما تصبح الجسيمات فوق احد القطبين فانها في بعض الأحيان تتصادم مع ذرات الغلاف الجوي وتسبب في ابنعاث ضوء مرئي. مثل هذه التصادمات تنتج الشفق القطبي *aurora borealis* الجميل المنظر، او الأضواء الشمالية في نصف الكرة الشمالي والشفق القطبي في نصف الكرة الجنوبي. يكون الشفق القطبي في العادة محصورة في المناطق القطبية بسبب ان احزمة فان ألن الاشعاعية تكون قريبة من سطح الأرض في تلك النقاط. في بعض الأحيان يتسبب النشاط الشمسي في دخول اعداد كبيرة من الجسيمات المشحونة إلى الاحزمة الاشعاعية وهذا يؤدي إلى تشويش خطوط المجال المغناطيسي الطبيعية المرتبطة بالكرة الأرضية. في هذه الحالات فان الشفق القطبي يمكن ان يشاهد عند ارتفاعات منخفضة.

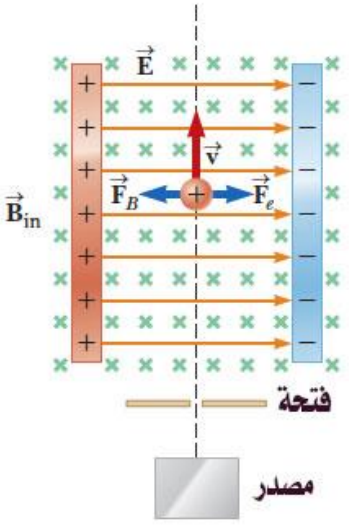
3.1 تطبيقات متعلقة في جسيمات مشحونة تتحرك في مجال مغناطيسي
Applications Involving charged Particles Moving in a Magnetic Field

شحنة تتحرك بسرعة v في وجود كلا من مجال كهربي $\vec{E}$ ومجال مغناطيسي $\vec{B}$ تتعرض لقوة كهربية $q\vec{E}$ وقوة مغناطيسية $q\vec{v} \times \vec{B}$. القوة الكلية (تعرف باسم قوة لورنتز Lorentz force) المؤثرة على الشحنة هي

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \qquad (1.6)$$

مرشح السرعة Velocity Selector

في العديد من التجارب التي تشتمل على حركة جسيمات مشحونة، فانه من المهم ان تكون هذه الجسيمات لها نفس السرعة، هذا يمكن ان يتحقق بتطبيق مجال كهربي ومجال مغناطيسي في الاتجاهات الموضحة في الشكل 13.1. يوجه مجال كهربي منتظم إلى اليمين كما هو موضح في الشكل 13.1)، وبتطبيق مجال مغناطيسي منتظم في اتجاه عمودي على المجال المغناطيسي (داخل على الصفحة في الشكل 13.1). اذا كانت q موجبة والسرعة v إلى الأعلى، فان اتجاه القوة المغناطيسية $q\vec{v} \times \vec{B}$ سوف يكون إلى اليسار واتجاه القوة الكهربية $q\vec{E}$ سيكون إلى اليمين. عندما يتم اختيار كلا من مقدار المجال الكهربي ومقدار المجال المغناطيسي بحيث يجعل كلا من القوة الكهربية مساوية للقوة المغناطيسية أي ان $qE = qvB$، فانه يمكن اعتبار ان الجسيم المشحون كجسيم في حالة اتزان ويتحرك في خط رأسي مستقيم خلال منطقة المجالين. من الصيغة $qE = qvB$، ومنها نحصل على



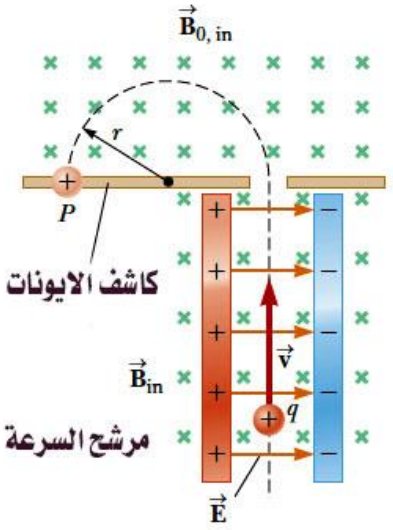
الشكل 13.1 مرشح السرعة. يتحرك جسيم موجب الشحنة بسرعة $\vec{v}$ في وجود مجال مغناطيسي في اتجاه الدخول على الصفحة ومجال كهربي متجها إلى اليمين، فانه يتعرض إلى قوة كهربية $q\vec{E}$ إلى اليمين

$$v = \frac{E}{B} \qquad (1.7)$$

نلاحظ هنا ان الجسيمات التي تمتلك هذه السرعة فقط هي التي تمر بدون انحراف من خلال المجالين المتعامدين الكهربي والمغناطيسي. القوة المغناطيسية المبذولة على جسيمات متحركة بسرعات اعلى من ذلك تكون اعلى من القوة الكهربية، والجسيمات في هذه الحالة تنحرف إلى اليسار. اما الجسيمات المتحركة بسرعة اقل من تلك السرعة تنحرف إلى اليمين. وبهذه الطريقة نحصل على شعاع من الجسيمات التي تتحرك بسرعة واحدة هي v ويمكن تغير قيمة هذه السرعة بالتحكم في شدة المجال الكهربي والمجال المغناطيسي.

مطياف الكتلة The Mass Spectrometer

يعمل مطياف الكتلة على فصل الايونات حسب نسبة كتلتها إلى شحنتها. في جهاز مطياف الكتلة يمر شعاع من الايونات من مرشح السرعة أولا لنحصل على جسيمات لها نفس السرعة v ومن ثم تدخل هذه الجسيمات في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{B}_0$ له نفس اتجاه المجال المغناطيسي في مرشح السرعة كما هو موضح في الشكل 14.1. مع دخول المجال المغناطيسي الثاني، تتحرك الايونات في نصف دائرة نصف قطرها r قبل ان تصل إلى كاشف عند P. اذا كانت الايونات موجبة الشحنة فان الشعاع ينحرف إلى اليسار كما هو موضح في الشكل 14.1. اما اذا كانت الايونات سالبة الشحنة فان الشعاع ينحرف إلى اليمين. من المعادلة 3.1 يمكن ان نعبر عن النسبة m/q على



الشكل 14.1 مطياف الكتلة. ترسل جسيمات مشحونة بشحنة موجبة في البداية من خلال مرشح السرعة ومن ثم تدخل منطقة يتسبب فيها مجال مغناطيسي $\vec{B}_0$ إلى حركة الجسيمات في مسار نصف دائري وتصطدم بالكاشف عند النقطة P.

النحو التالي:

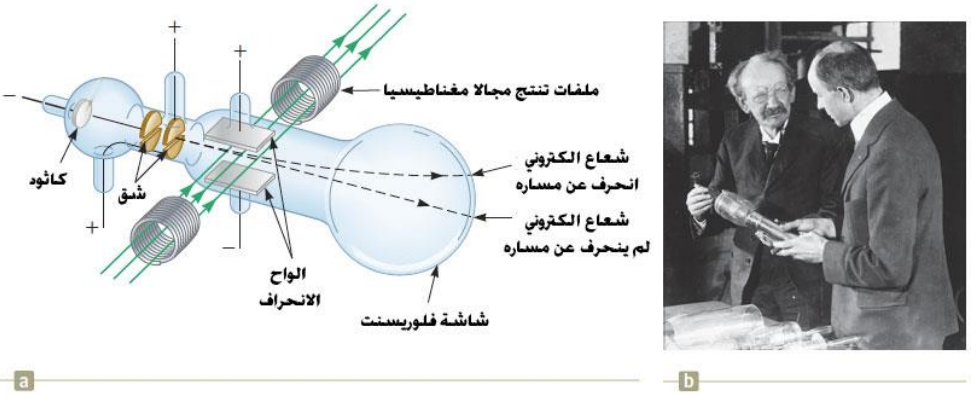
$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v}$$

باستخدام المعادلة 7.1 نحصل على

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0B}{E}$$

لهذا، يمكن حساب النسبة m/q بقياس نصف قطر التحدب وبمعرفة كلا من B وB_0 وE. عمليا يتم قياس الكتل للعديد من نظائر الايونات، بايونات تحمل نفس الشحنة q. بهذه الطريقة يمكن تحديد نسب الكتل حتى لو كانت q مجهولة.

قام العالم طومسون Thomson (1856 – 1940) في العام 1897 لقياس نسبة e/m_e للالكترونات. يوضح الشكل 15.1 a الأدوات التي استخدمها طومسون. تعجل الالكترونات من الكاثود وتمر خلال شقين. تنجرف الالكترونات في منطقة يكون فيها المجال الكهربي والمجال المغناطيسي متعامدين. يتم في البداية ضبط مقدار المجالين للحصول على شعاع غير منحرف يسجل على شاشة فلوريسنت. من حجم الانحراف والقيم المقاسة E وB، يمكن تحديد نسبة الشحنة إلى الكتلة. النتائج التي تم الحصول عليها من هذه التجربة تمثل اكتشاف الالكترون كجسيم أولي.

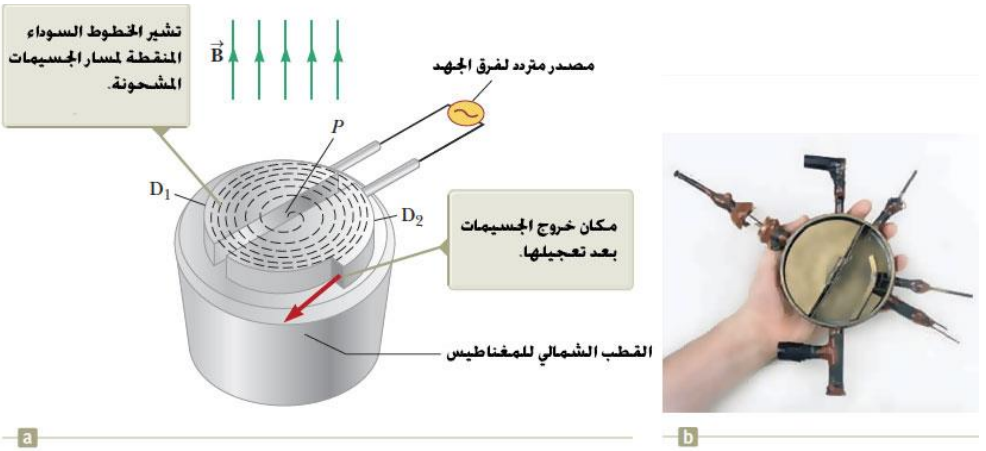


الشكل 15.1 (a) أدوات طومسون لقياس النسبة e/m_e. (b) العالم طومسون إلى اليسار في مختبر كافيندش بجامعة كامبردج. وعلى اليمين العالم فرانك بالدوين جيوت Frank Baldwin Jewtt.

المعجل الدوراني السيكلترون The Cyclotron

المعجل الدوراني او السيكلترون هو عبارة عن جهاز يعمل على تعجيل الجسيمات المشحونة إلى سرعات عالية جدا. تستخدم الجسيمات المعجلة الناتجة في التصادم مع انوية الذرات لاحداث تفاعلات نووية هامة للمجال البحثي. كما تستخدم العديد من المستشفيات أجهزة السيكلترون في انتاج مواد مشعة للتشخيص والعلاج.

يقوم المجال الكهربي والمجال المغناطيسي بدور هام في فكرة عمل السيكلترون. يوضح الشكل 16.1 a مخطط يشرح فكرة عمل السيكلترون. تتحرك الشحنات في داخل حاويتين نصف دائريتين لها شكل حرف D ولهذا يطلق عليها اسم D_1 لنصف الدائرة الأولى واسم D_2 لنصف الدائرة الثانية. يطبق فرق جهد ذو تردد عالي على نصفي الدائرتين D_1 وD_2 في وجود مجال مغناطيسي منتظم عمودي عليهما. عند وجود ايون عند النقطة P بالقرب من مركز المغناطيس في احد نصفي الدائرتين وليكن عند D_1 فان الايون يتحرك في مسار نصف دائري والموضح بالخط الأسود المنقط في الشكل 16.1 a، وعندما يصل الايون إلى الفراغ بين نصفي الدائرتين يكون قد استغرق فترة زمنية مقدارها $T/2$ حيث ان T هو الفترة الزمنية اللازمة لعمل دورة كاملة حول نصفي الدائرتين والتي تعطى بالمعادلة 5.1. يتم ضبط تردد فرق الجهد بحيث ان قطبية نصفي الدائرتين تكون معكوسة في خلال الفترة الزمنية التي ينتقل فيها الايون من احد نصفي الدائرتين إلى الأخرى. اذا تم ضبط تردد فرق الجهد بحيث يكون D_1 عند جهد كهربي اقل من D_2 بمقدار ΔV، فان الايون يتسارع عبر الفراغ إلى D_1 وتزداد طاقة حركته بمقدار $q\Delta V$. بعد ذلك يتحرك الايون حول D_1 في مسار نصف دائري نصف قطره اكبر لان سرعة الايون قد ازدادت. بعد مرور فترة زمنية قدرها $T/2$ فان الايون يصل مرة أخرى إلى الفراغ بين نصفي الدائرتين. لحظة انقضاء هذه الفترة الزمنية تعكس القطبية على نصفي الدائرتين مرة أخرى ويتلقى الايون تعجيل اخر خلال الفراغ بينهما. تستمر الحركة بحيث انه في كل نصف دائرة يكتسب الايون طاقة حركية إضافية تساوي $q\Delta V$. عندما يصبح نصف قطر المسار مساويا تقريبا لنصف قطر الوعاء نصف الدائري فان الايونات المعجلة تترك النظام وتخرج من خلال فتحة الخروج.



الشكل 16.1 (a) يحتوي السيكلترون على مصدر ايوني عند النقطة P، وقطعتين على شكل حرف D هما D_1 وD_2 مطبق عليهما فرق جهد متناوب، ومجال مغناطيسي منتظم. (b) اول سيكلترون تم اختراعه بواسطة كلا من لورنس E. O. Lawrence وليفينغستون M.S. Livingston في العام 1934.

تعتمد فكرة عمل السيكلترون على الفترة الزمنية T المستقلة عن سرعة الايون ونصف قطر المسار الدائري (انظر المعادلة 5.1).

يمكننا الحصول على صيغة رياضية لطاقة الحركة التي يكتسبها الايون عندما يخرج من السيكلترون بدلالة نصف قطر الوعاء نصف دائري R. من المعادلة 3.1 نعلم ان $v = qBR/m$ وعليه فان طاقة الحركة تكون على النحو التالي:

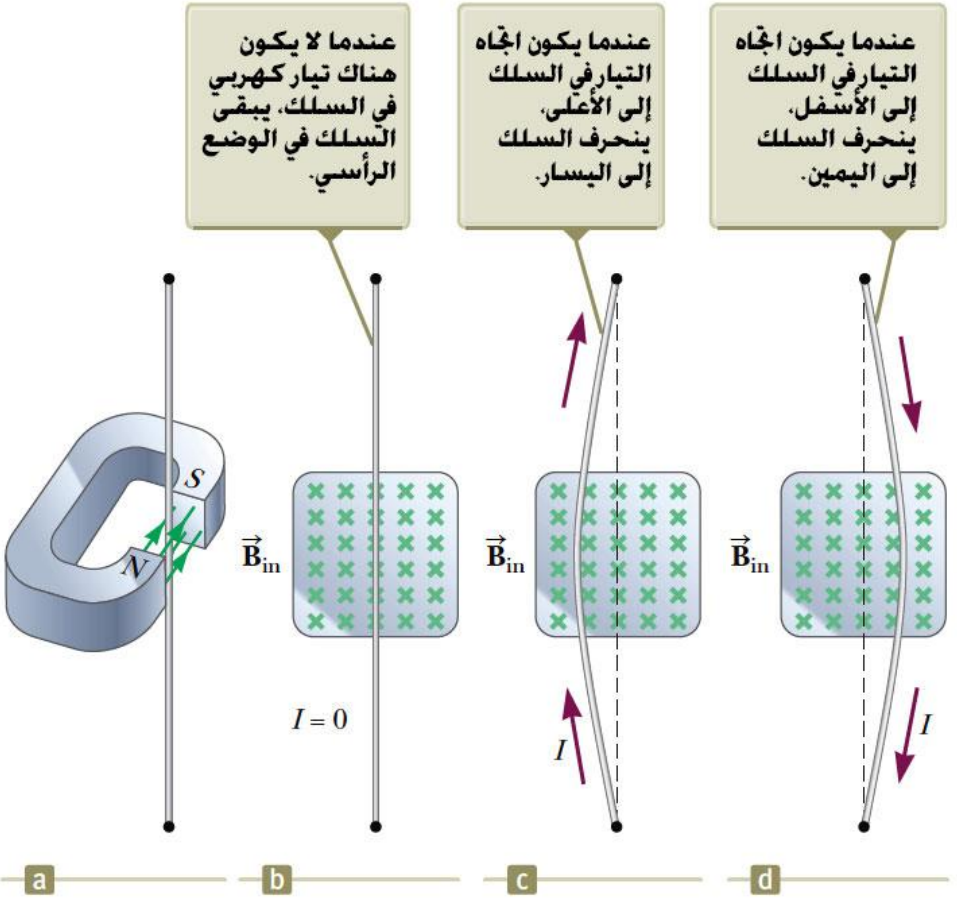
$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m} \qquad (1.9)$$

عندما تزيد طاقة الايونات في السيكلترون عن 20 MeV تقريبا فان سرعتها تصبح قريبة من الضوء وتظهر الخصائص النسبية عليها (سوف نقوم بشرح ظواهر الفيزياء النسبية في كتاب منفصل مع الفيزياء الحديثة). اثبتت الملاحظات العلمية ان T تزداد وحركة الايونات لا تبقى في نفس الطور مع فرق الجهد المطبق. بعض المعجلات تتغلب على هذه المشكلة من خلال تعديل الفترة الزمنية لفرق الجهد المطبق حتى تبقى الايونات مع فرق الجهد المطبق في نفس الطور.

ملاحظة: لا يعتبر معجل السيكلترون من المعجلات المتطورة. يعد السيكلترون من المعجلات الهامة من الناحية التاريخية لانه اول معجل جسيمات تم استخدامه للحصول على جسيمات تتحرك بسرعات كبيرة. لا يزال السيكلترون مستخدما في المستشفيات للتطبيقات الطبية ولكن معظم المعجلات المستخدمة في البحوث العلمية لا تعتمد فكرة عملها على السيكلترون. المعجلات الحديثة تعمل من خلال مبدأ مختلف وتعرف عامة باسم المعجل الدرواني التزامني او السينكروترون synchrotrons.

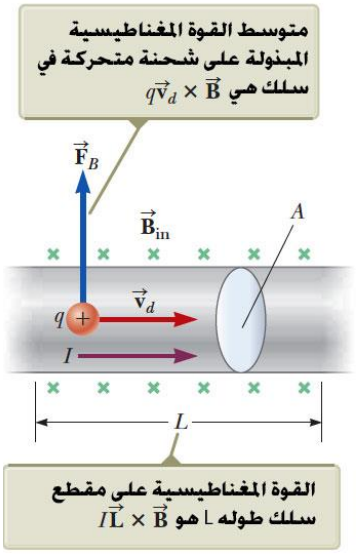
4.1 القوة المغناطيسية المؤثرة على موصل يمر فيه تيار
Magnetic Force Acting in a Current-Carrying Conductor

اذا بذلت قوة مغناطيسية على جسيم مشحون عندما يتحرك الجسيم في مجال مغناطيسي، فانه من غير المستغرب ان سلك يمر فيه تيار كهربي سوف يتعرض أيضا إلى قوة مغناطيسية عندما يوضع في مجال مغناطيسي. التيار الكهربي عبارة عن مجموعة من الجسيمات المشحونة في حالة حركة وعليه فان القوة المحصلة المبذولة بواسطة المجال المغناطيسي على السلك الذي يمر فيه تيار كهربي هي المجموع الاتجاهي لكل قوة تبذل على كل جسيم مشحون يشارك في التيار الكهربي المار في السلك. القوة المبذولة على الجسيمات تنتقل إلى السلك عندما تتصادم هذه الجسيمات مع ذرات السلك.



الشكل 17.1 (a) سلك معلق رأسيا بين قطبي مغناطيسي. (b) و(c) و(d) نفس الترتيب الموضح في (a) كما ينظر له من عند القطب الجنوبي للمغناطيس حيث ان المجال المغناطيسي في اتجاه الدخول على الصفحة (إشارات الضرب × باللون الأخضر).

يمكن توضيح القوة المغناطيسية المؤثرة على سلك موصل يمر فيه تيار كهربي من خلال تعليقه بين قطبي مجال مغناطيسي كما في الشكل 17.1 a. يكون اتجاه المجال المغناطيسي في اتجاه الدخول على الصفحة ويغطي المنطقة داخل المربعات المظللة. عندما يكون التيار المار في السلك يساوي صفرا فان السلك يبقى في وضعه الرأسي الموضح في الشكل 17.1 b. عندما يمر تيار في السلك في الاتجاه من الأسفل إلى الأعلى كما هو موضح في الشكل 17.1 c فان السلك سوف ينحرف إلى اليسار. اما اذا كان اتجاه التيار في السلك من الأعلى إلى الأسفل كما هو موضح في الشكل 17.1 d فان السلك سوف ينحرف إلى اليمين.



الشكل 19.1 مقطع من سلك يمر فيه تيار في مجال مغناطيسي $\vec{B}$.

دعنا الان نناقش ماذا يحدث بالتفصيل من خلال اعتبار ان القطة المستقيمة من السلك طولها L ومساحة مقطعها A تحمل تيار مقداره I في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{B}$ كما هو موضح في الشكل 18.1.

القوة المغناطيسية المبذولة على الشحنة q التي تتحرك بسرعة انجراف $\vec{v}_d$ هي $q\vec{v}_d \times \vec{B}$. لايجاد القوة الكلية المؤثرة على السلك، سوف نقوم بضرب القوة $q\vec{v}_d \times \vec{B}$ المبذولة على شحنة واحدة في عدد الشحنات في مقطع السلك. حيث ان حجم مقطع السلك هو AL فان عدد الشحنات في هذا المقطع سوف تكون nAL، حيث ان n هو عدد الشحنات لكل وحدة حجوم. وعليه فان القوة المغناطيسية الكلية المؤثرة على مقطع سلك طوله L هي على النحو التالي:

$$\vec{F}_B = (q\vec{v}_d \times \vec{B})nAL$$

يمكننا ان نكتب صيغة رياضية بشكل مناسب بالاستعانة بعلاقة التيار الكهربي مع سرعة انجراف الشحنات والتي هي $I = nqv_dA$. وبهذا نحصل على

$$\vec{F}_B = I\vec{L} \times \vec{B} \qquad (1.10)$$

حيث ان $\vec{L}$ هو متجه يشير في اتجاه التيار I وله مقدار يساوي طول مقطع السلك L. هذه الصيغة تنطبق فقط على سلك مستقيم في مجال مغناطيسي منتظم.

الان اعتبر سلك له شكل غير منتظم ولكن له مساحة مقطع منتظمة في مجال مغناطيسي كما هو موضح في الشكل 19.1. من المعادلة 10.1 تكون القوة المغناطيسية المبذولة على مقطع صغير له متجه طول $d\vec{s}$ في وجود مجال مغناطيسي $\vec{B}$ على النحو التالي:

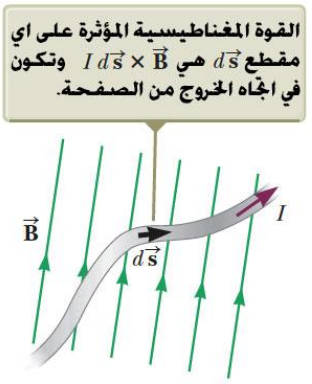
$$d\vec{F}_B = Id\vec{s} \times \vec{B} \qquad (1.11)$$

حيث ان اتجاه $d\vec{F}_B$ يكون خارجا من الصفحة لاتجاهي كلا من $\mathbf{B}$ و$d\vec{s}$ في الشكل 19.1. يمكن اعتبار المعادلة 11.1 على انها تعريف بديل للمجال المغناطيسي $\vec{B}$. أي ان يمكننا ان نعرف المجال المغناطيسي $\vec{B}$ بدلالة قوة مقاسة مبذولة على عنصر سلك يمر فيه تيار، وتكون القوة اكبر ما يمكن عندما تكون $\vec{B}$ عمودية على عنصر السلك وتساوي صفر عندما B تكون موازية لعنصر السلك.

لحساب القوة المغناطيسية الكلية $\vec{F}_B$ المؤثرة على السلك الموضح في الشكل 19.1 نقوم باجراء عملية التكامل للمعادلة 11.1 على طول السلك على النحو التالي:

$$d\vec{F}_B = I\int_a^b d\vec{s} \times \vec{B} \qquad (1.12)$$

حيث ان a وb تمثلان نقطتي البداية والنهاية للسلك. عندكا نقوم باجراء هذا التكامل فان مقدار المجال المغناطيسي واتجاه المجال الذي يصنعه مع المتجه $d\vec{s}$ يمكن تختلف من نقطة إلى نقطة على السلك.



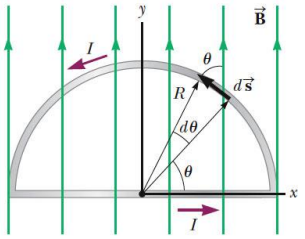
الشكل 19.1 مقطع سلك له شكل غير منتظم يمر فيه تيار كهربي I في مجال مغناطيسي $\vec{B}$ يتعرض إلى قوة مغناطيسية.

سؤال للتفكير 3.1

سلك يمر فيه تيار كهربي في مستوى هذه الصفحة في اتجاه اعلى الصفحة. يتعرض السلك إلى قوة مغناطيسية في اتجاه الحافة اليمنى للصفحة. هل اتجاه المجال المغناطيسي المتسبب في هذه القوة (a) في مستوى الصفحة وفي اتجاه الحافة اليسرى، (b) في مستوى الصفحة وفي اتجاه الحافة السفلى، (c) للاعلى وخارج من الصفحة، (d) للاسفل وداخل على الصفحة.

مثال 4.1 القوة المؤثرة على موصل نصف دائري
Force on a Semicircular Conductor

سلك على شكل نصف دائرة مغلقة نصف قطرها R يمر فيها تيار كهربي I. يقع السلك في المستوى xy، واتجاه المجال المغناطيسي على امتداد محور y الموجب كما هو موضح في الشكل. اوجد مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على الجزء المستقيم من السلك وعلى الجزء المنحني أيضا.



الشكل 20.1 **القوة المغناطيسية على الجزء المستقيم من الحلقة في اتجاه الخروج من الصفحة، والقوة المغناطيسية على الجزء المنحني في اتجاه الدخول على الصفحة.**

الحل

تصور المسألة: باستخدام قاعدة اليد اليمنى للضرب الاتجاهي، نجد ان القوة $\vec{F}_1$ المؤثرة على الجزء المستقيم من السلك تكون إلى الخارج من الصفحة والقوة $\vec{F}_2$ المؤثرة على الجزء المنحني من السلك في اتجاه الدخول على الصفحة. هل القوة $\vec{F}_2$ اكبر في المقدار من القوة $\vec{F}_1$ لان السلك المنحني أطول من الجزء المستقيم؟

تصنيف المسألة: حيث اننا نتعامل مع سلك يمر فيه تيار في وجود مجال مغناطيسي وليس جسيم مشحون، لذا علينا ان نستخدم المعادلة 12.1 لايجاد القوة الكلية المؤثرة على كلا من الجزء المستقيم والجزء المنحني من السلك.

تحليل المسألة: لاحظ ان $d\vec{\boldsymbol{s}}$ عمودية على $\vec{\boldsymbol{B}}$ في كل مكان على الجزء المستقيم من السلك. استخدم المعادلة 12.1 لايجاد مقدار القوة المؤثرة على هذا الجزء:

$$d\vec{\boldsymbol{F}}_1 = I\int_a^b d\vec{\boldsymbol{s}} \times \vec{\boldsymbol{B}} = I\int_{-R}^{R} B\,dx\,\hat{\mathbf{k}} = 2IRB\,\hat{\mathbf{k}}$$

لايجاد القوة المغناطيسية المؤثرة على الجزء المستقيم، في البداية نكتب المعادلة للقوة المغناطيسية $d\vec{\boldsymbol{F}}_2$ المؤثرة على العنصر $d\vec{\boldsymbol{s}}$ في الشكل 20.1 على النحو التالي:

$$(1) \qquad d\vec{\boldsymbol{F}}_2 = Id\vec{\boldsymbol{s}} \times \vec{\boldsymbol{B}} = -IB\sin\theta\,ds\,\hat{\mathbf{k}}$$

من الشكل الهندسي الموضح في الشكل 20.1 نجد ان ds على النحو التالي:

$$(2) \qquad ds = R\,d\theta$$

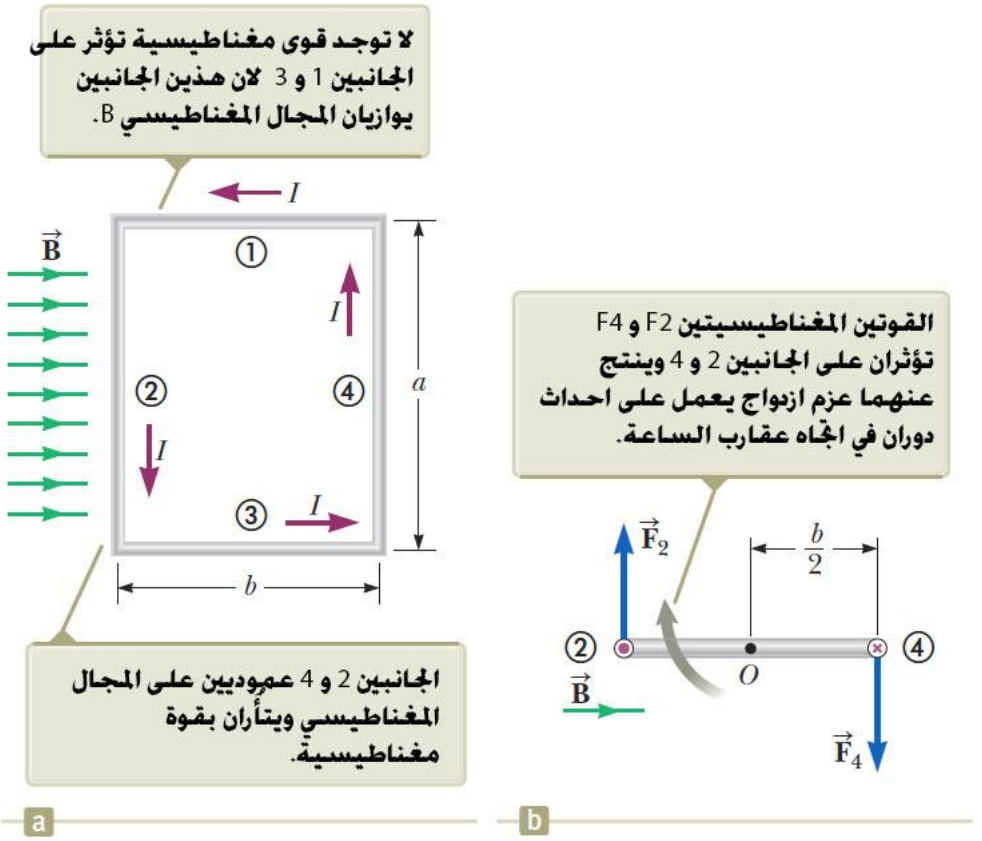
بالتعويض من المعادلة (2) في المعادلة (1) واجراء التكامل على الزاوية θ من 0 إلى π نحصل على

$$\vec{\boldsymbol{F}}_2 = -\int_0^{\pi} IRB\sin\theta\,d\theta\,\hat{\mathbf{k}} = -IRB\int_0^{\pi}\sin\theta\,d\theta\,\hat{\mathbf{k}} = -IRB[-\cos\theta]_0^{\pi}\hat{\mathbf{k}}$$
$$= +IRB(\cos\pi - \cos 0)\hat{\mathbf{k}} = IRB(-1-1)\hat{\mathbf{k}} = -2IRB\hat{\mathbf{k}}$$

الخلاصة: نستخلص من هذا المثال جملتين هامتين. الأولى هي ان القوة على الجزء المنحني من السلك لها نفس مقدار القوة المؤثرة على الجزء المستقيم بين نفس النقطتين. بصفة عامة القوة المغناطيسية على الجزء المنحني من سلك يمر فيه تيار كهربي في مجال مغناطيسي منتظم تساوي القوة المغناطيسية المؤثرة على الجزء المستقيم من السلك الواصل بين طرفي السلك المنحني ويمر فيه نفس مقدار التيار. علاوة على ان $\vec{\boldsymbol{F}}_1 + \vec{\boldsymbol{F}}_2 = 0$ هي نتيجة عامة وتنص على ان القوة المغناطيسية الكلية المؤثرة على حلقة تيار مغلقة في مجال مغناطيسي منتظم تساوي صفر.

5.1 الازدواج على حلقة تيار في مجال مغناطيسي منتظم
Torque on a Current Loop in a Uniform Magnetic Field

في الجزء 4.1 السابق وضحنا كيف ان القوة المغناطيسية تؤثر على موصل يمر فيه تيار كهربي موضوع في مجال مغناطيسي. لنعتبر هذه الظاهرة نقطة بداية هنا، والان دعنا نوضح تأثير الازدواج على حلقة تيار كهربي موضوعة في مجال مغناطيسي.



الشكل 21.1 (a) مشهد علوي لحلقة مستطيلة يمر فيها تيار في مجال مغناطيسي منتظم. (b) مشهد جانبي للحلقة يوضح الجانبين 2 و4 من السلك. النقطة البنفسجية اللون في الدائرة على اليسار تمثل التيار المار في السلك 2 وهي في اتجاهك، اما إشارة الضرب البنفسجية اللون في الجانب الأيمن من الدائرة تمثل التيار المار في السلك 4 وهو في اتجاه الابتعاد عنك.

اعتبر حلقة مستطيل يحمل تيار كهربي شدته I في وجود مجال مغناطيسي منتظم يوازي مستوى الحلقة كما هو موضح في الشكل 21.1 a. لا توجد أي قوى مغناطيسية تؤثر على الجانبين 1و3 لان هذين السلكين يوازيان المجال المغناطيسي، وعليه فان $\vec{L} \times \vec{B} = 0$ لهذين الجانبين. القوى المغناطيسية التي تؤثر على الجانبين 2 و4 لان هذين الجانبين عموديين على المجال. مقدار هذه القوة من المعادلة 10.1 هو

$$F_2 = F_4 = IaB$$

اتجاه القوة $\vec{F}_2$ المؤثرة على السلك 2 هو في اتجاه الخروج من الصفحة كما في الشكل 21.1 a، واتجاه القوة $\vec{F}_4$ المؤثرة على السلك 4 في اتجاه الدخول على الصفحة. اذا نظرنا إلى الحلقة من الجانب 3 فاننا نرى الجانبين 2 و4 كما هو موضح في الشكل 21.1 b والقوتين $\vec{F}_2$ و $\vec{F}_4$ في الاتجاهين الموضحين في الشكل. لاحظ ان القوتين في اتجاهين متعاكسين وخط عملهما مختلف. اذا كانت الحلقة مرتكزة على نقطة O بحيث يمكنها ان تدور حولها، فان هاتين القوتين تؤثران بعزم ازدواج *torque* يسبب دوران الحلقة في اتجاه عقارب الساعة. مقدار عزم الازدواج τ_{max} هو

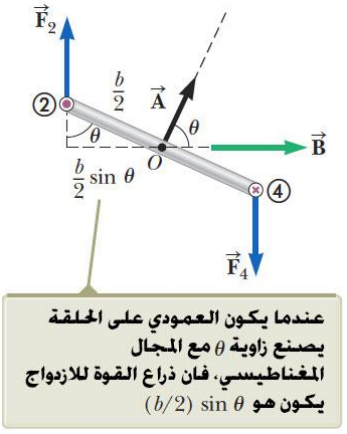
$$\tau_{max} = F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (IaB)\frac{b}{2} + (IaB)\frac{b}{2} = IabB$$

حيث ان ذراع العزم حول النقطة O هو $b/2$ لكل قوة. حيث ان المساحة المحصورة بواسطة الحلقة هي $A = ab$، فاننا يمكننا ان نعبر عن اقصى عزم ازدواج على النحو التالي:

$$\tau_{max} = IAB \qquad (1.13)$$

اقصى عزم الازدواج يتحقق فقط عندما يكون المجال المغناطيسي موازيا لمستوى الحلقة. اتجاه الحركة مع عقارب الساعة عندما نشاهد الحلقة من الجانب 3 كما هو موضح في الشكل 21.1 b. اذا تم عكس اتجاه التيار، فان اتجاهات القوة سوف تنعكس أيضا ويصبح الدوران مع عكس عقارب الساعة.

افترض الان ان المجال المغناطيسي يصنع زاوية $\theta < 90^o$ مع الخط العمودي على مستوى الحلقة كما هو موضح في الشكل 22.1. لجعل الامر اكثر ملائمة دعنا نفترض ان المجال المغناطيسي $\vec{B}$ عموديا على الجانبين 2 و4. في هذه الحالة تكون القوتين المغناطيسيتين $\vec{F}_1$ و$\vec{F}_3$ اللتان تؤثران بقوة على الجانبين 1 و3 يلغي احدهما الاخر ولا ينتج عنهما عزم ازدواج لان خط عملهما واحد. القوتين $\vec{F}_2$ و$\vec{F}_4$ اللتان تؤثران على الجانبين 2 و4 ينتج عنهما عزم ازدواج حول أي نقطة. بالإشارة إلى الشكل 22.1 نرى ان ذراع القوة لـ $\vec{F}_2$ حول النقطة O يساوي $(b/2)\sin\theta$. بالمثل ذراع القوة لـ $\vec{F}_4$ حول النقطة O يساوي أيضا $(b/2)\sin\theta$. حيث ان $F_2 = F_4 = IaB$، فان مقدار عزم الازدواج الكلي حول النقطة O هو



الشكل 22.1 مشهد يوضح حافة الحلقة في الشكل 21.1 مع العمودي على الحلقة عند زاوية θ بالنسبة إلى المجال المغناطيسي.

$$\tau = F_2\frac{b}{2}\sin\theta + F_4\frac{b}{2}\sin\theta$$

$$= IaB\left(\frac{b}{2}\sin\theta\right) + IaB\left(\frac{b}{2}\sin\theta\right) = IabB\sin\theta$$

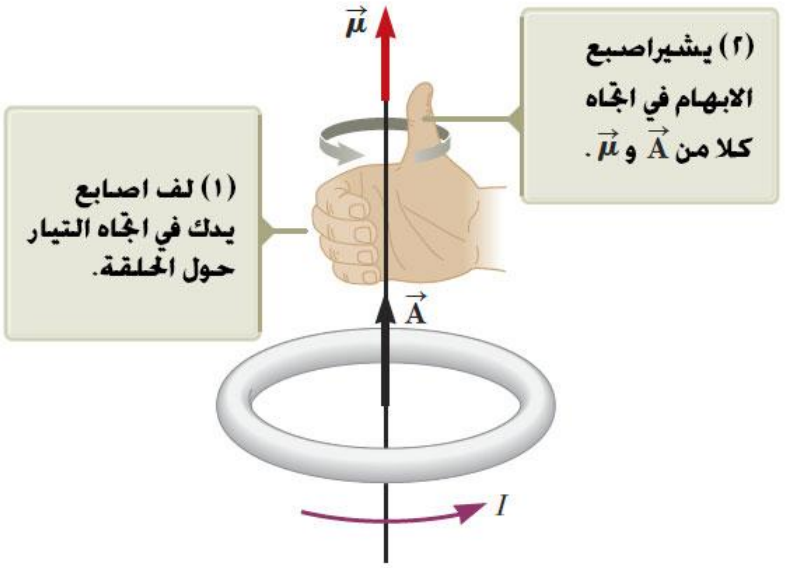
$$= IAB\sin\theta$$

حيث ان $A = ab$ هي مساحة الحلقة. توضح هذه النتيجة ان عزم الازدواج له قيمة عظمى تساوي IAB عندما يكون المجال المغناطيسي عموديا على العمودي على مستوى الحلقة أي عند الزاوية $\theta = 90^o$ كما ورد في مناقشة الشكل 21.1 ويساوي صفرا عندما يكون المجال المغناطيسي موازيا للعمودي على مستوى الحلقة أي عند $\theta = 0$.

الصيغة الاتجاهية للتعبير عن عزم الازدواج المؤثر على حلقة موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{B}$ هي على النحو التالي:

$$\vec{\tau} = I\vec{A}\times\vec{B} \qquad (1.14)$$

حيث ان $\vec{A}$ هو المتجه الموضح في الشكل 22.1 وهو عموديا على مستوى الحلقة ومقداره يساوي مساحة الحلقة. لتحديد اتجاه المتجه $\vec{A}$ استخدم قاعدة اليد اليمنى الموضحة في الشكل 23.1. عندما تلف أصابع يدك اليمنى في اتجاه التيار الكهربي المار في الحلقة، فان



الشكل 23.1 قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه المتجه $\vec{A}$. اتجاه العزم المغناطيسي $\vec{\mu}$ في نفس اتجاه $\vec{A}$.

اصبع الابهام يشير إلى اتجاه $\vec{A}$. يوضح الشكل 22.1 ان الحلقة تميل إلى الدوران في اتجاه تناقص قيم θ (هذا يعني ان متجه المساحة $\vec{A}$ يدور نحو اتجاه المجال المغناطيسي).

يعرف حاصل الضرب $I\vec{A}$ بعزم ثنائي القطب المغناطيسي *magnetic dipole momentum* ويرمز له بـ $\vec{\mu}$ ويطلق عليه أحيانا العزم المغناطيسي للحلقة:

$$\vec{\mu} \equiv I\vec{A} \qquad (1.15)$$

وحدة عزم ثنائي القطب في نظام الوحدات العالمي SI هو ($A.m^2$). اذا كان ملف مكون من عدد N من الحلقات التي لها نفس المساحة فان العزم المغناطيسي للملف هو

$$\vec{\mu}_{coil} = NI\vec{A} \qquad (1.16)$$

باستخدام المعادلة 15.1 يمكننا ان نعبر عن عزم الازدواج المؤثر على حلقة يمر فيها تيار

في مجال مغناطيسي $\vec{B}$ على النحو التالي:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \qquad (1.17)$$

ملاحظة: هذه النتيجة التي توصلنا لها تناظر عزم الازدواج الكهربي $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$ المؤثر على ثنائي قطب كهربي في مجال كهربي $\vec{E}$ حيث ان $\vec{p}$ هي عزم ثنائي القطب الكهربي.

بالرغم من اننا حصلنا على عزم الازدواج لاتجاه محدد للمجال المغناطيسي $\vec{B}$ بالنسبة للحلقة، فان المعادلة $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ متحققة لاي اتجاه. علاوة على انه بالرغم من اننا قمنا باشتقاق معادلة عزم الازدواج لحلقة مستطيلة الشكل، فان النتيجة التي توصلنا لها متحققة أيضا لحلقة بأي شكل. عزم الازدواج لملف مكون من عدد N من اللفات يعطى بالمعادلة 17.1 باستخدام المعادلة 16.1 للعزم المغناطيسي. وجدنا من دراستنا لموضوع الكهربية الساكنة ان طاقة الوضع الكهربي لاي نظام مكون من ثنائي قطب كهربي ومجال كهربي يعطى بالعلاقة $U = -\vec{p}.\vec{E}$. تعتمد هذه الطاقة على اتجاه ثنائي القطب في المجال الكهربي. بالمثل تكون طاقة الوضع لنظام مكون من ثنائي قطب مغناطيسي في مجال مغناطيسي معتمدة على اتجاه ثنائي القطب في المجال المغناطيسي وتعطى بالعلاقة التالية:

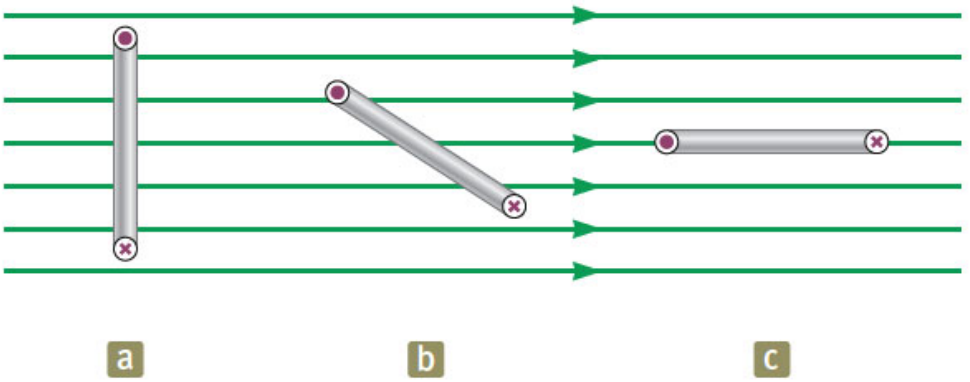
$$U = -\vec{p}.\vec{B} \qquad (1.18)$$

توضح هذه العلاقة ان النظام له ادنى طاقة $U_{min} = -\mu B$ عندما تشير في نفس اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{B}$. ويكون للنظام اعلى طاقة $U_{max} = +\mu B$ عندما تشير إلى اتجاه عكس اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{B}$.

عزم الازدواج المؤثر على حلقة تيار كهربي تسبب دورا الحلقة، هذه الظاهرة هي أساس فكرة عمل الموتور. الطاقة التي تدخل الموتور بواسطة النقل الكهربي ودوران الملف يمكن ان يبذل شغلا على جهاز خارجي. على سبيل المثال، موتور النوافذ الكهربائية لسيارة يبذل شغلا على النوافذ، ويطبق قوة عليهم ويحركها للاعلى او للاسفل. سوف نناقش فكرة عمل الموتور بمزيد من التفاصيل في الفصل 5.3.

4.1 سؤال للتفكير

(i) رتبك مقادير عزم الازدواج المؤثرة على حلقات مستطيلة الشكل (a) و(b) و(c) الموضحة في الشكل 24.1 من الأعلى إلى الأقل. كل الحلقات يمر فيها نفس مقدار التيار الكهربي. (ii) رتب مقادير القوة الكلية المؤثرة على الحلقات المستطيلة الشكل الموضحة في الشكل 24.1 من الأعلى إلى الأقل.



الشكل 24.1 أي من حلقات التيار الكهربي تتعرض لاعلى عزم ازدواج (a) أو (b) أو (c)؟ أي منها يتعرض لاعلى قوة؟

مثال 5.1 عزم ثنائي القطب المغناطيسي لملف
The Magnetic Dipole Moment of a Coil

ملف على شكل مستطيل ابعاده 8.50 cm × 5.40 مكون من 25 لفة من سلك ويمر فيه تيار كهربي شدته 15.0 mA. تم تطبيق مجالا مغناطيسيا مقداره 0.350 T في اتجاه موازي لمستوى الملف. (**A**) احسب مقدار المجال عزم ثنائي القطب المغناطيسي للملف.

الحل

تصور المسألة: العزم المغناطيسي للملف يعتمد على الشكل الهندسي للحلقة وعلى التيار المار في الملف.

تصنيف المسألة: نقوم بحساب المطلوب من خلال المعادلات التي قمنا باشتقاقها في هذا الفصل، وبالتالي فاننا نصنف هذا المثال على انه مسألة تعويض مباشر.

باستخدام المعادلة 16.1 نحسب العزم المغناطيسي على النحو التالي:

$$\mu_{coil} = NIA = (25)(15.0 \times 10^{-3}A)(0.054m)(0.085)$$
$$= 1.72 \times 10^{-3}\text{A.m}^3$$

(B) ما مقدار عزم الازدواج المؤثر على الحلقة؟

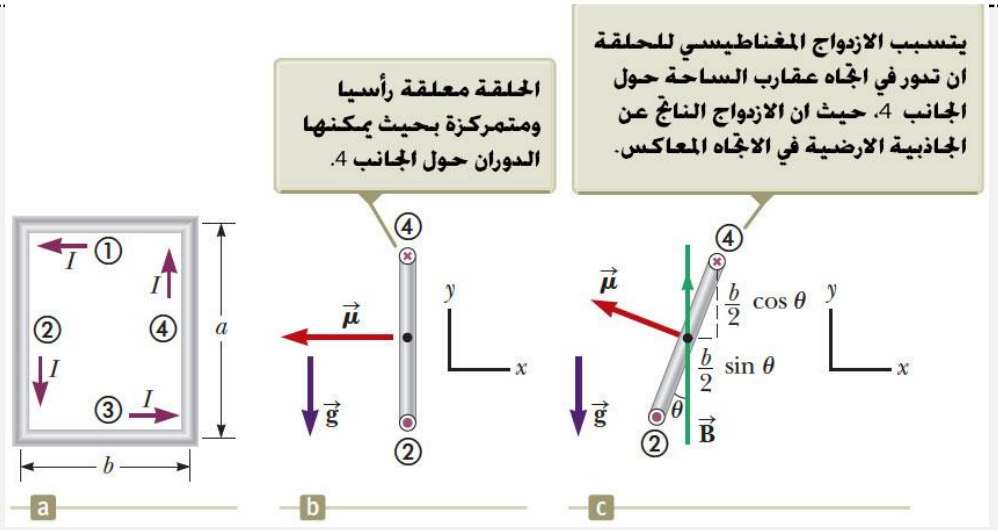
الحل

باستخدام المعادلة 17.2 مع ملاحظة ان المجال المغناطيسي $\vec{B}$ عمودي على $\vec{\mu}_{coil}$

$$\tau = \mu_{coil}B = (1.72 \times 10^{-3}\text{A.m}^3)(0.350\text{T})$$
$$= 6.02 \times 10^{-4}\text{N.m}$$

مثال 6.1 دوران ملف Rotating a Coil

اعتبر حلقة من سلك كما هو موضح في الشكل 25.1 a. تخيل ان لها محور دوران على امتداد الجانب 4، والذي هو موازي للمحور z ومثبت بحيث ان هذا الجانب 4 يبقى ثابتا وباقي الحلقة معلقة رأسيا في مجال الجاذبية الأرضية ولكنه يمكن ان يدور حول الجانب 4 كما هو موضح في الشكل 25.1 b. كتلة الحلقة هي 50.0 g، وابعاد الحلقة هي a = 0.20 m و b = 0.10 m. يمر تيار كهربي في الحلقة مقداره 3.5 A والحلقة مغمورة في مجال مغناطيسي رأسي منتظم مقداره 0.010 T في اتجاه محور y الموجب كما هو موضح فيالشكل 25.1 c. ما مقدار الزاوية التي تصنعها الحلقة مع هذا الاتجاه الرأسي؟



الشكل 25.1 (a) **ابعاد حلقة التيار المستطيلة.** (b) **مشهد جانبي للحلقة يظهر فيه الجانبين 2 و4.** (c) **مشهد جانبي للحلقة في** (b) **قامت بالدوران بزاوية بالنسبة إلى الافقي عندما وضعت في مجال مغناطيسي ثابت.**

الحل

تصور المسألة: لاحظ في الشكل 25.1 b، ان العزم المغناطيسي للحلقة إلى اليسار. لهذا عندما تكون الحلقة في مجال مغناطيسي، فان عزم الازدواج المغناطيسي المؤثر على الحلقة يتسبب في دوران الحلقة في اتجاه مع عقارب الساعة حول الجانب 4، والذي اعتبرناه محور الدوران. تخيل ان مستوى الحلقة عند زاوية θ بالنسبة للمحور الرأسي كما في الشكل 25.1 c. تبذل قوة الجاذبية الأرضية عزم ازدواج على الحلقة تسبب في دورانها في عكس اتجاه عقارب الساعة عند غياب المجال المغناطيسي.

تصنيف المسألة: عند زاوية معينة للحلقة فان عزمي الازدواج متساويين في المقدار وتكون الحلقة في حالة سكون. لذا فاننا ننمذج هذه المسألة كجسم صلب في حالة اتزان.

تحليل المسألة: احسب مقدار عزم الازدواج المغناطيسي المؤثر على الحلقة حول محور الدوران (الجانب 4) من المعادلة 17.1

$$\vec{\tau}_B = \vec{\boldsymbol{\mu}} \times \vec{\boldsymbol{B}} = -\mu B \sin(90^o - \theta)\hat{\mathrm{k}} = -IAB\cos\theta\,\hat{\mathrm{k}} = -IabB\cos\theta\,\hat{\mathrm{k}}$$

احسب مقدار عزم الازدواج الناتج عن قوة الجاذبية الأرضية المؤثر على الحلقة، مع ملاحظة ان قوة الجاذبية الأرضية تؤثر على الحلقة عند مركز الحلقة

$$\vec{\tau}_g = \vec{\boldsymbol{r}} \times m\vec{\boldsymbol{g}} = mg\frac{b}{2}\sin\theta\,\hat{\mathrm{k}}$$

من نموذج اتزان الجسم الصلب، نقوم بجمع الازدواجين ونساوي الازدواج الكلي بالصفر.

$$IabB\cos\theta = mg\frac{b}{2}\sin\theta \quad \rightarrow \quad \tan\theta = \frac{2IaB}{mg}$$

بالحل بالنسبة إلى θ نحصل على

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2IaB}{ma}\right)$$

بالتعويض في المعادلة عن القيم العددية نحصل على ما يلي:

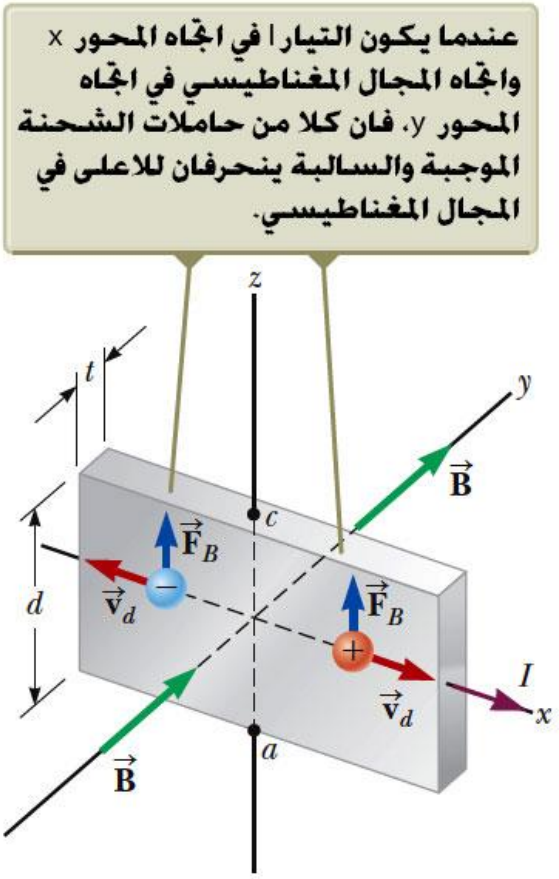
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2(3.50\mathrm{A})(0.20\mathrm{m})(0.01\mathrm{T})}{(0.050\mathrm{kg})(9.8\mathrm{m/s^2})}\right) = 1.64^o$$

الخلاصة: الزاوية صغيرة جدا نسبيا، حيث يمكن ان نعتبر ان الحلقة لازالت معلقة رأسيا. اذا ازدادت شدة التيار او شدة المجال المغناطيسي تزداد الزاوية لان العزم المغناطيسي يصبح اقوى.

6.1 تأثير هول Hall Effect

عندما يوضع موصل يمر فيه تيار كهربي في مجال مغناطيسي، يتولد فرق جهد كهربي في اتجاه عموديا على كلا من التيار الكهربي والمجال المغناطيسي. لوحظت هذه الظاهرة لأول مرة في العام 1879 بواسطة العالم ايدوان هول Edwin Hall (1855 – 1938)، وعرفت باسمه ظاهرة هول Hall effect. التجهيزات العلمية لمشاهدة تأثير هول تتكون من موصل مسطح يمر فيه تيار كهربي I في اتجاه المحور x كما هو موضح في الشكل 26.1. يتم تطبيق مجالا مغناطيسيا $\vec{\boldsymbol{B}}$ في اتجاه محور y. اذا كانت حاملات الشحنة هي

الالكترونات وتتحرك في اتجاه محور x السالب بسرعة انجراف $\vec{v}_d$، فانها سوف تتعرض لقوة مغناطيسية إلى الأعلى $\vec{F}_B = q\vec{v}_d \times \vec{B}$ تعمل على انحراف الالكترونات إلى الأعلى وتتجمع على الحافة العلية للموصل المسطح، تاركا شحنة موجبة على الحافة السفلية كما هو موضح في الشكل 27.1 a.



الشكل 26.1 لمشاهدة تأثير هول، يتم تطبيق مجالا مغناطيسيا على موصل يمر فيه تيار كهربي. يقاس جهد هول بين النقطتين a و c.

هذا التراكم للشحنات عند الحواف يتسبب في مجال كهربي في الموصل ويزداد حتى تصبح القوة الكهربية المؤثرة حاملات الشحنة المتبقية في الموصل تتوازن مع القوة المغناطيسية المؤثرة على حاملات الشحنة. عندما يتحقق شرط الاتزان هذا لا يحدث المزيد من الانحراف للالكترونات إلى الأعلى. اذا تم توصيل مقياس جهد حساس على طرفي

الموصل كما هو موضح في الشكل 17.1 يمكننا ان نقيس فرق الجهد، والذي يعرف بجهد هول Hall voltage ويرمز له بـ ΔV_{H}، والذي يتولد على طرفي الموصل.

اذا كانت حاملات الشحنة موجبة وبالتالي فانها سوف تتحرك في اتجاه محور x الموجب كما هو موضح في الشكل 26.1 والشكل 27.1 b، وهي أيضا سوف تتعرض إلى قوة مغناطيسية إلى الأعلى $q\vec{v}_d \times \vec{B}$، والتي تتسبب في تراكم الشحنات الموجبة على الحافة العليا وتترك الشحنة السالبة تتراكم على الحافة السفلية. وبالتالي فان إشارة جهد هول المتولد في الشريحة المسطحة عكس إشارة جهد هول الناتج من انحراف الالكترونات. وبالتالي يمكن تحديد إشارة حاملات الشحنة من قياس قطبية جهد هول.

عند اشتقاق علاقة رياضية لجهد هول، في البداية نلاحظ ان القوة المغناطيسية المبذولة على حاملات الشحنة لها المقدار $q_v dB$. في حالة الاتزان تتوازن هذه القوة مع القوة الكهربية qE_{H}، حيث ان E_{H} هي مقدار المجال الكهربي الناتج عن انفصال الشحنات على حافتي الشريحة المسطحة (والتي نشير لها في بعض الأحيان بمجال هول Hall field). وبالتالي فان

$$qv_dB = qE_{\mathrm{H}}$$
$$E_{\mathrm{H}} = v_dB$$

اذا كانت d هي عرض الشريحة المسطحة فان جهد هول يكون على النحو التالي:

$$\Delta V_{\mathrm{H}} = E_{\mathrm{H}} = v_dBd \qquad (1.19)$$

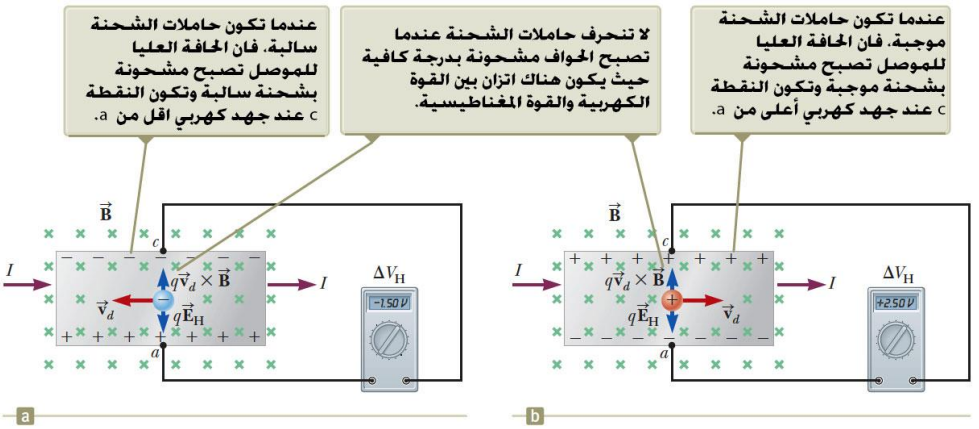
لهذا فان قياس جهد هول يعطي قيمة سرعة الانجراف لحاملات الشحنة بمعرفة كلا من d وB.

يمكننا ان نحصل عيل كثافة حاملات الشحنة n بقياس التيار في الصفحية المسطحة. من علاقة سرعة الانجراف مع التيار الكهربي والتي هي على النحو التالي:

$$v_d = \frac{I}{nqA} \qquad (1.20)$$

حيث ان A هي مساحة مقطع الموصل (الصفحية المسطحة هنا). بالتعويض عن سرعة الانجراف v_d من المعادلة 20.1 في المعادلة 19.1 نحصل على جهد هول على النحو التالي:

$$\Delta V_{\mathrm{H}} = \frac{IBd}{nqA} \qquad (1.21)$$



الشكل 27.1 تعتمد إشارة جهد هول على إشارة حاملات الشحنة

حيث ان $A = td$، و t هنا هي سمك الصفحية المسطحة، يمكننا ان نعبر عن المعادلة 21.1 على النحو التالي:

$$\Delta V_{\mathrm{H}} = \frac{IB}{nqt} = \frac{R_{\mathrm{H}} IB}{t} \qquad (1.22)$$

حيث ان $R_{\mathrm{H}} = 1/nq$ وتعرف بمعامل هول *Hall coefficent*. توضح هذه العلاقة ان الموصل المعاير بشكل جيد يمكن ان يستخدم لقياس المجال المغناطيسي المجهول.

حيث ان كل الكميات الفيزيائية في المعادلة 22.1 ما عدا nq يمكن قياسها، فان معامل هول يمكن تحديده. إشارة ومقدار R_{H} تعطي إشارة حاملات الشحنة وكثافة عددها. في معظم المعادن تكون حاملات الشحنة من الالكترونات وكثافة حاملات الشحنة تحدد من قياسات تأثير هول وقد وجدت انها تتفق بشكل جيد مع القيم المحسوبة لمعادن مثل الليثيوم Li والصوديوم Na والنحاس Cu والفضة Ag والتي تعطي ذراتها الكترون واحد لقوم بنقل التيار الكهربي. في هذه الحالة فان n تساوي تقريبا عدد عدد الكترونات التوصيل لكل وحدة حجوم. النموذج الكلاسيكي في هذه الحالة غير متحقق للمعادن مثل الحديد Fe والبيزموث Bi والكادميوم Cd او اشباه الموصلات. هذه الاختلافات

يمكن ان تفسر فقط باستخدام نموذج يعتمد على الطبيعة الكوانتمية للمواد الصلبة.

مثال 7.1 تأثير هول للنحاس The Hall Effect for Copper

شريحة مستطيلة الشكل من النحاس عرضها 1.5 cm وسمكها 0.10 cm يمر فيها تيار كهربي مقداره 5.0 A. اوجد جهد هول عندما يطبق مجال مغناطيسي شدته 1.2 T في اتجاه عمودي على الشريحة.

الحل

تصور المسألة: ادرس الشكل 26.1 والشكل 27.1 بعناية وتأكد من فهمك ان جهد هول ينشأ بين الحافتين العلوية والسفلية للشريحة.

تصنيف المسألة: سوف نحسب جهد هول باستخدام المعادلة التي قمنا باشتقاقها في هذا الجزء، وبالتالي فاننا نعتبر هذا المثال مسألة تعويض مباشر.

افترض ان الكترون واحد لكل ذرة متوفر للتوصيل، اوجد كثافة حاملات الشحنة بدلالة الكتلة المولية M وكثافة النحاس ρ على النحو التالي:

$$n = \frac{N_A}{V} = \frac{N_A \rho}{M}$$

بالتعويض من هذه النتيجة في المعادلة 22.1 نحصل على

$$\Delta V_H = \frac{IB}{nqt} = \frac{MIB}{N_A \rho qt}$$

بالتعويض عن القيم العددية نحصل على جهد هول على النحو التالي:

$$\Delta V_H = \frac{(0.0635\ \text{kg/mol})(5.0\text{A})(1.2\text{T})}{(6.02 \times 10^{23}\text{mol}^{-1})(8920\text{kg/m}^3)(1.6 \times 10^{-19}\text{C})(0.001\text{m})}$$
$$= 0.44\mu\text{V}$$

القيمة الصغيرة جدا لجهد هول متوقعة في الموصل الجيد. (لاحظ ان سمك الشريحة لم يلزم في هذه الحسابات).

ماذا لو؟ ماذا لو ان الشريحة لها نفس الابعاد مصنوعة من مادة شبه موصلة؟ هل جهد هول سيكون اصغر او اكبر؟

الإجابة: في المواد شبه الموصلة، تكون n اقل بكثير من المعادن التي تساهم بالكترون واحد لكل ذرة في التيار، وعليه فان جهد هول يكون عادة اكبر لانه يتناسب عكسيا مع n. تيار بحدود 0.1 mA يستخدم بصفة عامة في مثل هذه المواد. اعتبر قطعة من السليكون لها نفس ابعاد شريحة النحاس في هذا المثال وقيمة n لها يساوي 1.0×10^{29} electron/m^3. باعتبار $B = 1.2$ T و$I = 0.10$ mA، نجد ان $\Delta V_H = 7.5$ mV. هذا الجهد يمكن قياسه.

مبادئ واساسيات Concepts and Principles

عزم ثنائي القطب المغناطيسي *magnetic dipol momentum* $\vec{\boldsymbol{\mu}}$ لحلقة يمر فيها تيار I هو

$$\vec{\boldsymbol{\mu}} = I\vec{\boldsymbol{A}} \qquad (1.15)$$

حيث ان متجه المساحة $\vec{\boldsymbol{A}}$ يكون عموديا على مستوى الحلقة و$|\vec{\boldsymbol{A}}|$ يساوي مساحة الحلقة. وحدة هي A.m^2.

القوة المغناطيسية المؤثرة على شحنة q تتحرك بسرعة $\vec{\boldsymbol{v}}$ في مجال مغناطيسي هي

$$\vec{\boldsymbol{F}}_B = q\vec{\boldsymbol{v}} \times \vec{\boldsymbol{B}} \qquad (1.1)$$

اتجاه هذه القوة المغناطيسية يكون عموديا على كلا من سرعة الجسيم والمجال المغناطيسي. مقدار هذه القوة هو

$$F_B = |q|vB \sin\theta \qquad (1.2)$$

حيث θ هي اقل زاوية بين $\vec{\boldsymbol{v}}$ و$\vec{\boldsymbol{B}}$. وحدة $\vec{\boldsymbol{B}}$ هي التسلا tasla (T) حيث ان 1 T = 1 N/A.m.

اذا تحرك جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم بحيث ان سرعته الابتدائية عمودية على المجال، فان الجسيم المشحون يتحرك في مسار دائري، في المستوى العمودي على

المجال المغناطيسي. نصف قطر المسار الدائري هو

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (1.3)$$

حيث ان m هي كتلة الجسيم وq هي شحنته.

السرعة الزاوية للجسيم المشحون هي

$$\omega = \frac{qB}{m} \qquad (1.4)$$

اذا كان موصل مستقيم طوله L يمر فيه تيار كهربي I، فان القوة المؤثرة عليه عندما يوضع في مجال مغناطيسي منتظم هي

$$\vec{\boldsymbol{F}}_B = I\vec{\boldsymbol{L}} \times \vec{\boldsymbol{B}} \qquad (1.10)$$

حيث يكون اتجاه $\vec{\boldsymbol{L}}$ في اتجاه التيار و$|\vec{\boldsymbol{L}}| = L$

عزم الازدواج $\vec{\tau}$ المبذول على حلقة يمر فيها تيار موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{\boldsymbol{B}}$ هو

$$\vec{\tau} = \vec{\boldsymbol{\mu}} \times \vec{\boldsymbol{B}} \qquad (1.17)$$

اذا كان سلك له شكل غير منتظم يمر فيه تيار I وضع في مجال مغناطيسي منتظم، فان القوة المغناطيسية المؤثرة على مقطع صغير $d\vec{\boldsymbol{s}}$ هي

$$d\vec{\boldsymbol{F}}_B = Id\vec{\boldsymbol{s}} \times \vec{\boldsymbol{B}} \qquad (1.11)$$

لتحديد القوة المغناطيسية الكلية المؤثرة على السلك، نجري عملية التكامل للمعادلة 11.1 على طول السلك.

طاقة الوضع المغناطيسية لنظام مكون من ثنائي قطب مغناطيسي في مجال مغناطيسي هي

$$U = -\vec{\boldsymbol{p}}.\vec{\boldsymbol{B}} \qquad (1.18)$$

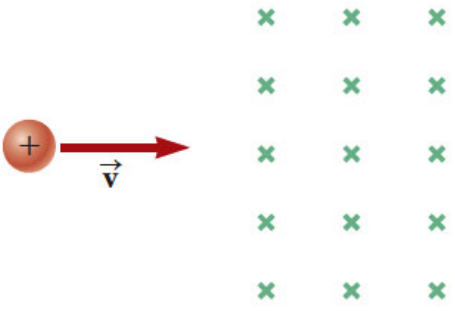
أسئلة موضوعية Objective Questions

1. مجال مغناطيسي منتظم لا يمكن ان يبذل قوة مغناطيسية على جسيم في أي من الحالات التالية؟ قد يكون هناك اكثر من إجابة صحيحة. (a) الجسيم مشحونا. (b) يتحرك الجسيم عموديا على المجال المغناطيسي. (c) يتحرك الجسيم موازيا للمجال المغناطيسي. (d) مقدار المجال المغناطيسي يتغير مع الزمن. (e) الجسيم في حالة سكون.

2. يتحرك جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم. أي من العبارات التالية صحيحة للمجال المغناطيسي؟ قد يكون هناك اكثر من جملة صحيحة. (a) يبذل قوة على الجسيم موازية للمجال. (b) يبذل قوة على الجسيم على امتداد حركته. (c) يعمل على زيادة الطاقة الحركية للجسيم. (d) يبذل قوة عمودية على اتجاه حركة الجسيم. (e) لا يغير مقدار كمية حركة الجسيم.

3. اطلق جسيم مشحون بشحنة كهربية في منطقة من الفراغ حيث المجال الكهربي يساوي صفر. يتحرك الجسيم في خط مستقيم. هل تستنتج ان المجال المغناطيسي في المنطقة يساوي صفرا؟ (a) نعم. (b) لا، المجال قد يكون عموديا على سرعة الجسيم. (c) لا، المجال قد يكون موازيا لسرعة الجسيم. (d) لا الجسيم قد يحتاج إلى شحنة باشارة معاكسة ليكون هناك قوة مبذولة عليه. (e) لا، مراقبة جسيم مشحون بشحنة كهربية لا يعطي معلومات حول المجال المغناطيسي.

4. يتحرك بروتون افقيا ويدخل منطقة حيث يوجد فيها مجال مغناطيسي منتظم في اتجاه عموديا على سرعة البروتون كما هو موضح في الشكل OQ1.4. بعد ان يدخل الجسيم المجال هل (a) ينحرف للاسفل، وتبقى سرعته ثابتة، (b) ينحرف إلى الأعلى، ويتحرك في مدار دائري بسرعة منتظمة ويخرج من المجال منطلقا إلى اليسار، (c) يستمر في الحركة افقيا بسرعة ثابتة، (d) يتحرك في مدار دائري ويصبح مقيدا في المجال، (e) ينحرف خارج مستوى الورقة؟



الشكل OQ1.4

5. يتحرك الكترون عبر خط الاستواء الأرضي بسرعة 2.50×10^{6}m/s في اتجاه 35.0^{o} بالنسبة للشرق. عند هذه النقطة كان المجال المغناطيسي للأرض في اتجاه الشمال وموازيا لسطح وقيمته 3.00×10^{-5}T. ما مقدار القوة المؤثرة على الالكترون بسبب تفاعله مع المجال المغناطيسي الأرضي. (a) 6.88×10^{-18}N إلى الغرب (b) 6.88×10^{-18}N في اتجاه سطح الأرض (c) 9.83×10^{-18}N في اتجاه سطح الأرض (d) 9.83×10^{-18}N مبتعدا عن سطح الأرض (e) 4.00×10^{-18}N مبتعدا عن سطح الأرض.

6. اجب بنعم او لا. افترض ان الحركة والتيار على امتداد محور *x* والمجال في تجاه المحور *y*. (a) هل يبذل المجال الكهربي قوة على جسم مشحون وساكن؟ (b) هل المجال المغناطيسي يفعل ذلك أيضا؟ (c) هل يبذل المجال الكهربي قوة على جسيم متحرك مشحون؟ (d) هل المجال المغناطيسي يفعل ذلك أيضا؟ (e) هل يبذل المجال الكهربي قوة على سلك مستقيم يمر فيه تيار كهربي؟ (f) هل المجال المغناطيسي يفعل ذلك أيضا؟ (g) هل يبذل المجال الكهربي قوة على شعاع من الالكترونات المتحركة؟ (h) هل المجال المغناطيسي يفعل ذلك أيضا؟

7. اطلق الكترون A افقيا بسرعة 1.00Mm?s في منطقة فيها مجال مغناطيسي في الاتجاه الرأسي. اطلق الكترون B على امتداد نفس المسار بسرعة 2.00Mm/s. (i) أي من الالكترونات يتعرض لقوة مغناطيسية اكبر؟ (a) الالكترون A. (b) الالكترون B. (c) القوتين لهما نفس المقدار ولا يساوي صفر. (d) القوتين تساويان صفر. (ii) أي من الالكترونين لهما مسار اكثر انحناءا؟ (a) الالكترون A. (b) الالكترون B. (c)

الالكترونين يتبعان نفس المسار. (d) الالكترونين يتحركان في مسار مستقيم.

8. صنف كل من الجمل التالية على أساس خصائص (a) القوى الكهربية فقط، (b) القوى المغناطيسية فقط، (c) كلا من القوى الكهربية والمغناطيسية أو (d) ليس أي من القوة الكهربية او المغناطيسية. (i) القوة تتناسب طرديا مع مقدار المجال المبذول بواسطتها. (ii) القوة تتناسب مع مقدار الشحنة على الجسيم المبذول عليه القوة. (iii) القوة المبذولة على الجسم المشحون بشحنة سالبة يعاكس في الاتجاه القوة المبذولة على الشحنة الموجبة. (iv) القوة المبذولة على جسم ساكن مشحون لا تساوي صفرا. (v) القوة المبذولة على جسم مشحون ومتحرك تساوي صفر. (vi) الوقة المبذولة على جسم مشحون تتناسب مع سرعته. (vii) القوة المبذولة على جسم مشحون لا يمكن ان تغير سرعة الجسم. (viii) مقدار القوة يعتمد على اتجاه حركة الجسم المشحون.

9. عند لحظة معينة، كان بروتون يتحرك في اتجاه محور x الموجب خلال مجال مغناطيسي في اتجاه محور z. ما هو اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على البروتون؟ (a) في اتجاه محور z الموجب (b) في اتجاه محور z السالب (c) في اتجاه محور y الموجب (d) في اتجاه محور y السالب (e) القوة تساوي صفر.

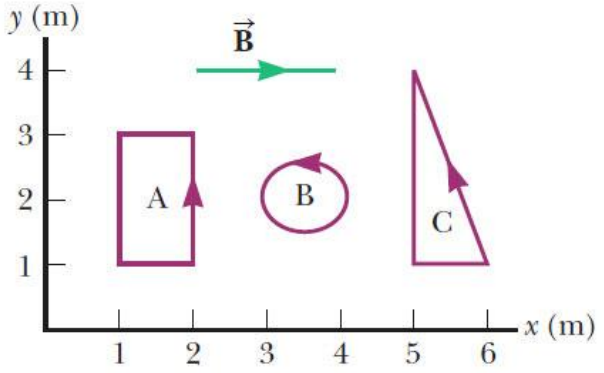
10. رتب مقادير القوى المبذولة على الجسيمات التالية من الأكبر إلى الأصغر. في ترتيبك حدد حالات التساوي. (a) الكترون يتحرك بسرعة 1 Mm/s عموديا على مجال مغناطيسي مقداره 1 mT (b) الكترون يتحرك بسرعة 1 Mm/s موازيا لمجال مغناطيسي مقداره 1 mT (c) الكترون يتحرك بسرعة 2 Mm/s عموديا على مجال مغناطيسي مقداره 1 mT (d) بروتون يتحرك بسرعة 1 Mm/s عموديا على مجال مغناطيسي مقداره 1 mT (e) بروتون يتحرك بسرعة 1 Mm/s عند زاوية 45^o بالنسبة إلى مجال مغناطيسي مقداره 1 mT.

11. في مرشح السرعة الموضح في الشكل 13.1، تتحرك الكترونات بسرعة $v = E/B$ في مسار مستقيم. اذا كانت الالكترونات تتحرك بسرعة اكبر بكثير من هذه السرعة خلال نفس مرشح السرعة هل سوف تترحك على مسار (a) دائري (b) قطع ناقص (c) خط

مستقيم (d) مسار اكثر تعقيدا.

12. ساق رفيع من النحاس طوله 1.00 m وكتلته 50.0 g. ما اقل تيار يمر في التيار سوف يعمل على رفعه فوق الأرض في وجود مجال مغناطيسي مقداره 0.100 T؟ (a) 1.20 A (b) 2.40 A (c) 4.90 A (d) 9.80 A (e) لا احد من الإجابات السابقة.

13. مجال مغناطيسي يبذل عزم ازدواج على حلقات يمر فيها تيار كما هو موضح في الشكل OQ1.13. تقع الحلقة في المستوى xy، كل حلقة يمر فيها نفس مقدار التيار، والمجال المغناطيسي المنتظم في اتجاه محور x الموجب. رتب الحلقات حسب مقدار الازدواج المبذول عليها بواسطة المجال المغناطيسي من الأكبر إلى الأصغر.



الشكل OQ1.13

أسئلة نظرية Conceptual Questions

1. اطلق جسيمين مشحونين في نفس الاتجاه في مجال مغناطيسي عمودي على اتجاه سرعتهما. اذا انحرف الجسيمين في اتجاهين متعاكسين، ماذا تقول عنهما؟

2. كيف لحركة جسيم مشحون ان تستخدم للتميز بين مجال مغناطيسي ومجال كهربي؟ اعطي مثال محدد لتوضيح اجابتك؟

3. هل من الممكن توجيه حلقة يمر فيها تيار كهربي في مجال مغناطيسي منتظم بحيث ان الحلقة لا تدور حول محورها؟ اشرح.

4. اشرح لماذا من غير الممكن تحديد الشحنة والكتلة لجسيم مشحون بشكل منفصل من خلال قياس التسارع الناتج من تأثير قوى كهربية ومغناطيسية على الجسيم.

5. كيف يمكن لحلقة التيار ان تستخدم لتحديد وجود مجال مغناطيسي في منطقة محددة في الفراغ؟

6. جسيمات مشحونة من الفضاء الخارجي تعرف باسم الاشعة الكونية، تصطدم بالأرض بشكل متكرر بالقرب من القطبين اكثر من خط الاستواء. لماذا؟

7. هل يستطيع مجال مغناطيسي ثابت ان يتسبب في حركة الكترون من السكون؟ اشرح اجابتك.

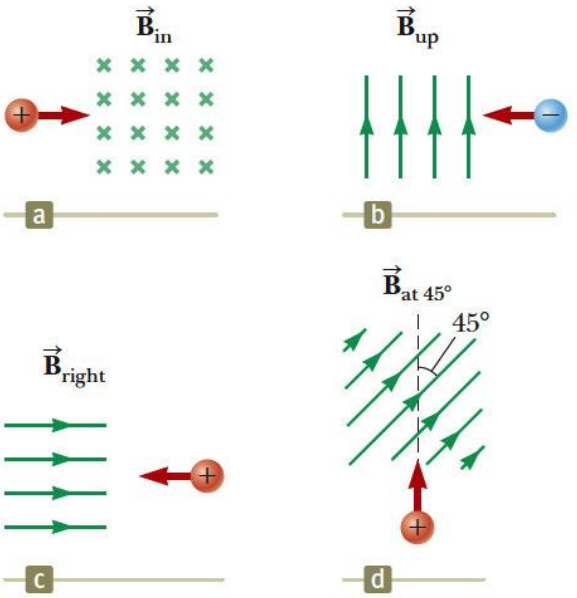
مسائل Problems

1. تشير لمسائل تطبيق مباشر 2. تشير لمسائل متوسطة الصعوبة 3. تشير إلى مسائل تحدي. 1. مسائل لها حل مفصل في دليل الطالب الإرشادي 1. تشير إلى مسائل لها حل مفصل فيديو على موقع داعم للكتاب. Q|C تشير إلى مسائل تحتاج إلى حل وتفسير S تشير إلى مسائل رمزية تتطلب تفسير GP تشير إلى مسائل إرشادية Shaded تشير إلى مسائل مزدوجة تطور مفاهيم برموز وقيم عددية.

الفصل 1.1 المجال المغناطيسي والقوى المغناطيسية Magnetic Fields and Forces

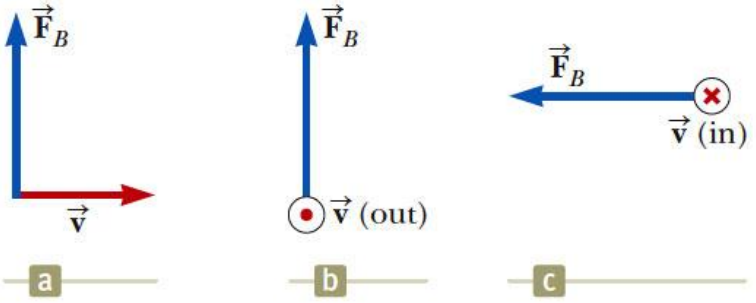
1. اطلق بروتون في مجال مغناطيسي، واتجاه المجال المغناطيسي على امتداد محور x الموجب. اوجد اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على البروتون لكل من اتجاه من اتجاهات سرعة البروتون التالية: (a) اتجاه y الموجب، (b) اتجاه y السالب، (c) اتجاه x الموجب.

2. حدد الاتجاه الابتدائي لانحراف جسيمات مشحونة عند دخولها في المجالات المغناطيسية الموضحة في الشكل P1.2.



الشكل P1.2

3. اوجد اتجاه المجال المغناطيسي المؤثر على جسيم مشحون بشحنة موجبة يتحرك في حالات مختلفة كما هو موضح في الشكل P1.3 اذا كان اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة عليها كما هو موضح في الشكل.



الشكل P1.3

4. اعتبر الكترون موجودا بالقرب من خط الاستواء للأرض. في أي اتجاه سوف ينحرف الالكترون اذا كان اتجاه سرعته (a) إلى الأسفل؟ (b) إلى الشمال؟ (c) إلى الغرب؟ (d) إلى الجنوب؟

5. يتحرك بروتون بسرعة مقدارها 5.02×10^{6}m/s في اتجاه يصنع زاوية مقدارها 60.0^{o}

مع اتجاه مجالا مغناطيسيا شدته 0.180 T في اتجاه محور x الموجب. ما مقدار (a) القوة المغناطيسية المؤثرة على البروتون و(b) تسارع البروتون؟

6. يتحرك بروتون بسرعة 4.00×10^{6} m/s في مجال مغناطيسي مقداره 1.70 T ويتعرض لقوة مغناطيسية مقدارها 8.20×10^{-13} N. ما مقدار الزاوية بين اتجاه سرعة البورتون والمجال؟

7. يتسارع الكترون في جهد كهربي مقداره 2.40×10^{3} V من السكون ويدخل في مجال مغناطيسي منتظم شدته 1.70 T. ما مقدار (a) اقصى و(b) أدنى قيم للقوة المغناطيسية التي يتعرض لها هذا الجسيم؟

8. يتحرك بروتون بسرعة $\vec{v} = (2\hat{\imath} - 4\hat{\jmath} + \hat{k})\text{m/s}$ في منطقة يوجد فيها مجال مغناطيسي يعطى بالعلاقة التالية $\vec{B} = (\hat{\imath} + 2\hat{\jmath} - \hat{k})\text{T}$. ما مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة على هذا الجسيم؟

9. يتحرك بروتون عموديا على مجال مغناطيسي منتظم $\vec{B}$ بسرعة مقدارها 1.00×10^{7}m/s ويتعرض لتسارع مقداره 2.00×10^{13}m/s^2 في اتجاه محور x الموجب عندما تكون سرعته في اتجاه محور z الموجب. حدد مقدار واتجاه المجال المغناطيسي.

10. Q|C مغناطيس كهربي ينتج مجالا مغناطيسيا شدته 5.00×10^{6}m/s. (a) اوجد مقدار اقصى قوة مغناطيسية تؤثر على بروتون. (b) ما مقدار اقصى تسارع يتعرض له البروتون؟ (c) هل يبذل المجال المغناطيسي نفس القوة على الكترون يتحرك في نفس المجال وبنفس السرعة؟ (d) هل يتعرض الالكترون لنفس التسارع؟ اشرح اجابتك.

11. جسيم مشحون كتلته 1.50 g يتحرك بسرعة مقدارها 1.50×10^{4}m/s. فجأة تعرض الجسيم لمجال مغناطيسي مقدارها 0.150 mT في اتجاه عمودي على سرعته تم تشغيل المجال المغناطيسي وايقافه في فترة زمنية مقدارها 1.00s. خلال هذه الفترة الزمنية اعتبر ان مقدار واتجاه سرعة الجسيم لا يتعرضان إلى أي تغير، لكن الجسيم يتحرك مسافة مقدارها 0.150 m في اتجاه عمودي على السرعة. اوجد الشحنة على الجسيم.

الفصل 2.1 حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي منتظم Motion of a Charged Particle in a Uniform Magnetic Field

12. يتحرك الكترون في مسار دائري عموديا على مجال مغناطيسي منتظم مقداره 2.00 mT. اذا كانت سرعة الالكترون 1.50×10^7 m/s، حدد (a) نصف قطر المسار الدائري و(b) الفترة الزمنية اللازمة لاكمال دورة واحدة.

13. S تم تسريع بروتون (شحنة $+e$ وكتلته m_p) وديتيريون (شحنة $+e$ وكتلته $2m_p$) وجسيم الفا (شحنته $+2e$ وكتلته $4m_p$) من السكون خلال فرق جهد مقداره ΔV. دخلت الجسيمات الثلاثة مجالا مغناطيسيا منتظما $\vec{B}$ كلا حسب سرعته وفي اتجاه عموديا على المجال المغناطيسي. يتحرك البروتون في مسار دائري نصف قطره r_p. بدلالة r_p حدد (a) نصف قطر r_d للمسار الدائري للديتيريون و(b) نصف قطر r_α لجسيم الفا.

14. Q|C جهد تعجيل مقداره 2.50×10^3V تم تطبيقه على مدفع الكتروني ينتج شعاع من الالكترونات تتحرك افقيا في اتجاه الشمال في الفراغ في اتجاه شاشة عرض تبعد مسافة مقدارها 35.0 cm. ما هو (a) مقدار و(b) اتجاه انحراف الالكترونات على الشاشة الناتج عن مجال الجاذبية الأرضية؟ ما هو (c) مقدار و(d) اتجاه الانحراف على الاشاشة الناتج عن المركبة الرأسية للمجال المغناطيسي الأرضي والذي يعتبر في اتجاه الأسفل ومقداره 20.0 μT؟ (e) هل يتحرك الكترون في هذا المجال المغناطيسي الرأسي في مسار يشبه مسار المقذوف، بمتجه تسارع ثابت عمودي على المركبة الشمالية للسرعة الثابتة؟ (f) هل يعتبر هذا تقريب جيد عند اعتبار الالكترون يتحرك في مسار يشبه مسار المقذوف؟ اشرح.

15. يتصادم الكترون مع الكترون اخر في حالة سكون تصادما مرنا. بعد التصادم، كان نصف قطر مسارهما هو 1.00 cm و2.40 cm. المسارين متعامدين على مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.044 T. احسب الطاقة بوحدة keV للالكترون الساقط.

16. S يتصادم الكترون مع الكترون اخر في حالة سكون تصادما مرنا. بعد التصادم، كان نصف قطر مسارهما هو r_1 وr_2. المسارين متعامدين على مجال مغناطيسي منتظم

مقداره B. احسب الطاقة بوحدة keV للالكترون الساقط.

17. يتحرك الكترون في مسار دائري عموديا على مجال مغناطيسي ثابت مقداره 1.00 mT. العزم الزاوي للالكترون حول مركز الدوران هو 4.00×10^{-25} kg.m^2/s. احسب (a) نصف قطر المسار الدائري و(b) سرعة الالكترون.

18. S جسيم شحنته q وطاقة حركته k يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم مقداره B. اذا كان الجسيم يتحرك في مسار دائري نصف قطره R، اوجد صيغة لـ (a) سرعته و(b) كتلته.

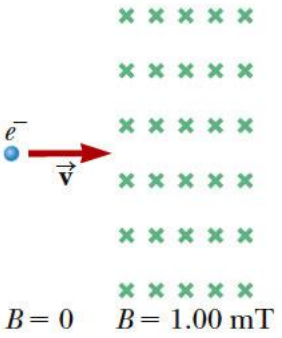
19. يمتلك بروتون اشعة كونية في الفضاء الخارجي طاقة مقدارها 10.0 MeV ويتحرك في مدار دائري نصف قطره يساوي مدار عطارد حول الشمس (5.80×10^{10} m). ما مقدار المجال المغناطيسي في هذه المنطقة من الفضاء؟

20. Q|C كرة معدنية كتلتها 30.0 g تمتلك شحنة كلية مقدارها Q=5.00μC القيت من النافذة في اتجاه الشمال افقيا بسرعة مقدارها v=20.0m/s. كان ارتفاع النافذة على سطح الأرض هو h=20.0m. مجال مغناطيسي افقي منتظم مقداره B=0.010T عموديا على مستوى مسار الكرة وفي اتجاه الغرب. (a) افترض ان الكرة تسقط في نفس المسار كما في حالة غياب المجال المغناطيسي، اوجد القوة المغناطيسية المؤثرة على الكرة قبل ان تصطدم بالأرض. (b) بالاعتماد على نتيجة الجزء (a)، افترضنا ان المسار لا يتأثر بالمجال المغناطيسي؟ اشرح.

21. تم تعجيل ايون احادي الشحنة كتلته m من السكون في فرق جهد ΔV. من ثم انحرف عن طريق مجالا مغناطيسيا منتظما (عموديا على سرعة الايون) في مسار نصف دائري نصف قطره R. الان تم تعجيل ايون ثنائي الشحنة كتلته m' خلال نفس فرق الجهد وانحرف بواسطة مجال مغناطيسي في مسار نصف دائري نصف قطره $R' = 2R$. ما هي نسبة كتل الايونات؟

22. افترض ان المنطقة إلى اليمين لمستوى معين يحتوي على مجال مغناطيسي منتظم مقداره 1.00 mT والمجال يساوي صفر في المنطقة على اليسر للمستوى الموضح في الشكل

P1.22. تحرك الكترون في البداية في اتجاه عموديا على حد المستوى ومر في منطقة المجال. (a) حدد الفترة الزمنية اللازمة للالكترون لكي يترك منطقة المجال مع ملاحظة ان مسار الالكترون هو مسار نصف دائري. (b) افترض اقصى عمق تصل له الالكترونات في المجال هو 2.00 cm، اوجد طاقة حركة الالكترون.



الشكل P1.22

الفصل 1.3 تطبيقات تشتمل على جسيمات تتحرك في مجال مغناطيسي
Applications Involving Charged Particles Moving in a Magnetic Field

23. اعتبر مطياف الكتلة الموضح في الشكل 1.14. مقدار المجال الكهربي بين لوحي مرشح السرعة هو 2.50×10^{3} V/m، والمجال المغناطيسي في كلا من مرشح السرعة وحجيرة الانحراف هو 0.035 T. احسب نصف قطر مسار ايون احادي الشحنة كتلته $m = 2.18\times10^{-26}$ kg.

24. تم تصميم سيكلترون لتعجيل بروتونات يمتلك مجالا مغناطيسيا مقداره 0.450 T على منطقة نصف قطرها 1.20m. ماذا مقدار (a) تردد السيكلترون و(b) اقصى سرعة تكتسبها البروتونات؟

25. مرشح سرعة يتكون من مجال كهربي ومجال مغناطيسي يوصف بالمعادلتين $\vec{\boldsymbol{E}} = E\hat{\mathbf{k}}$ و$\vec{\boldsymbol{B}} = B\hat{\jmath}$ حيث ان B = 15.0 mT. اوجد قيمة E التي تجعل مسار الكترونات طاقتها 750 eV تتحرك في اتجاه محور x السالب دون ان تنحرف.

26. Q|C تم تعجيل ايونات يورانيوم 238 أحادية الشحنة خلال فرق جهد 2.00 kV ودخلت مجالا مغناطيسيا مقداره 1.20 T في اتجاه عموديا على سرعتها. (a) احسب نصف قطر مسارها الدائري. (b) اعد الحسابات لايونات يورانيوم 235. (c) ماذا لو؟ كيف تعتمد نسبة نصفي المسارين على جهد التعجيل؟ (d) وعلى مقدار المجال المغناطيسي؟

27. تم تصميم سيكلترون كما هو موضح في الشكل 16.1 ليعجل بروتونات نصف قطره الخارجي 0.350 m. انطلقت البروتونات من السكون من مصدر عند المركز وتم تعجيلها خلال جهد مقداره 600 V في كل مرة تعبر الفجوة بين الـ D1 وD2. يقع كلا من الـ D1 وD2 بين قطبي مغناطيس كهربي يعطي مجالا مغناطيسيا مقداره 0.800 T. (a) اوجد تردد السيكلترون للبروتونات في هذا السيكلترون. اوجد (b) سرعة خروج البروتونات من السيكلترون. و(c) اقصى طاقة حركة لهم. (d) كم عدد الدورات التي يقوم بها البروتون في السيكلترون؟ (e) ما مقدار الفترة الزمنية التي يقضيها البروتون في مرحلة التعجيل؟

28. Q|C جسيم في السيكلترون الموضح في الشكل 16.1 a يكتسب طاقة مقدارها $q\Delta V$ من مصدر طاقة متردد كل مرة يمر فيها من نصف حلقة D إلى الأخرى. الفترة الزمنية لكل دورة تعطى بالمعادلة

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

وبالتالي يكون متوسط معدل الزيادة في الطاقة الجسيم على النحو التالي:

$$\frac{2q\Delta V}{T} = \frac{q^2 B\Delta V}{\pi m}$$

لاحظ ان هذه القدرة ثابتة مع الزمن. على الجانب الأخرى يكون معدل الزيادة في نصف قطر r مساره غير ثابتا. (a) اثبت ان معدل الزيادة في نصف قطر مسار الجسيم يعطى بالمعادلة التالية:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{r}\frac{\Delta V}{\pi B}$$

(b) صف كيف يكون مسار الجسيم في الشكل 16.1 a متوافقا مع نتيجة الجزء (a). (c) عند أي معدل يكون الموضع القطري للبروتونات في السيكلترون يزداد مباشرة قبل ان تترك البروتونات السيكلترون؟ افترض ان السيكلترون يمتلك نصف قطر خارجي مقداره 0.350 m، وجهد تعجيل مقداره $\Delta V = 600$ V، ومقدار المجال المغناطيسي 0.800 T. (d) ما مقدار الزيادة في نصف قطر مسار البروتونات خلال اخر دورة كاملة؟

29. انبوبة تلفزيون ابيض واسود قديمة تستخدم ملفات انحراف مغناطيسية بدلا من الواح انحراف كهربائية. افترض ان شعاع الالكترونات يعجل خلال فرق جهد مقداره 50.0 kV ومن ثم يمر في منطقة مجال مغناطيسي منتظم اتساعها 1.00 cm. شاشة التلفزيون تقع على بعد مسافة مقدارها 10.0 cm من مركز ملفات الانحراف واتساع الشاشة 50.0 cm. عند اغلاق المجال المغناطيسي فان شعاع الالكترونات يصطدم في مركز الشاشة. باهمال التصحيحات النسبية، ما مقدار المجال اللازم لانحراف شعاع الالكترونات إلى جانب الشاشة؟

30. Q|C في تجربة ج ج طومسون باستخدام اشعة المهبط خلال اكتشافه للالكترون بين طومسون ان نفس انحراف الشعاع الناتجة عن انابيب تمتلك كاثود مصنوع من مواد مختلفة وتحتوي على غازات متنوعة قبل تفريغها. (a) هل هذه الملاحظات هامة؟ اشرح اجابتك. (b) عندما طبق فرق جهد مختلف على الواح الانحراف وشغل ملفات المجال المغناطيسي بمفردها او مع الواح الانحراف، لاحظ طومسون ان شاشة الفلوريسنت تستمر في عرض بقعة متوهجة واحدة. ناقش اذا ما كانت هذه الملاحظة مهمة. (c) قم باجراء حسابات تبين ان نسبة الشحنة إلى الكتلة التي حصل عليها طومسون كانت كبيرة بالمقارنة مع أي جسيم ميكروسكوبي او ذرة او متأينة او جزيئ. كيف يمكن ان نستفيد من هذه المقارنة؟ (d) هل لاحظ طومسون أي انحراف نتيجة لمجال الجاذبية الأرضية؟ قم باجراء حسابات لتوضح بها اجابتك. لاحظ انه للحصول على بقعة متوهجة على شاشة الفلوريسنت، فان فرق الجهد بين الشق والكاثود يجب ان تكون 100 V أو اكثر.

الفصل 4.1 القوة المغناطيسية المؤثرة على موصل يمر فيه تيار كهربي
Magnetic Force Acting on a Current-Carrying Conductor

31. موصل يمر فيه تيار كهربي مقداره I=15.0 A في اتجاه محور x الموجب وعموديا على مجال مغناطيسي منتظم. قوة مغناطيسية مقدارها 0.120 N/m تؤثر على الموصل في اتجاه محور y السالب. احسب (a) مقدار و(b) اتجاه المجال المغناطيسي في المنطقة التي فيها التيار الكهربي.

32. Q|C سلك مستقيم يمر فيه تيار كهربي مقداره 3.00 A موضوع في مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.280 T عموديا على السلك. (a) اوجد مقدار القوة المغناطيسية المؤثرة على مقطع من السلك طوله 14.0 cm. (b) اشرح لماذا لا يمكن تحديد اتجاه القوة المغناطيسية من المعلومات المتوفرة في المسألة.

33. سلك يمر فيه تيار كهربي ثابت مقداره 2.40 A. جزء مستقيم من السلك طوله 0.750 m يقع على امتداد محور x داخل مجال مغناطيسي $\vec{\boldsymbol{B}} = 1.60\hat{\mathbf{k}}\ \text{T}$. اذا كان التيار في اتجاه محور x الموجب، ما هي قيمة القوة المغناطيسية على هذا الجزء من السلك؟

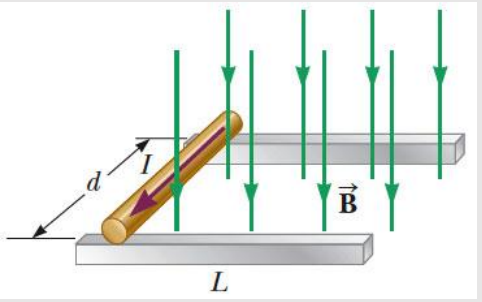
34. سلك طوله 2.80 m يمر فيه تيار كهربي مقداره 5.00 A في منطقة يوجد فيها مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.490 T. احسب مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على السلك مع افتراض او الزاوية بين المجال المغناطيسي والتيار هي (a) 60.0^{o} و(b) 90.0^{o} و(c) 120^{o}.

35. سلك كتلته لكل وحدة طول هي 0.500 g/cm يمر فيه تيار كهربي مقداره 2.00 A في اتجاه افقي نحو الجنوب. ما هو (a) الاتجاه و(b) مقدار اقل مجال مغناطيسي لازم لرفع السلك رأسيا إلى الأعلى؟

36. لماذا هذه الحالة مستحيلة؟ تخيل سلك من النحاس نصف قطره 1.00 mm يلف الكرة الأرضية عند خط الاستواء المغناطيسي الأرضي، حيث يكون اتجاه المجال افقيا. مصدر للطاقة يعطي طاقة كهربية للسلك بقدرة 100 MW للحفاظ على شدة التيار فيه،

وفي اتجاه بحيث تكون القوة المغناطيسية من المجال المغناطيسي الأرضي إلى الأعلى. نتيجة لهذا التيار فان السلك يرتفع فورا فوق الأرض.

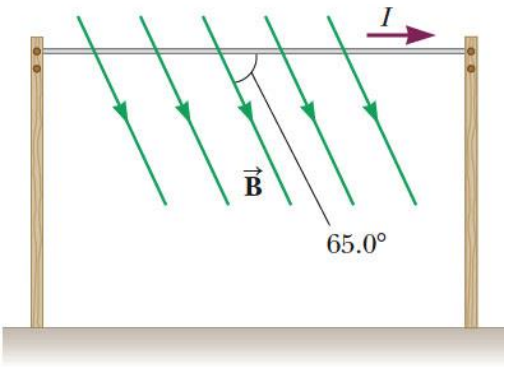
37. ساق كتلته 0.720 kg ونصف قطره 6.00 cm مستقرا على قضيبين متوازيين كما هو موضح في الشكل P1.37 حيث تفصلهما مسافة مقدارها d = 12.0 cm وطوله L = 45.0 cm. يمر في الساق تيار كهربي مقداره I = 48.0A في الاتجاه الموضح في الشكل ويتدحرج على امتداد القطبين بدون ان ينزلق. مجال مغناطيسي مقداره 0.240 T في اتجاه عموديا على الساق والقضيبين. اذا بدأ من السكون، ما مقدار سرعة الساق لحظة مغادرته القضيبين؟



الشكل P1.37

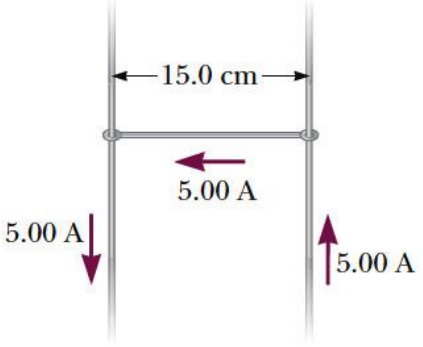
37. S ساق كتلته m ونصف قطره R مستقرا على قضيبين متوازيين كما هو موضح في الشكل P1.37 حيث تفصلهما مسافة مقدارها d وطوله L. يمر في الساق تيار كهربي مقداره I في الاتجاه الموضح في الشكل ويتدحرج على امتداد القطبين بدون ان ينزلق. مجال مغناطيسي مقداره B في اتجاه عموديا على الساق والقضيبين. اذا بدأ من السكون، ما مقدار سرعة الساق لحظة مغادرته القضيبين؟

39. سلك كهربائي افقي طوله 58.0 m يمر فيه تيار مقداره 2.20 kA في اتجاه الشمال كما هو موضح في الشكل P1.39. المجال المغناطيسي الأرضي عند هذا الموقع مقداره 5.00×10^{-5} T. المجال عند هذا الموقع في اتجاه الشمال عند زاوية مقدارها 65.0° اسفل سلك الكهرباء. اوجد (a) مقدار و(b) اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على سلك الكهرباء.



الشكل P1.39

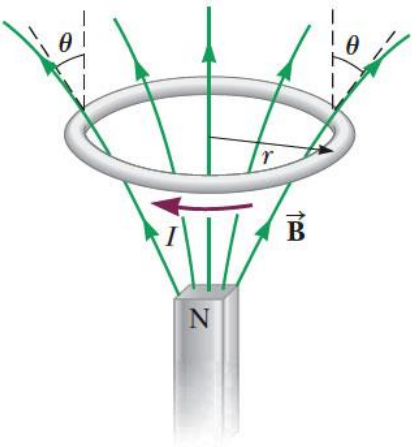
40. Q|C اعتبر النظام الموضح في الشكل P1.40. سلك افقي طوله 15.0 cm كتلته 15.0 g موضوع بين موصلين رفعين في اتجاه افقي ويؤثر عليه مجال مغناطيسي منتظم عموديا على الصفحة. السلك حر الحركة في الاتجاه الرأسي بدون احتكاك على الموصلين الرأسيين. عندما يمر فيه تيار كهربي مقداره 5.00 A في الاتجاه الموضح في الشكل، يتحرك السلك الافقي للأعلى بسرعة ثابتة في وجود الجاذبية الأرضية. (a) ما مقدار القوى المؤثرة على السلك الافقي، و(b) ما هو الشرط الذي يكون عنده السلك قادرا على الحركة إلى الأعلى بسرعة ثابتة؟ (c) اوجد مقدار واتجاه ادنى مجال مغناطيسي لكي يتحرك السلك بسرعة ثابتة. (d) ماذا يحدث اذا ازداد المجال المغناطيسي عن ادنى قيمة؟



الشكل P1.40

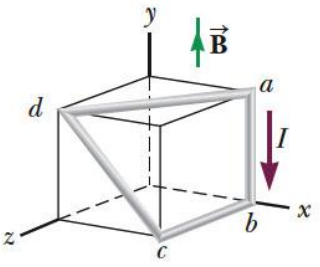
41. S وضع مجالا مغناطيسيا تحت حلقة افقية من مادة موصلة نصف قطر الحلقة r يمر فيها تيار كهربي مقداره I كما هو موضح في الشكل P1.41. اذا كان المجال المغناطيسي $\vec{B}$

يصنع زاوية θ مع الاتجاه الرأسي للحلقة، ما هو (a) مقدار و(b) اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على الحلقة؟



الشكل P1.41

42. Q|C في الشكل P1.42، مكعب طول ضلعه 40.0 cm. أربعة مقاطع سلك مستقيمة هي ab وbc وcd وda تشكل حلقة مغلقة تحمل تيار كهربي مقداره $I = 5.00$ A في الاتجاه الموضح في الشكل. مجالا مغناطيسيا مقداره $B = 0.20$ T في اتجاه محور y الموجب. حدد متجه القوة المغناطيسية المؤثر على (a) ab و(b) bc و(c) cd و(d) da. (e) اشرح كيف يمكن ان تجد القوة المؤثرة على القطعة الرابعة الناتج عن القوى المؤثرة على الثلاثة الأخرى بدون أي حسابات تتضمن المجال المغناطيسي.



الشكل P1.42

43. افترض ان مقدار المجال المغناطيسي الأرضي يساوي 52.0 μT في اتجاه الشمال عند زاوية مقدارها 60.0° تحت الانبوبة نيون بين ركنين متقابلين قطريين لنافذة متجر تقع في

المستوى الرأئي في اتجاه الشمال الجنوبي ويمر فيها تيار كهربي مقداره 35.0 mA. يدخل التيار الكهربي الانبوبة من الركن الأسفل الجنوبي والذي يبعد مسافة 1.40 m عن الركن الشمالي المرتفع عن الركن الجنوبي بمقدار 0.850 m. احسب متجه القوة المغناطيسية الكلي المؤثر على الانبوبة. مساعدة: من الممكن ان تستعين بأول جملة هامة في خلاصة المثال 4.1.

الفصل 5.1 عزم الازدواج المؤثر على حلقة تيار في مجال مغناطيسي منتظم
Torque on a Current Loop in a Uniform Magnetic Field

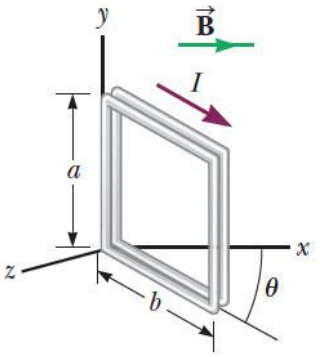
44. تيار مقداره 17.0 mA يمر في حلقة دائرية يبلغ محيطها 2.00 m. مجال مغناطيسي مقداره 0.800 T في اتجاه موازي لمستوى الحلقة. (a) احسب العزم المغناطيسي للحلقة. (b) ما مقدار عزم الازدواج الناتج عن المجال المغناطيسي والمؤثر على الحلقة؟

45. Q|C إبرة خياطة ممغنطة لها عزم مغناطيسي مقداره $9.70\ \text{mA.m}^2$. المجال المغناطيسي الأرضي عند الإبرة مقداره 55.0 μT في اتجاه الشمالي عند زاوية 48.0° اسفل الافقي. حدد اتجاهات الابرة التي تمثل (a) اقل طاقة وضع و(b) اقصى طاقة وضع لنظام الابرة والمجال المغناطيسي. (c) ما مقدار الشغل الذي يجب ان بذله على النظام لتحريك الابرة من اتجاه ادنى طاقة جهد إلى اتجاه اقصى طاقة جهد؟

46. ملف يتكون من 50 لفة نصف قطره 5.00 cm يمكن ان يأخذ أي اتجاه في مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.500 T. اذا كان التيار المار في الملف مقداره 25.0 mA، اوجد مقدار اقصى عزم ازدواج يؤثر على الملف.

47. يتكون ملف مستطيل الشكل من عدد من اللفات $N = 100$ له ابعاد $a = 0.400$ m و$b = 0.300$ m. تم تعليق الملف على امتداد محور y ومستوى الملف يصنع زاوية مقدارها $\theta = 30.0^{\circ}$ مع محور x كما هو موضح في الشكل P1.47. (a) ما مقدار عزم الازدواج المؤثر على الملف الناتج عن مجال مغناطيسي منتظم مقداره $B = 0.800$ T في اتجاه محور x الموجب عندما يكون التيار مقداره $I = 1.20$ A في الاتجاه الموضح في الشكل؟ (b) ما هو الاتجاه

المتوقع لدوران الملف؟



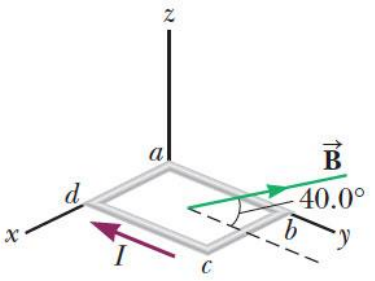
الشكل P1.47

48. دوار في موتور كهربي له شكل مسطح، ويتكون من ملف مستطيل الشكل من 80 لفة عرضه 2.50 cm وطوله 4.00 cm. يدور الدوار في مجال مغناطيسي منتظم شدته 0.800 T. عندما يكون مستوى الدوار عموديا على المجال المغناطيسي يمر في الدوار تيار كهربي مقداره 10.0 mA. في هذا الاتجاه يكون العزم المغناطيسي للدوار في اتجاه معاكس للمجال المغناطيسي. من ثم يدور الدوار خلال نصف دورة. تتكرر هذه العملية لتسبب للدوار ان يلتف بشكل مستقر بسرعة زاوية مقدارها 3.60×10^3 rev/min. (a) اوجد اقصى عزم ازدواج يؤثر على الدوار. (b) اوجد اقصى قدرة ناتجة من الموتور. (c) حدد مقدار الشغل الناتج عن تأثير المجال المغناطيسي على الدوار في دورة كاملة. (d) ما مقدار متوسط القدرة على الموتور؟

49. تم تشكيل سلك في صورة دائرة قطرها 10.0 cm ووضعت في مجال مغناطيسي منتظم مقداره 3.00 mT. يحمل السلك تيار كهربي مقداره 5.00 A. (a) اوجد اقصى عزم ازدواج يؤثر على السلك و(b) مدى طاقات الوضع لنظام السلك والمجال لاتجاهات مختلفة للحلقة الدائرية.

50. Q|C حلقة من سلك مستطيل الشكل طول ضلعها 0.500 m وعرضها 0.300 m. تتمركز الحلقة على محور x وتقع في المستوى xy كما هو موضح في الشكل P1.50. وضعت الحلقة في مجال مغناطيسي منتظم مقداره 1.50T وموجه بزاوية 40.0^o بالنسبة لمحور y مع

خطوط المجال توازي المستوى *yz*. يمر تيار كهربي في الحلقة مقداره 0.900 A في الاتجاه الموضح في الشكل (اهمل الجاذبية الأرضية). نرغب في إيجاد مقدار عزم الازدواج المؤثر على حلقة التيار. (a) ما هو اتجاه القوة المغناطيسية المبذولة على مقطع السلك *ab*؟ (b) ما هو اتجاه عزم الازدواج المرتبط مع هذه القوة حول محور خلال نقطة الأصل؟ (c) ما هو اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على المقطع *cd*؟ (d) ما هو اتجاه عزم الازدواج المرتبط مع هذه القوة حول محور يمر خلال نقطة الأصل؟



الشكل P1.50

(e) هل يمكن للقوى ان تختبر الجزأين (a) و(c) مندمجين معا ليتسببا في دوران الحلقة حول المحور *x*؟ (f) هل يمكن ان يؤثرا على حركة الحلقة على أي حال؟ اشرح؟ (g) ما هو اتجاه القوة المغناطيسية المبذول على المقطع *bc*؟ (h) ما هو اتجاه عزم الازدواج المرتبط مع هذه القوة حول محور يمر خلال نقطة الأصل؟ (i) ما مقدار عزم الازدواج المؤثر على المقطع *ab* حول محور يمر بنقطة الأصل؟ (j) من خلال الشكل P1.50 بمجرد افلات الحلقة من السكون عند الموضع الموضح، هل سوف تدور مع عقارب الساعة او عكس عقارب الساعة حول المحور *x*؟ (k) احسب مقدار العزم المغناطيسي للحلقة. (l) ما هي الزاوية بين متجه العزم المغناطيسي والمجال المغناطيسي؟ (m) احسب عزم الازدواج المؤثر على الحلقة باستخدام نتائج الجزأين (k) و(l).

الفصل 6.1 تأثير هول The Hall Effect

51. في تجربة صممت لقياس المجال المغناطيسي الأرضي باستخدام تأثير هول، وضعت شريحة من النحاس سمكها 0.500cm على امتداد الاتجاه من الشرق إلى الغرب. افترض ان $n = 8.46\times10^{28}\text{electron/m}^3$ وادير مستوى الشريحة ليصبح عموديا على اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{\boldsymbol{B}}$. اذا كان تيار مقداره 8.00 A يمر في الموصل وينتج عنه جهد هول مقداره $5.10\times10^{-12}\text{V}$، ما مقدار المجال المغناطيسي الأرضي عن هذا الموقع؟

52. مجس تأثير هول يعمل بتيار مقداره 120-mA. عندما وضع المجس في مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.080 T، فانه ينتج جهد هول مقداره 0.700 μV. (a) عند استخدامه لقياس مجال مغناطيسي مجهول اعطى جهد هول مقداره 0.330 μV. ما مقدار هذا المجال؟ (b) سمح المجس في اتجاه المجال المغناطيسي $\vec{\boldsymbol{B}}$ هو 2.00 mm. اوجد كثافة حاملات الشحنة علما بان مقدار شحنة كل منها هي شحنة الالكترون e.

إجابات أسئلة للتفكير

1. (e)

2. (i) (b) (ii) (a)

3. (c)

4. (i) (c), (b), (a) (ii) (a) 5 (b) 5 (c)

إجابات الأسئلة الفردية

1. (a) في اتجاه محور z السالب (b) في اتجاه محور z الموجب (c) القوة المغناطيسية تساوي صفر في هذه الحالة.

3. (a) في اتجاه الدخول على الصفحة (b) في اتجاه اليمين (c) في اتجاه الأسفل من الصفحة.

5. (a) 1.25×10^{-13} N (b) 7.50×10^{13} m/s^2

7. (a) 7.91×10^{-12} N (b) zero

9. $-20.9\,\hat{j}$ mT

11. 200 μC

13. (a) $\sqrt{2}r_p$ (b) $\sqrt{2}r_p$

15. 115 keV

17. (a) 5.00 cm (b) 8.79×10^6 m/s

19. 7.88×10^{-12} T

21. 8.00

23. 0.278 m

25. 244 kV/m

27. (a) 7.66×10^7 s^{-1} (b) 2.68×10^7 m/s (c) 3.75 MeV
(d) 3.13×10^3 revolutions (e) 2.57×10^{-4} s

29. 70.0 mT

31. (a) 8.00×10^{-3} T

(b) في اتجاه محور z الموجب

33. $-2.88\,\hat{j}$ N

35. (a) اتجاه الشرق (b) 0.245 T

37. 1.07 m/s

39. (a) 5.78 N (b) في اتجاه الدخول على الصفحة

41. (a) $2\pi rIB \sin\theta$ (b) في اتجاه الأعلى مبتعدا عن المغناطيس

43. 2.98 μN في اتجاه الغرب

45. إلى الشمال بزاوية مقدارها 48.0^{o} اسفل الافقي (b) إلى الجنوب بزاوية 48.0^{o} فوق الافقي (c) 1.07 mJ.

47. (a) 9.98 N . m

(b) مع عقارب الساعة عند النظر للأسفل من موضع على محور y الموجب.

49. (a) 118 μN . m (b) $-118\ \mu J \leq U \leq +118\ \mu J$

51. 43.2 μT

د. حازم فلاح سكيك
استاذ الفيزياء المشارك بجامعة الازهر – غزة

- رئيس قسم الفيزياء بجامعة الازهر - غزة في الفترة 1993-1998
- مؤسس وعميد كلية الدراسات المتوسطة بجامعة الازهر - غزة من الفترة 1996-2005
- عميد القبول والتسجيل بجامعة الازهر - غزة في الفترتين 1998-2000 و2007-2008
- مدير الحاسب الالي بجامعة الازهر - غزة في الفترة من 1994-2000
- رئيس وحدة تكنولوجيا المعلومات بجامعة الازهر - غزة في الفترة من 2000-2005
- مؤسس موقع الفيزياء التعليمي
- مؤسس اكاديمية الفيزياء للتعليم الالكتروني
- مؤسس مركز الترجمة العلمي
- مؤسس قناة الفيزياء التعليمي على اليوتيوب
- مؤسس ورئيس تحرير مجلة الفيزياء العصرية

لمزيد من المعلومات يرجى زيارة

المؤسسة الإعلامية لشبكة الفيزياء التعليمية

www.hazemsakeek.net