

Chương 29:

TỪ TRƯỜNG

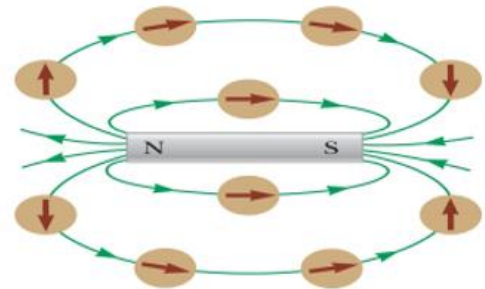
Nhiều nhà lịch sử khoa học tin rằng la bàn mà thực chất là kim nam châm được sử dụng ở Trung Quốc từ thế kỷ 13 TCN là phát minh của người Ả Rập hoặc người Ấn Độ. Người Hy Lạp biết đến từ tính từ 800 TCN do việc phát hiện ra những viên đá từ (Fe_3O_4) hút vụn sắt. Năm 1269, Pierre de Maricourt nhận thấy rằng nam châm với bất kỳ hình dạng nào đều có hai cực, được gọi là cực bắc và cực nam. Hai nam châm cùng cực thì đẩy nhau, trái cực thì hút nhau. Tên gọi cực bắc và cực nam được đặt xuất phát từ định hướng của kim la bàn (thanh nam châm) theo hướng bắc nam của Trái đất do tồn tại từ trường Trái đất. Năm 1600, William Gilbert mở rộng thí nghiệm của Maricourt cho nhiều loại vật liệu khác nhau, đồng thời nhận thấy rằng kim nam châm luôn định hướng theo một phương nhất định, từ đó ông đưa ra giả thiết rằng Trái đất là một nam châm vĩnh cửu khổng lồ. Năm 1819, mối liên hệ giữa hiện tượng điện và từ được phát hiện bởi Hans Christian Oersted. Và mối liên hệ mật thiết hơn giữa chúng được thực hiện bởi Faraday và Joseph Henry một cách độc lập với nhau vào những năm 1820. Kết quả cho thấy dòng điện có thể được tạo ra trong vòng dây dẫn kín khi cho một thanh nam châm ở gần chuyển động hoặc là đặt một dòng điện biến thiên gần nó. Chương này khảo sát lực tác động lên các điện tích chuyển động và lên các dây dẫn có dòng điện khi có sự xuất hiện của từ trường trong không gian.

29.1. TỪ TRƯỜNG VÀ LỰC TỪ

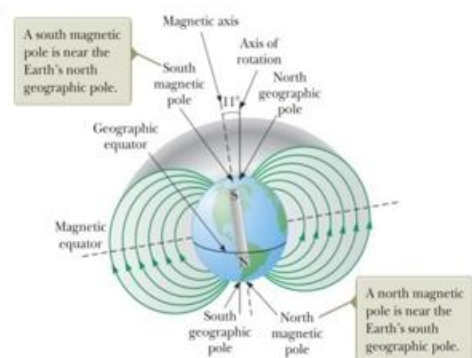
Vùng không gian xung quanh điện tích đứng yên tồn tại một điện trường, nhưng khi điện tích chuyển động thì không gian đó còn có thêm cả từ trường. Ngoài ra, từ trường còn tồn tại xung quanh vật chất có từ tính, đó là loại vật liệu tạo nên nam châm.

Từ trường được đặc trưng bởi vector cảm ứng từ \vec{B} , kim nam châm sẽ chỉ theo phương của vector cảm ứng từ \vec{B} khi được đặt trong từ trường. Người ta thường vẽ những đường sức từ để mô tả một từ trường.

Trái đất có từ trường và được coi như là thanh nam châm khổng lồ. Kim nam châm có cực bắc chỉ về hướng cực bắc địa lý của Trái đất, tức là cực nam từ trường Trái đất và ngược lại cực nam của nam châm hướng về cực nam địa lý mà đó chính là cực bắc từ trường Trái đất. Ở vùng xích đạo thì kim nam châm có phương song song với bề mặt Trái đất. Nhưng càng đi lên về hướng bắc địa lý thì kim nam châm chúi dần xuống bề mặt Trái đất cho đến khi lên tới điểm gần cực bắc tại vùng vịnh Hudson của



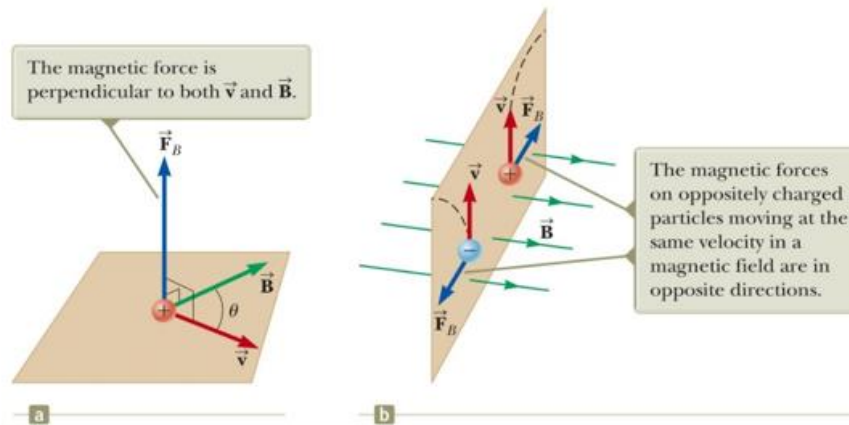
Hình 29.1: Đường sức từ trường xung quanh thanh nam châm



Hình 29.2: Từ trường của trái đất

Cannada thì kim nam châm có phương thẳng đứng hướng xuống mặt đất. Điểm này chính là cực nam từ trường Trái đất, được tìm thấy đầu tiên năm 1832, và vị trí này thay đổi dần theo thời gian do sự biến đổi cấu tạo bên trong lõi của Trái đất. Các nhà khoa học cho rằng từ trường Trái đất được hình thành do những dòng đối lưu trong lõi Trái đất. Các ion hoặc electron theo các dòng này và tạo ra từ trường. Ngoài ra cường độ từ trường của một hành tinh cũng liên hệ với tốc độ quay của hành tinh. Chúng ta có thể xác định vector cảm ứng từ \vec{B} bằng cách dùng mô hình hạt trong trường. Sự tồn tại của từ trường ở một điểm trong không gian được xác định bằng cách đo lực từ \vec{F}_B tác dụng lên một điện tích thử đặt tại đó. Thí nghiệm trên nhiều hạt điện tích cho kết quả là:

- Độ lớn F_B thì tỷ lệ với điện tích q và vận tốc v của hạt.
- Khi điện tích chuyển động song song với phương của vector cảm ứng từ \vec{B} thì lực tác dụng lên điện tích bằng 0.
- Khi điện tích chuyển động theo phương không song song với phương của vector \vec{B} ($\theta \neq 0$, là góc giữa \vec{B} và \vec{v}) thì lực tác dụng lên điện tích có phương vuông góc với cả phương của \vec{B} và \vec{v} (hình 29.3a).
- Lực từ tác dụng lên hạt mang điện tích dương có chiều ngược với lực từ tác dụng lên hạt mang điện tích âm khi chúng chuyển động theo cùng một chiều (hình 29.3b).
- Độ lớn của lực từ thì tỷ lệ với $\sin\theta$.



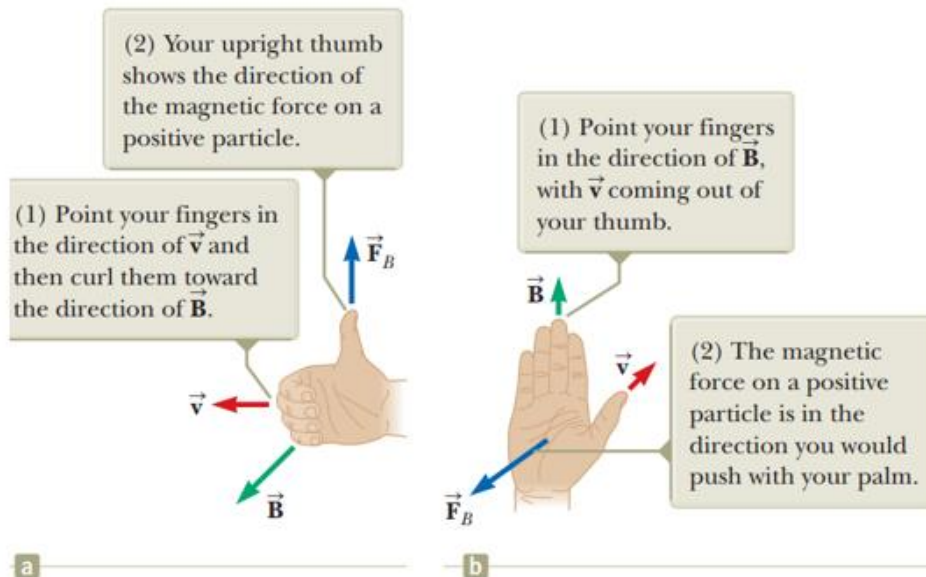
Hình 29.3:

- Phương của lực từ \vec{F}_B tác dụng lên điện tích chuyển động trong từ trường \vec{B}
- Lực từ tác dụng lên hạt mang điện tích dương và hạt mang điện tích âm.

Tổng hợp lại các kết quả trên cho ra lực từ có dạng:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (29.1)$$

\vec{F}_B có phương vuông góc với mặt phẳng chứa \vec{v} , \vec{B} . Theo quy tắc tam diện thuận (có thể thay bằng quy tắc bàn tay), \vec{F}_B có chiều theo chiều ngón tay cái của bạn nếu q dương, và \vec{F}_B có chiều ngược chiều ngón tay cái của bạn nếu q âm.



Hình 29.4: Hình minh họa quy tắc bàn tay phải để tìm chiều của lực từ \vec{F}_B

Độ lớn của lực từ tác dụng lên điện tích bằng

$$F_B = |q|vB \sin\theta \quad (29.2)$$

Câu hỏi nhanh 29.1: Một electron di chuyển hướng lên, trong mặt phẳng của trang giấy này. Vector cảm ứng từ \vec{B} của từ trường cũng nằm trong mặt phẳng của trang giấy và hướng về phía bên phải. Phương, chiều của lực từ lên electron?

- (a) nằm trong trang giấy, hướng lên trên
- (b) nằm trong trang giấy, hướng xuống dưới
- (c) nằm trong trang giấy, chiều từ trái sang phải
- (d) nằm trong trang giấy, chiều từ phải sang trái
- (e) vuông góc với trang giấy, chiều hướng ra
- (f) vuông góc với trang giấy, chiều hướng vô

Bảng 29.1: Giá trị gần đúng của một số từ trường thông dụng

Nguồn từ trường	Độ lớn từ trường (T)
Nam châm siêu dẫn (loại mạnh trong phòng thí nghiệm)	30
Nam châm thông thường (loại mạnh trong phòng thí nghiệm)	2
Máy MRI (trong y học)	1.5

Thanh nam châm	10^{-2}
Bề mặt Mặt trời	10^{-2}
Bề mặt Trái đất	0.5×10^{-4}
Từ trường trong não người (do xung dây thần kinh tạo ra)	10^{-13}

Lực điện và lực từ có một số điểm khác biệt quan trọng sau:

- Vector lực điện thì cùng phương với vector điện trường \vec{E} , trong khi đó lực từ thì có phương vuông góc với vector cảm ứng từ \vec{B} .
- Điện trường thì tác dụng lực lên điện tích đứng yên hoặc chuyển động, còn từ trường chỉ tác dụng lực lên điện tích đang chuyển động.
- Lực điện thì sinh công làm cho điện tích chuyển động, còn lực từ tác dụng lên điện tích chuyển động trong một từ trường dừng thì không sinh công.

Như vậy lực điện thì làm tăng vận tốc của hạt, lực từ thì không làm tăng vận tốc hạt mà chỉ thay đổi phương chuyển động của hạt.

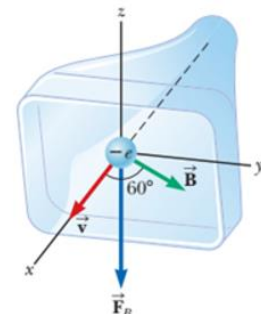
Đơn vị của vector cảm ứng từ \vec{B} theo hệ SI là Tesla (T)

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

Ví dụ 29.1: Electron di chuyển trong từ trường

Ống tia âm cực là một đèn điện tử chân không chứa một hoặc nhiều súng điện tử, và một màn hình lân quang được sử dụng để đẩy nhanh và làm lệch hướng các chùm electron vào màn hình để tạo ra các hình ảnh.

Cho một electron trong một ống tia âm cực di chuyển về phía trước của ống với tốc độ $8 \times 10^6 \text{ m/s}$ dọc theo trục x (Hình 29.4). Bao quanh ống là những cuộn dây tạo ra từ trường có độ lớn 0,025 T, hợp với trục x một góc 60° và nằm trong mặt phẳng xOy. Tính lực từ tác dụng lên electron.



Hình 29.5: Hình minh họa ví dụ 29.1

Bài giải:

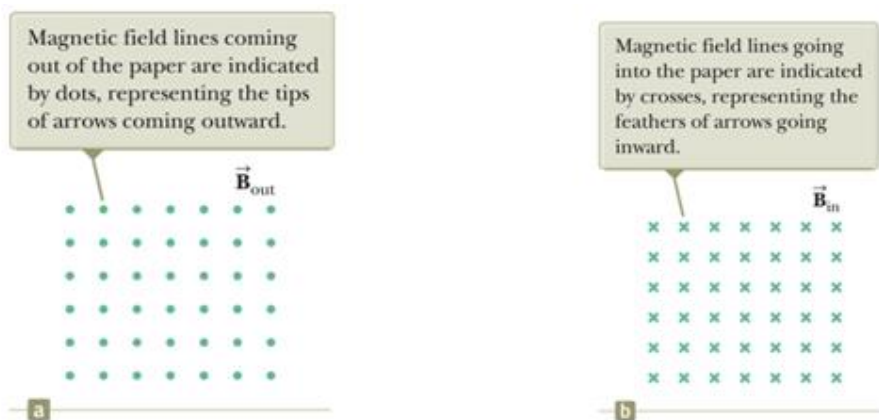
Theo quy tắc tam diện thuận, ta xác định được phương, chiều của lực từ \vec{F}_B như hình 29.4.

Độ lớn lực từ:

$$F_B = |q|vB\sin\theta = (1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(8 \times 10^6 \text{ m/s})(0,025 \text{ T})(\sin 60^\circ) = 2,8 \times 10^{-14} \text{ N}$$

29.2. CHUYỂN ĐỘNG CỦA HẠT MANG ĐIỆN TRONG TỪ TRƯỜNG ĐỀU

Thông thường quy ước phương chiều của vector cảm ứng từ \vec{B} như hình 29.6, nghĩa là vector cảm ứng từ có phương vuông góc mặt phẳng hình vẽ, nếu là dấu chấm (hình 29.6a) thì \vec{B} có chiều hướng ra và ký hiệu là \vec{B}_{out} , còn là dấu nhân (hình 29.6b) thì \vec{B} có chiều hướng vào và ký hiệu là \vec{B}_{in} .



Hình 29.6: Quy ước về phương chiều của \vec{B} đối với mặt phẳng hình vẽ

Trong phần 29.1, chúng ta thấy rằng có lực (gọi là lực từ) tác dụng lên hạt mang điện chuyển động trong từ trường. Lực này có phương vuông góc với phương vận tốc của hạt điện nên lực từ không sinh công. Xét một hạt điện tích dương chuyển động trong từ trường đều với vector vận tốc ban đầu vuông góc với vector cảm ứng từ \vec{B} , trong đó cảm ứng từ \vec{B} có chiều hướng vào mặt phẳng hình vẽ (hình 29.7).

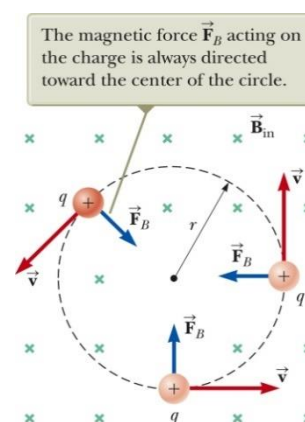
Ta thấy điện tích chuyển động theo quỹ đạo tròn vì lực tác dụng có phương vuông góc với vận tốc. Theo định luật II Newton thì $\vec{F}_B = m\vec{a}$, ở đây chỉ có lực theo phương hướng tâm nên $F_B = qvB = \frac{mv^2}{r}$. Từ đây dẫn đến bán kính quỹ đạo của hạt mang điện tích là:

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (29.3)$$

Từ phương trình cho thấy bán kính quỹ đạo thì tỷ lệ thuận với động lượng của hạt và tỷ lệ nghịch với độ lớn từ trường và điện tích của hạt. Vận tốc góc của hạt là:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \quad (29.4)$$

Chu kỳ chuyển động là:

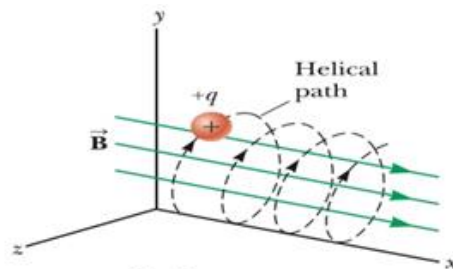


Hình 29.7: Lực từ tác dụng lên điện tích chuyển động trong từ trường đều.

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (29.5)$$

Những kết quả này cho thấy rằng vận tốc góc của hạt và chu kỳ chuyển động của nó thì không phụ thuộc vào vận tốc hạt và bán kính quỹ đạo. Vận tốc góc ω còn được gọi là tần số cyclotron bởi vì hạt điện chuyển động tròn với tần số này trong máy gia tốc cyclotron.

Trường hợp hạt điện chuyển động trong từ trường đều với vận tốc đầu có phương hợp với vector cảm ứng từ trường \vec{B} một góc bất kỳ thì quỹ đạo của hạt điện là đường xoắn ốc (helix) dọc theo phương của vector cảm ứng từ \vec{B} như hình 29.8.



Hình 29.8: Quỹ đạo xoắn ốc của hạt mang điện tích

Trường hợp hạt điện chuyển động trong từ trường không đều, chuyển động của điện tích khá phức tạp.

Câu hỏi nhanh 29.2: Một hạt điện tích chuyển động vuông góc với từ trường theo một đường tròn, bán kính r . Một hạt tương tự, đi vào từ trường, với vận tốc \vec{v} vuông góc với \vec{B} , nhưng tốc độ cao hơn hạt đầu tiên. Bán kính vòng tròn của hạt thứ nhất so với bán kính vòng tròn của hạt thứ hai

- (a) nhỏ hơn
- (b) lớn hơn
- (c) bằng nhau

Ví dụ 29.2: Proton di chuyển vuông góc trong từ trường đều

Một proton chuyển động theo một quỹ đạo tròn, bán kính 14cm trong một từ trường đều mà cảm ứng từ B có độ lớn 0,35T và vận tốc proton vuông góc với từ trường. Tính tốc độ proton.

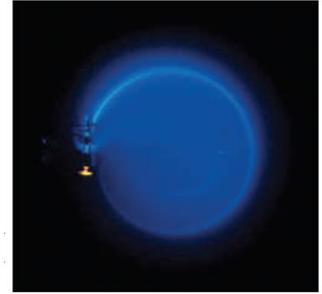
Bài giải:

Theo phương trình 29.3:

$$v = \frac{qBr}{m_p} = \frac{(1,6 \times 10^{-19} \text{C})(0,35 \text{T})(0,14 \text{m})}{1,67 \times 10^{-27} \text{kg}} = 4,7 \times 10^6 \text{ m/s}$$

Ví dụ 29.3: Chùm electron bị uốn cong

Trong một thí nghiệm được thiết kế để đo cường độ của từ trường đều, các electron ở trạng thái nghỉ, được gia tốc nhờ hiệu điện thế 350 V và sau đó đi vào từ trường đều có phương vuông góc với vectơ vận tốc của electron. Dưới tác dụng của lực từ, các electron di chuyển dọc theo một đường cong với bán kính được đo là 7,5 cm (Hình 29.9). Tính độ lớn cảm ứng từ?



Hình 29.9: Chùm electron bị uốn cong

Bài giải:

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

$$\left(\frac{1}{2}m_e v^2 - 0\right) + (q\Delta V) = 0$$

$$v = \sqrt{\frac{-2q\Delta V}{m_e}} = \sqrt{\frac{-2(-1,6 \times 10^{-19}C)(350V)}{9,11 \times 10^{-31}kg}} = 1,11 \times 10^7 m/s$$

$$B = \frac{m_e v}{er} = \frac{(9,11 \times 10^{-31})(1,11 \times 10^7 m/s)}{(1,6 \times 10^{-19}C)(0,075m)} = 8,4 \times 10^{-4} T$$

29.3. CÁC ỨNG DỤNG LIÊN QUAN ĐẾN CHUYỂN ĐỘNG CỦA HẠT MANG ĐIỆN TRONG TỪ TRƯỜNG

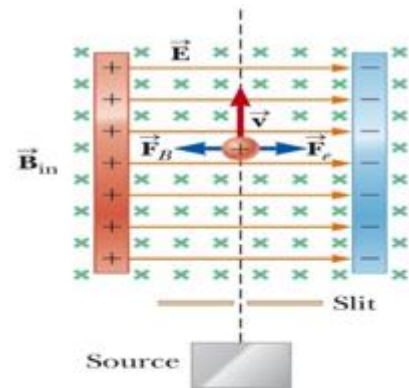
Khi một điện tích chuyển động với vận tốc \vec{v} trong cả điện trường \vec{E} lẫn từ trường \vec{B} thì lực tác dụng lên điện tích (còn gọi là lực Lorentz) là:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (29.6)$$

29.3.1 Bộ lọc vận tốc

Trong nhiều thí nghiệm liên quan đến hạt mang điện chuyển động thì điều quan trọng là tất cả các hạt phải có cùng vận tốc. Để làm được điều này, chúng ta cho chùm điện tích chuyển động qua bộ lọc vận tốc được thiết kế như hình 29.10.

Bộ lọc vận tốc có một điện trường đều hướng từ trái sang phải trong mặt phẳng hình vẽ và một từ trường đều vuông góc và chiều hướng vào mặt phẳng như hình 29.10.



Hình 29.10: Một điện tích dương chuyển động với vận tốc \vec{v} vào hộp chọn vận tốc

Nếu q là điện tích dương có vận tốc là \vec{v} hướng lên thì lực từ tác dụng lên q sẽ có chiều hướng sang trái với độ lớn qvB , lực điện tác dụng lên q có chiều hướng sang phải với độ lớn qE (hình 29.10).

Do đó, khi ta chọn điện trường và từ trường sao cho $qE = qvB$ thì điện tích q sẽ chuyển động theo đường thẳng ra khỏi bộ lọc. Ta thấy rằng:

$$v = \frac{E}{B} \quad (29.7)$$

Như vậy, chỉ có những hạt có vận tốc như trên thì mới đi ra khỏi bộ lọc, còn lại các hạt có vận tốc khác sẽ bị cuốn về bản cực và không thoát ra ngoài được.

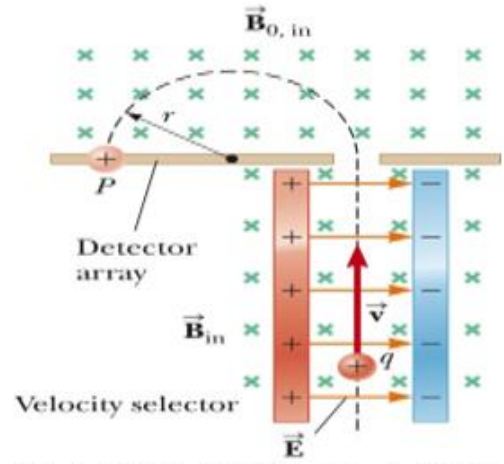
29.3.2 Khối phổ kế (mass spectrometer)

Khối phổ kế dùng để phân tách các ion dựa vào tỷ số khối lượng trên điện tích của nó, với thiết bị đời đầu có tên gọi Bainbridge.

Một chùm ion cho đi qua bộ lọc vận tốc và sau đó đi vào vùng từ trường đều \vec{B}_0 có cùng chiều với từ trường \vec{B} trong bộ lọc vận tốc (hình 29.11).

Khi đi vào vùng từ trường thứ hai thì ion chuyển động theo quỹ đạo là nửa vòng tròn bán kính r rồi đập vào một dãy các đầu dò tại vị trí P. Nếu là ion dương thì lệch về phía trái như hình 29.11, còn nếu là ion âm thì lệch về phía phải. Từ phương trình 29.3, ta có:

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



Hình 29.11: Thiết bị đo phổ khối lượng

Sử dụng phương trình 29.7 ta được:

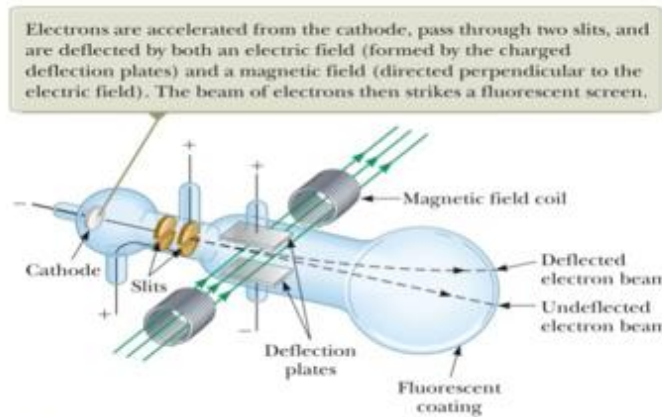
$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0B}{E} \quad (29.8)$$

Do vậy, chúng ta có thể xác định được m/q bằng việc đo bán kính cong quỹ đạo và biết độ lớn của B , B_0 , và E .

Trong thực tế, người ta đo khối lượng của nhiều đồng vị của ion nào đó có cùng điện tích q . Theo cách này thì có thể xác định được tỷ số khối lượng ngay cả khi không biết giá trị của q .

Một chút thay đổi của kỹ thuật này được sử dụng bởi J.J. Thomson (1856-1940) vào năm 1897 để xác định giá trị e/m_e của electron. Hình 29.12 mô tả sơ đồ thí nghiệm.

Electron được gia tốc từ cathode và chuyển động qua hai khe rồi đi vào vùng không gian có điện trường và từ trường vuông góc như hình vẽ. Điện trường và từ trường được điều chỉnh sao cho dòng electron chuyển động thẳng. Khi từ trường bị tắt đi, điện trường làm cho electron lệch đi và độ lệch này được ghi nhận bằng màn hình huỳnh quang. Từ độ lệch này và giá trị của E và B mà ta có thể xác định được tỷ số điện tích trên khối lượng của electron. Những kết quả của thí nghiệm này dẫn đến sự khám phá ra electron là một hạt cơ bản trong tự nhiên.

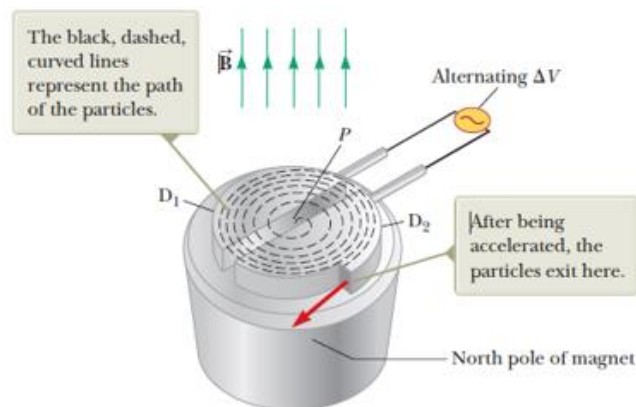


Hình 29.12: Sơ đồ thí nghiệm để xác định tỷ số e/m_e .

29.3.3 Máy gia tốc

Là thiết bị để tăng vận tốc của hạt lên rất lớn. Năng lượng của hạt được dùng để bắn phá các hạt nhân nguyên tử và do vậy tạo ra các phản ứng hạt nhân cho nghiên cứu. Rất nhiều bệnh viện sử dụng máy gia tốc để tạo ra chất phóng xạ dùng cho việc chuẩn đoán và điều trị.

Cả điện trường lẫn từ trường đều có vai trò quan trọng trong máy gia tốc như hình 29.13. Điện tích chuyển động bên trong hai hình bán nguyệt D_1 và D_2 (gọi là dee). Một nguồn điện xoay chiều tần số cao được áp vào D_1 và D_2 . Từ trường đều vuông góc với điện trường. Ion dương được phóng ra từ nguồn P gần tâm của nam châm trong một dee, và di chuyển theo đường dẫn được biểu thị bằng đường màu đen nét đứt như trong hình. Sau mỗi vòng chuyển động hoàn chỉnh, hạt nhận được năng lượng tăng thêm là K .



Hình 29.13: Máy gia tốc gồm nguồn ion tại P , điện thế áp vào giữa D_1 và D_2 , từ trường đều vuông góc với điện trường

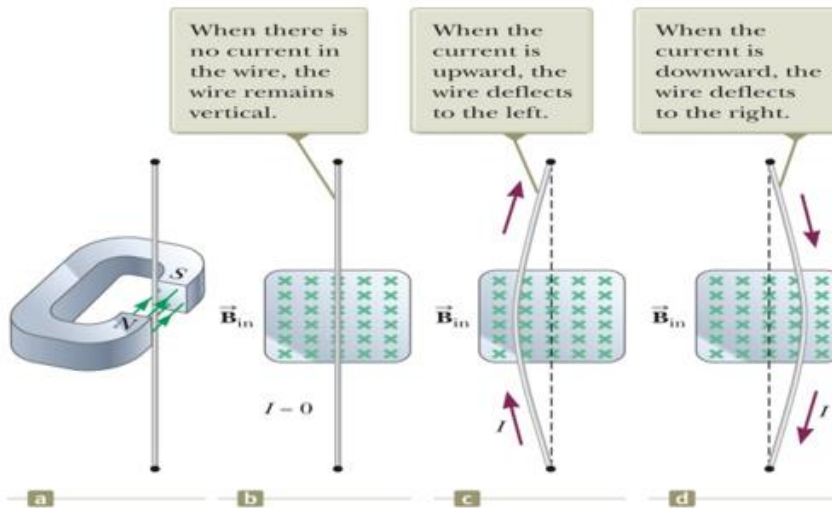
Từ phương trình 29.3, ta có $v = \frac{qBR}{m}$. Do đó, ta có thể thu được động năng của ion khi nó thoát ra máy gia tốc có hình bán nguyệt bán kính R .

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(qBR)^2}{2m} \quad (29.9)$$

29.4. LỰC TỪ TÁC DỤNG LÊN DÂY DẪN CÓ DÒNG ĐIỆN CHẠY QUA

Ta biết rằng từ trường tác dụng lực lên điện tích chuyển động trong nó, mà dòng điện thì gồm những điện tích chuyển động nên từ trường cũng tác dụng lên dòng điện đặt trong nó. Hình 29.14 mô tả sự lệch của sợi dây mang điện trong từ trường.

Khi chưa có dòng điện, sợi dây chưa bị lệch (hình b), khi có dòng điện từ dưới lên thì sợi dây bị lệch sang trái (hình c), và khi đổi chiều dòng điện thì dây bị lệch sang phải (hình d).



Hình 29.14: Đặt dây điện giữa từ trường của nam châm hình móng ngựa

Xét một đoạn dây điện có chiều dài L , diện tích mặt cắt ngang là A có cường độ dòng điện I đặt trong từ trường đều \vec{B} như hình 29.15.

Lực từ tác dụng lên hạt điện chuyển động với vận tốc \vec{v}_d có điện tích q là $q\vec{v}_d \times \vec{B}$. Tổng số hạt mang điện trong sợi dây là nAL với n là mật độ hạt mang điện tích trong sợi dây.

Vậy tổng lực tác dụng lên sợi dây điện là:

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

Mà $I = nqv_dA$ theo phương trình 27.4. Do vậy:

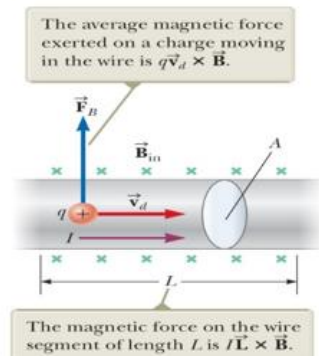
$$\vec{F}_B = (I\vec{L} \times \vec{B}) \quad (29.10)$$

Với \vec{L} là vector có phương chiều của dòng điện và độ lớn là L . Công thức trên áp dụng cho đoạn dây thẳng đặt trong từ trường đều.

Trường hợp tổng quát cho dây điện bất kỳ thì ta chia sợi dây điện thành những vi phân chiều dài ds như hình 29.16, khi đó lực tác dụng lên ds là:

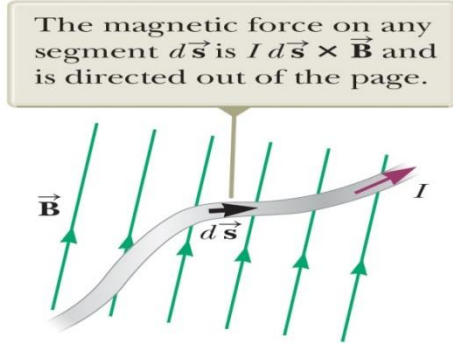
$$d\vec{F}_B = (I d\vec{s} \times \vec{B}) \quad (29.11)$$

Vậy lực tác dụng cho cả đoạn dây ab là:



Hình 29.15: Một đoạn dây thẳng mang điện trong từ trường đều

$$\vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{s} \times \vec{B} \quad (29.12)$$



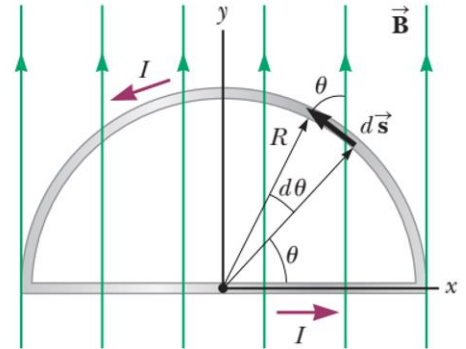
Hình 29.16: Một đoạn dây có hình dạng bất kỳ trong từ trường

Câu hỏi nhanh 29.3: Một sợi dây điện nằm trong mặt phẳng của trang+ giấy này, chiều dòng điện hướng lên trên. Lực từ hướng từ trái sang phải trang giấy. Vector cảm ứng từ \vec{B} có phương, chiều

- (a) nằm trong mặt phẳng của trang, chiều từ phải sang trái
- (b) nằm trong mặt phẳng của trang, chiều hướng xuống dưới,
- (c) vuông góc, hướng ra khỏi trang
- (d) vuông góc, hướng vào trang

Ví dụ 29.4: Lực tác dụng lên một dây dẫn hình bán nguyệt

Một dây được uốn thành hình bán nguyệt bán kính R tạo thành một mạch kín và mang dòng điện I . Dây nằm trong mặt phẳng xy và từ trường đều có cảm ứng từ \vec{B} hướng theo chiều dương của trục y như trong hình 29.17. Tìm độ lớn và hướng của lực từ tác dụng lên phần thẳng và phần cong của dây.



Hình 29.17 : Hình minh họa ví dụ 29.4

Bài giải:

Theo quy tắc bàn tay phải, lực từ tác dụng lên phần thẳng của dây \vec{F}_1 có phương vuông góc mặt phẳng xy , chiều hướng ra, lực từ tác dụng lên phần dây cong \vec{F}_2 có phương vuông góc mặt phẳng xy , chiều hướng vô.

Gọi \hat{k} : vector đơn vị theo phương z .

Lực từ tác dụng lên đoạn dây thẳng:

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

Lực từ tác dụng lên phần dây cong:

$$d\vec{F}_2 = I d\vec{s} \times \vec{B} = -IB \sin\theta ds \hat{k}$$

Với $ds = R d\theta$

$$\text{Suy ra } \vec{F}_2 = - \int_0^\pi IRB \sin\theta d\theta \hat{k} = -IRB \int_0^\pi \sin\theta d\theta \hat{k} = -2IRB \hat{k}$$

29.5. MÔ MEN LỰC TÁC DỤNG LÊN MỘT DÒNG ĐIỆN KÍN ĐẶT TRONG TỪ TRƯỜNG ĐỀU

Trong mục 29.4 chúng ta thấy rằng khi dây dẫn có dòng điện chạy qua được đặt trong từ trường thì có lực từ tác dụng lên nó.

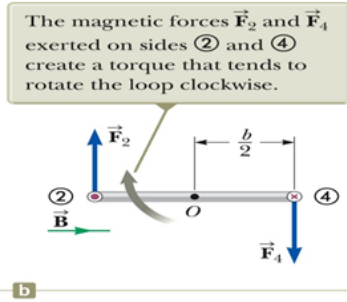
Xét vòng dây điện kín hình chữ nhật có cường độ dòng điện I đặt trong từ trường đều có phương song song với mặt phẳng vòng dây như hình 29.18.

Ta thấy rằng không có lực từ tác dụng lên đoạn 1 và đoạn 3 vì đoạn dây điện này có phương song song với từ trường \vec{B} nên $\vec{L} \times \vec{B} = 0$.

Lực từ tác dụng lên đoạn 2 và đoạn 4 theo phương trình 29.10 là:

$$F_2 = F_4 = IabB$$

Lực từ tác dụng lên đoạn 2 là \vec{F}_2 , có chiều hướng ra ngoài mặt phẳng khung dây, trong khi đó lực từ tác dụng lên đoạn 4 là \vec{F}_4 , có chiều hướng vào mặt phẳng khung dây.



Hình 29.19: Hình chiếu cạnh một vòng dây điện đặt trong từ trường đều.

Nếu ta nhìn khung dây từ đoạn 3 dọc theo đoạn 2 và đoạn 4 thì lực từ \vec{F}_2 và \vec{F}_4 được biểu diễn như hình 29.19 và hai lực này tạo ra moment τ_{\max} làm cho khung dây quay:

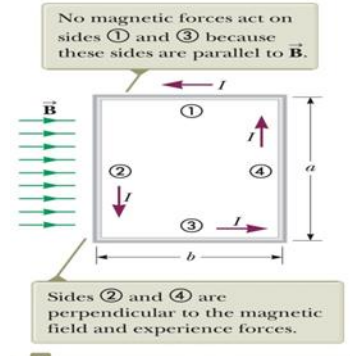
$$\tau_{\max} = F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (Iab) \frac{b}{2} + (Iab) \frac{b}{2} = IabB$$

$$\tau_{\max} = IAB$$

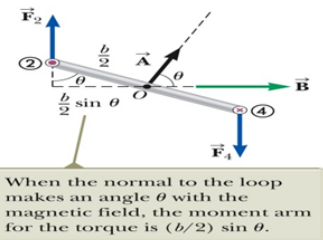
Với $A = ab$, diện tích của khung dây.

Giờ xét trường hợp từ trường đều \vec{B} tạo với phương vuông góc mặt phẳng khung dây một góc $\theta < 90^\circ$ như hình 29.20. Để đơn giản ta xét trường hợp \vec{B} vuông góc với đoạn 2 và đoạn 4. Lực từ tác dụng lên đoạn 1 và đoạn 3 triệt tiêu với nhau và không tạo ra moment lực. Lực từ tác dụng lên đoạn 2 và đoạn 4 tạo ra một moment lực bằng:

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



Hình 29.18: Một vòng dây điện đặt trong từ trường đều



Hình 29.20: Hình chiếu cạnh của khung dây trong trường hợp cảm ứng từ \vec{B} hợp với pháp tuyến của khung dây một góc θ

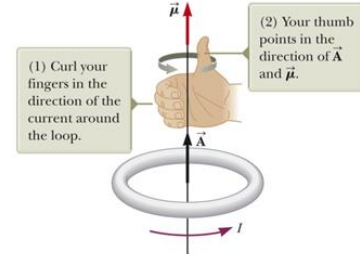
$$= (Iab) \frac{b}{2} \sin\theta + (Iab) \frac{b}{2} \sin\theta = IabB \sin\theta = IAB \sin\theta$$

Kết quả trên cho thấy moment lực có giá trị lớn nhất bằng IAB khi từ trường vuông góc với pháp tuyến khung dây ($\theta = 90^\circ$) như trình bày trong hình 29.19 và bằng 0 khi từ trường song song với pháp tuyến khung dây ($\theta = 0$).

Moment lực tác dụng lên khung dây điện kín được biểu diễn dưới dạng vector như sau:

$$\vec{\tau} = I\vec{A} \times \vec{B} \quad (29.14)$$

Trong đó vector \vec{A} có phương trùng với pháp tuyến khung dây, độ lớn bằng diện tích khung dây và chiều được xác định bằng quy tắc bàn tay phải như hình 29.21.



Hình 29.21: Quy tắc bàn tay phải xác định chiều của vector \vec{A}

Moment lưỡng cực từ $\vec{\mu}$ (gọi tắt là moment từ) của khung dây là:

$$\vec{\mu} \equiv I\vec{A} \quad (29.15)$$

Nếu có một cuộn dây được cuốn N vòng thì moment từ của cuộn dây là:

$$\vec{\mu}_{\text{coil}} = NI\vec{A} \quad (29.16)$$

Vậy từ phương trình 29.15, có thể biểu diễn moment lực tác dụng lên khung dây điện kín đặt trong từ trường \vec{B} là:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (29.17)$$

Phương trình 29.17 tương tự như phương trình 26.18, $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$, mômen lực tác động vào một lưỡng cực điện với sự có mặt của điện trường E , \vec{p} : momen lưỡng cực điện.

Phương trình 29.16 và 29.17 còn áp dụng cho cả khung dây hình chữ nhật.

Phương trình 29.17 áp dụng cho tất cả các khung dây có hình dạng khác nhau đặt trong từ trường.

Với lưỡng cực điện, thế năng điện trường của lưỡng cực điện $U_E = -\vec{p} \cdot \vec{E}$. Tương tự như vậy, thế năng từ trường của lưỡng cực từ bằng

$$U_B = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}. \quad (29.18)$$

Ví dụ 29.5: Moment lưỡng cực từ của cuộn dây

Cho cuộn dây hình chữ nhật $5,4 \text{ cm} \times 8,5 \text{ cm}$, chứa 25 vòng và có dòng điện 15mA chạy qua. Người ta tạo ra một từ trường 0,35 T song song mặt phẳng vòng dây.

- Tính độ lớn moment lưỡng cực từ của cuộn dây
- Tính độ lớn moment lực tác dụng lên cuộn dây

Bài giải:

a. Từ phương trình 29.16

$$\mu_{\text{coil}} = NIA = (25)(15 \times 10^{-3} \text{A})(0,054\text{m})(0,085\text{m}) = 1,72 \times 10^{-3} \text{A} \cdot \text{m}^2$$

b. Từ phương trình 29.17

$$\tau = \mu_{\text{coil}} B = (1,72 \times 10^{-3} \text{A} \cdot \text{m}^2)(0,35\text{T}) = 6,02 \times 10^{-4} \text{Nm}$$

29.6. HIỆU ỨNG HALL

Hiệu ứng Hall là một hiệu ứng vật lý được thực hiện khi áp dụng một từ trường vuông góc lên một bản làm bằng kim loại hay chất bán dẫn hay chất dẫn điện nói chung (thanh Hall) đang có dòng điện chạy qua. Lúc đó người ta nhận được hiệu điện thế (hiệu thế Hall) sinh ra tại hai mặt đối diện của thanh Hall. Tỷ số giữa hiệu thế Hall và dòng điện chạy qua thanh Hall gọi là điện trở Hall, đặc trưng cho vật liệu làm nên thanh Hall

Hiệu ứng Hall được quan sát đầu tiên vào năm 1879 bởi Edwin Hall. Sơ đồ thí nghiệm được bố trí như hình 29.22.

Một tấm vật dẫn có cường độ dòng điện theo phương x được đặt trong từ trường đều có cảm ứng từ \vec{B} theo phương y.

Giả sử trong vật dẫn dòng điện là dòng dịch chuyển của electron mang điện tích âm, dòng điện I theo chiều dương trục x thì electron dịch chuyển theo chiều ngược lại với vận tốc trôi v_d . Khi đó electron sẽ bị lực từ tác dụng làm chúng lệch lên trên và tập trung về phía cạnh trên của tấm, và để lại điện tích dương tập trung về phía cạnh dưới. Sự tập trung điện tích ở các cạnh của tấm vật dẫn tạo ra một điện trường \vec{E}_H có chiều từ dưới lên trên theo phương z. Sự tồn tại của điện trường này tạo ra lực điện tác dụng lên electron làm cho nó di chuyển xuống cạnh dưới. Trong trường hợp dòng điện có các hạt mang điện tích dương thì điện trường \vec{E}_H sẽ có chiều ngược lại, tức là hướng từ trên xuống dưới. Khi lực điện và lực từ tác dụng lên electron bằng nhau thì điều kiện cân bằng đạt được, tức là electron không còn di chuyển theo phương z. Độ chênh lệch điện thế giữa cạnh trên và cạnh dưới được gọi là hiệu điện thế hoặc điện áp Hall.

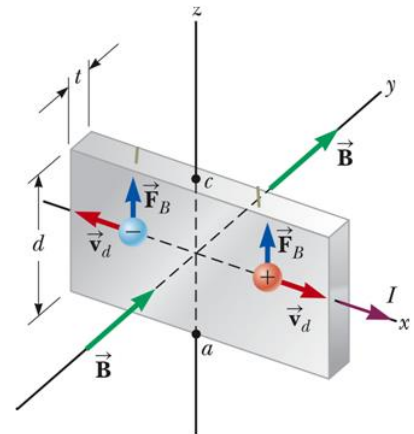
Từ điều kiện cân bằng, ta có:

$$qv_d B = qE_H$$

$$E_H = v_d B$$

Nếu d là chiều rộng của tấm vật dẫn thì điện áp Hall là:

$$\Delta V_H = E_H d = v_d B d \quad (29.19)$$



Hình 29.22: Sơ đồ thí nghiệm quan sát hiệu ứng Hall

Theo phương trình trên, khi ta đo được điện thế Hall thì sẽ tính được vận tốc trôi của dòng điện tích. Cũng từ đây ta xác định được mật độ điện tích nếu đo thêm cường độ dòng điện I. Dựa vào phương trình 27.4, vận tốc trôi là:

$$v_d = \frac{I}{nqA} \quad (29.20)$$

Với A là diện tích mặt cắt ngang của tấm vật dẫn. Thay phương trình 29.20 vào phương trình 29.19, ta được:

$$\Delta V_H = \frac{IBd}{nqA} \quad (29.21)$$

Do $A = td$, với t là chiều dày của tấm vật dẫn, phương trình 29.21 có thể viết lại:

$$\Delta V_H = \frac{IB}{nqt} = \frac{R_H IB}{t} \quad (29.22)$$

Với $R_H = 1/nq$ được gọi là hệ số Hall. Như vậy, khi tính được hệ số Hall thì từ dấu và giá trị của R_H ta suy ra được mật độ hạt dẫn và dấu điện tích của nó.

Ví dụ 29.6: Hiệu ứng Hall lên miếng đồng

Một dải đồng hình chữ nhật rộng 1,5 cm và dày 0,1 cm mang dòng điện 5 A. Tìm điện áp Hall khi từ trường 1,2 T tác dụng lên nó theo hướng vuông góc với dải.

Bài giải:

Giả sử mỗi electron trên mỗi phân tử đều dẫn điện, ta có mật độ phân tử mang điện:

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

Từ phương trình 29.22

$$\begin{aligned} \Delta V_H &= \frac{IB}{nqt} = \frac{MIB}{N_A \rho qt} \\ \Delta V_H &= \frac{(0,0635 \text{ kg/mol})(5\text{A})(1,2\text{T})}{(6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})(8,920 \text{ kg/m}^3)(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(0,001\text{m})} \\ &= 0,44 \mu\text{V} \end{aligned}$$

TÓM TẮT

Lực từ tác dụng lên hạt mang điện tích

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

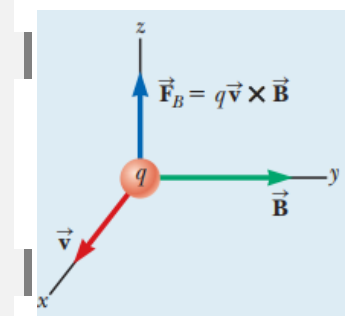
Phương của lực từ : vuông góc mặt phẳng chứa (\vec{v}, \vec{B})

Chiều : theo quy tắc tam diện thuận

Độ lớn : $F_B = |q|vB\sin\theta$

θ : góc giữa \vec{v} và \vec{B}

Đơn vị của B là Tesla (T)



$$1T = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$$

Điện tích chuyển động trong từ trường đều sao cho vận tốc ban đầu \vec{v} vuông góc với cảm ứng từ \vec{B} thì điện tích sẽ chuyển động tròn với bán kính:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Vận tốc góc của hạt là:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

Chu kỳ chuyển động là:

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

Lực từ tác dụng lên dây thẳng mang điện đặt trong từ trường đều là

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

Trường hợp tổng quát cho dây điện bất kỳ thì ta chia sợi dây điện thành những vi phân chiều dài ds , khi đó lực tác dụng cho cả đoạn dây ab là:

$$\vec{F}_B = I \int_a^b \vec{ds} \times \vec{B}$$

Moment lưỡng cực từ $\vec{\mu}$ (gọi tắt là moment từ) của khung dây là:

$$\vec{\mu} \equiv I\vec{A}$$

Nếu có một cuộn dây được cuốn N vòng thì moment từ của cuộn dây là:

$$\vec{\mu}_{\text{coil}} = NI\vec{A}$$

Moment lực tác dụng lên khung dây điện kín đặt trong từ trường đều \vec{B} :

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

Điện thế Hall

$$\Delta V_H = E_H d = v_d B d = \frac{IBd}{nqA} = \frac{IB}{nqt} = \frac{R_H IB}{t}$$

Câu hỏi lý thuyết chương 29

- Một từ trường đều không thể gây ra một lực từ lên một hạt trong trường hợp nào sau đây? Có thể chọn nhiều đáp án.
 - Hạt được tích điện.
 - Hạt điện di chuyển vuông góc với từ trường.
 - Hạt điện chuyển động song song với từ trường.
 - Cường độ của từ trường thay đổi theo thời gian.
 - Hạt điện tích đang đứng yên.

Đáp số : c và e

2. Sắp xếp theo thứ tự từ lớn đến nhỏ cường độ của các lực tác dụng lên hạt điện
- (a) Một electron di chuyển với tốc độ $1 \text{ Mm} / \text{s}$ vuông góc với từ trường 1 mT
 - (b) Một electron chuyển động với tốc độ $1 \text{ Mm} / \text{s}$ song song với từ trường 1 mT
 - (c) Một electron chuyển động với tốc độ $2 \text{ Mm} / \text{s}$ vuông góc với từ trường 1 mT
 - (d) Một proton di chuyển với tốc độ $1 \text{ Mm} / \text{s}$ vuông góc với từ trường 1 mT
 - (e) Một proton di chuyển với tốc độ $1 \text{ Mm} / \text{s}$, hợp với vector cảm ứng từ một góc 45° , độ lớn từ trường 1 mT

Đáp số : (c) > (a) = (d) > (e) > (b)

3. Một thanh đồng mỏng dài 1 m có khối lượng 50 g . Tính cường độ dòng điện tối thiểu trong thanh để cho phép nó bay lên khỏi mặt đất trong một từ trường 0.1 T ?
- (a) $1,20 \text{ A}$
 - (b) $2,40 \text{ A}$
 - (c) $4,90 \text{ A}$
 - (d) $9,80 \text{ A}$
 - (e) Tất cả đều sai

Đáp số : c

4. Trả lời từng câu hỏi Có hay Không. Giả sử các chuyển động và chiều dòng điện dọc theo trục x và chiều các trường hướng theo trục y .
- (a) Điện trường có tác dụng một lực lên một vật nhiễm điện đứng yên không?
 - (b) Từ trường có tác dụng một lực lên một vật nhiễm điện đứng yên không?
 - (c) Điện trường có gây ra một lực tác dụng lên vật nhiễm điện chuyển động không?
 - (d) Từ trường có gây ra một lực tác dụng lên vật nhiễm điện chuyển động không?
 - (e) Điện trường có tác dụng lực lên dây thẳng mang dòng điện không?
 - (f) Từ trường có tác dụng lực lên dây thẳng mang dòng điện không?
 - (g) Điện trường có tác dụng lực lên một chùm electron chuyển động không?
 - (h) Từ trường có tác dụng lực lên một chùm electron chuyển động không?

Đáp số : (a) Có, (b) Không, (c) Có, (d) Có, (e) Không, (f) Có, (g) Có, (h) Có

5. Một từ trường đều có làm một electron chuyển động không nếu ban đầu electron đứng yên thành? Giải thích câu trả lời của bạn.
6. Giải thích tại sao không thể xác định riêng rẽ điện tích và khối lượng của một hạt tích điện bằng cách đo gia tốc được tạo ra bởi lực điện và lực từ tác dụng lên hạt.

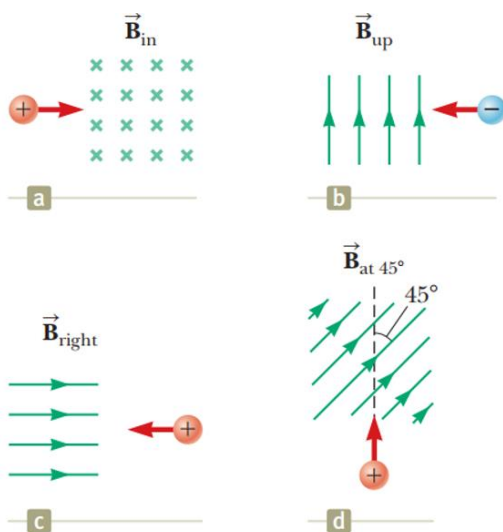
7. Có thể định hướng một vòng dây điện trong từ trường đều sao cho vòng dây không có xu hướng quay không?
8. Chuyển động của một hạt tích điện có thể được dùng để phân biệt từ trường và điện trường tác dụng lên nó không? Hãy giải thích vì sao?
9. Làm cách nào một vòng dây điện có thể được sử dụng để xác định sự hiện diện của từ trường trong một vùng không gian nhất định?

Bài tập chương 29

1. Ở xích đạo, gần bề mặt Trái đất, từ trường khoảng 50 mT, hướng về phía bắc và điện trường khoảng 100 N / C hướng xuống trong điều kiện thời tiết tốt. Tìm lực hấp dẫn, lực điện và lực từ tác dụng lên một electron đang chuyển động với vận tốc tức thời là $6 \times 10^6 \text{ m/s}$ hướng về phía đông.

Đáp số : *Lực hấp dẫn : $8,93 \times 10^{-30} \text{ N}$ hướng xuống, Lực điện : $1,60 \times 10^{-17} \text{ N}$ hướng lên, Lực từ : $4,80 \times 10^{-17} \text{ N}$ hướng xuống*

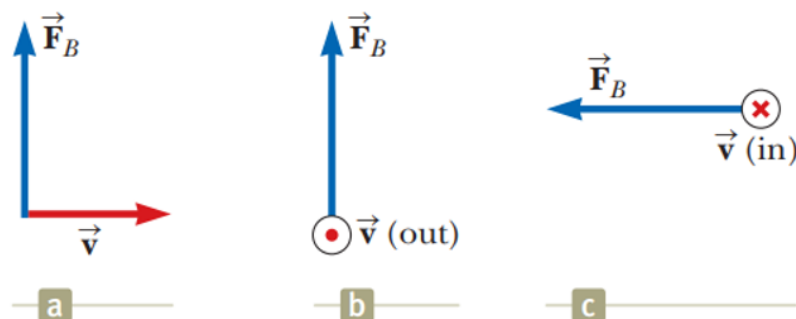
2. Xác định hướng cong ban đầu của các hạt tích điện khi chúng đi vào từ trường thể hiện trong hình P29.23.



Hình 29.23 : Hình minh họa bài tập 11

Đáp số : *(a) hướng lên, (b) hướng ra khỏi trang giấy, (c) không thay đổi hướng, (d) hướng vào trang giấy*

3. Tìm phương, chiều của từ trường tác dụng lên một hạt tích điện dương chuyển động trong ba trường hợp mô tả ở hình 29.24



Hình 29.24: Hình minh họa bài tập 12

Đáp số : (a) hướng vào trang giấy, (b) hướng xuống dưới trang giấy

4. Một proton di chuyển trong một từ trường đều, vận tốc $1 \times 10^7 \text{ m/s}$ theo chiều dương trục z, vuông góc với cảm ứng từ \vec{B} . Hạt có gia tốc $2 \times 10^{13} \text{ m/s}^2$ theo chiều dương trục x. Xác định cảm ứng từ \vec{B} .

Đáp số : $\vec{B} = -20,9\hat{j} \text{ mT}$

5. Một electron di chuyển theo đường tròn vuông góc từ trường đều 2 mT. Nếu tốc độ của electron là $1,5 \times 10^7 \text{ m/s}$, hãy xác định (a) bán kính của đường tròn và (b) khoảng thời gian cần thiết để electron di chuyển hết vòng tròn.

Đáp số : (a) $4,27 \text{ cm}$, (b) $1,79 \times 10^{-8} \text{ s}$

6. Một hạt có điện tích q và động năng K di chuyển trong một từ trường đều có độ lớn B. Nếu hạt chuyển động theo đường tròn bán kính R, hãy tìm các biểu thức cho (a) tốc độ của nó và (b) khối lượng của nó.

Đáp số : (a) $v = \frac{2K}{qBR}$, (b) $m = \frac{q^2 B^2 R^2}{2K}$

7. Một electron va chạm đàn hồi với electron thứ hai đang đứng yên. Sau va chạm, chúng chuyển động với bán kính quỹ đạo của chúng lần lượt là 1cm và 2,4 cm. Các quỹ đạo vuông góc với từ trường đều 0,044 T. Xác định năng lượng (tính bằng keV) của electron đầu.

Đáp số : 115 keV

8. Một electron di chuyển theo đường tròn vuông góc với từ trường đều 1mT. Moment động lượng của electron đối với tâm vòng tròn là $4 \times 10^{-25} \text{ kgm}^2/\text{s}$. Xác định (a) bán kính của đường tròn và (b) tốc độ của electron.

Đáp số : (a) $0,05 \text{ m}$, (b) $8,78 \times 10^6 \text{ m/s}$

9. Một dây thẳng mang dòng điện 3A được đặt trong một từ trường đều 0,28 T vuông góc với dây.

(a) Tìm độ lớn của lực từ lên một phần của dây có chiều dài 14cm.

(b) Giải thích lý do tại sao bạn không thể xác định được hướng của lực từ với thông tin được đưa ra trong bài toán.

Đáp số : (a) 0,118N

10. Một dây dẫn mang dòng điện $I = 15 \text{ A}$ hướng theo chiều dương trục x và vuông góc với từ trường đều. Lực từ tác dụng trên mỗi đơn vị chiều dài của dây là $0,12 \text{ N/m}$ và hướng theo chiều âm của trục y . Xác định độ lớn, phương, chiều của từ trường này.

Đáp số : $8 \times 10^{-3} \text{ T}$, hướng theo chiều dương trục z

11. Một sợi dây có chiều dài $2,8 \text{ m}$ mang dòng điện 5 A đặt trong từ trường đều $0,39 \text{ T}$. Tính độ lớn của lực từ tác dụng lên dây khi góc giữa từ trường và dòng điện là (a) 60° , (b) 90° và (c) 120° .

Đáp số : (a) 4,73N, (b) 5,46 N, (c) 4,73N

12. Một cuộn dây gồm 50 vòng dây tròn, bán kính 5 cm có thể được định hướng theo bất kỳ hướng nào trong từ trường đều có cường độ $0,5 \text{ T}$. Nếu cuộn dây mang dòng điện 25 mA , tìm độ lớn của moment lực cực đại tác dụng lên cuộn dây.

Đáp số : $4,91 \times 10^{-3} \text{ Nm}$

13. Một dòng điện 5 A chạy qua một vòng dây tròn đường kính 10 cm và được đặt trong một từ trường đều 3 mT . Tìm (a) moment lực cực đại tác dụng lên dây và (b) khoảng giá trị của thế năng của hệ dây- từ trường cho nhiều hướng khác nhau của vòng dây.

Đáp số : (a) $118 \times 10^{-6} \text{ Nm}$, (b) $118 \mu\text{J} \leq U \leq 118 \mu\text{J}$

14. Đầu dò hiệu ứng Hall hoạt động với dòng điện 120 mA . Khi đầu dò được đặt trong một từ trường đều $0,08 \text{ T}$, nó tạo ra điện áp Hall là $0,7 \text{ mV}$.

(a) Khi nó được dùng để đo một từ trường khác, điện áp Hall là $0,33 \text{ mV}$. Tính cường độ của từ trường này?

(b) Độ dày của đầu dò theo hướng của \vec{B} là 2 mm . Tìm mật độ của các hạt mang điện biết mỗi hạt có độ lớn điện tích là e .

Đáp số : (a) $37,7 \text{ mT}$, (b) $4,29 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$

15. Trong mô hình nguyên tử hydro của Niels Bohr 1913, một electron đơn lẻ chuyển động trên một quỹ đạo tròn bán kính $5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$, với tốc độ là $2,19 \times 10^6 \text{ m/s}$.

(a) Tính độ lớn của moment từ gây bởi chuyển động của electron?

(b) Nếu electron di chuyển trên đường tròn trong mặt phẳng nằm ngang, ngược chiều kim đồng hồ khi nhìn từ trên xuống, tìm hướng của vector moment từ ?

Đáp số : (a) $9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$, (b) hướng xuống

16. Một hạt điện tích dương $q = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$ di chuyển với vận tốc $\vec{v} = (2\hat{i} + 3\hat{j} - \hat{k}) \text{ m/s}$ qua một khu vực có cả từ trường đều và điện trường đều.

(a) Tính tổng các lực tác dụng lên hạt điện tích này (theo ký hiệu vector đơn vị), với $\vec{B} = (2\hat{i} + 4\hat{j} + \hat{k})\text{ T}$ và $\vec{E} = (4\hat{i} - \hat{j} - 2\hat{k})\text{ V/m}$.

(b) Góc hợp bởi vector lực với chiều dương trục x bằng bao nhiêu?

Đáp số

(a) $\vec{F} = (3,52\hat{i} - 1,60\hat{j}) \times 10^{-18}\text{ N}$, (b) $24,4^\circ$ theo chiều dương trục x

17. Một thanh kim loại nặng 0,2 kg mang dòng điện 10 A lướt trên hai thanh ray nằm cách nhau 0,5 m. Nếu hệ số ma sát động giữa thanh và đường ray là 0,1 thì một từ trường theo phương thẳng đứng bằng bao nhiêu để giữ cho thanh di chuyển với tốc độ không đổi?

Đáp số : 39,2 mT