

BÀI 4: TỪ TRƯỜNG TĨNH

Sau khi học xong bài này, sinh viên có thể:

- *Nêu được các khái niệm về tương tác từ, từ trường, cảm ứng từ, nguyên lý chồng chất từ trường, từ thông, định lý Gauss cho từ trường.*
- *Hiểu và vận dụng được định lý Ampère về dòng toàn phần và định lý Ampère về lực tương tác giữa các phần tử dòng điện.*
- *Nắm được cách xác định lực tác dụng của từ trường lên một mạch điện kín.*
- *Nêu được từ trường của hạt điện chuyển động; lực Lorentz; các đặc trưng của hạt điện chuyển động trong từ trường*
- *Hiểu được hiệu ứng Hall; nêu được một vài ứng dụng.*

4.1 TỪ TRƯỜNG, ĐỊNH LUẬT BIOT - SAVART - LAPLACE

4.1.1 Tương tác từ

Các hiện tượng về điện, từ đã được con người biết đến từ lâu, nhưng không biết chúng có liên quan với nhau. Mãi đến năm 1820, Oersted, nhà vật lý người Đan Mạch phát hiện ra hiện tượng khi đặt kim nam châm gần một dây dẫn có dòng điện chạy qua thì kim nam châm bị lệch đi. Như vậy giữa dòng điện và nam châm có sự tương tác. Sau đó Ampère, nhà vật lý người Pháp, phát hiện rằng, các dòng điện cũng tương tác với nhau.

Sự tương tác giữa nam châm với nam châm, giữa dòng điện với nam châm, cũng như giữa các dòng điện với nhau thì giống nhau và được gọi là tương tác từ.

4.1.2 Khái niệm từ trường, vectơ cảm ứng từ và vectơ cường độ từ trường

Giữa các dòng điện luôn có sự tương tác lẫn nhau. Để giải thích sự lan truyền tương tác giữa các dòng điện, ta phải thừa nhận tồn tại một *môi trường "vật chất" bao quanh các dòng điện làm môi giới cho sự lan truyền tương tác này. Môi trường vật chất đó gọi là từ trường.*

Từ trường được đặc trưng bằng một đại lượng vectơ gọi là *vectơ cảm ứng từ*, ký hiệu là $\vec{B}$.

Trong môi trường vật chất, ngoài vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$, người ta còn đưa vào vectơ *cường độ từ trường* $\vec{H}$ để đặc trưng cho từ trường tại mỗi điểm. Trong môi trường đồng nhất và đẳng hướng, hai đại lượng này liên hệ với nhau bởi hệ thức:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} \quad (4.1)$$

trong đó μ là hệ số từ môi của môi trường (trong chân không $\mu=1$, trong không khí thì μ lớn hơn 1 không đáng kể nên cũng có thể coi bằng 1), còn $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ là hằng số từ.

4.1.3 Định luật Biot - Savart - Laplace

a. Vectơ phần tử dòng điện

Trên dây dẫn có dòng điện I chạy qua, lấy ra một đoạn chiều dài rất nhỏ dl . Đại lượng $I d\vec{l}$ được gọi là *vectơ phần tử dòng điện*. Vậy, vectơ phần tử dòng điện có phương chiều là phương chiều của dòng điện và có độ lớn là $I \cdot dl$.

b. Định luật Biot - Savart - Laplace

Bằng thực nghiệm các nhà vật lý Biot, Savart và Laplace đã xác định được vectơ cảm ứng từ $d\vec{B}$ gây bởi phần tử dòng điện $I d\vec{l}$ tại điểm M cách $I d\vec{l}$ một đoạn r là:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (4.2)$$

trong đó $\vec{r}$ là vectơ xác định vị trí của M đối với gốc vectơ phần tử dòng điện $Id\vec{l}$ (hình 4.1)

Biểu thức (4.2) được gọi là định luật Biot - Savart - Laplace.

Vectơ $d\vec{B}$ có:

- Phương: vuông góc với mặt phẳng chứa $Id\vec{l}$ và $\vec{r}$.
- Chiều: tuân theo quy tắc cái đinh ốc: xoay cái đinh ốc quay từ vectơ phần tử dòng điện $Id\vec{l}$ đến vectơ $\vec{r}$ theo góc nhỏ nhất thì chiều tiến của cái đinh ốc là chiều của vectơ $d\vec{B}$.
- Độ lớn:
$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \theta}{r^2}$$

trong đó θ là góc giữa $Id\vec{l}$ và $\vec{r}$.

- ❖ Vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$ của cả dòng điện bằng tổng các vectơ cảm ứng từ $d\vec{B}$ của các vectơ phần tử dòng điện:

$$\vec{B} = \int_{(\text{dòng điện})} d\vec{B} = \int_{(\text{dòng điện})} \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (4.3)$$

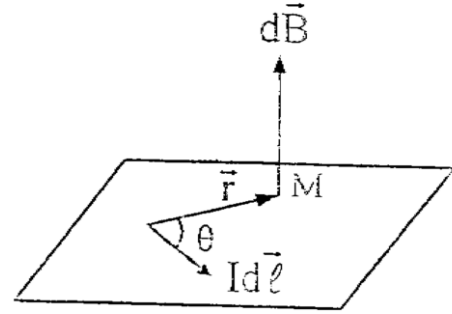
- ❖ Vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$ của n dòng điện khác nhau bằng tổng các vectơ cảm ứng từ của mỗi dòng điện:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \quad (4.4)$$

trong đó $\vec{B}_i$ là cảm ứng từ của dòng điện I_i .

c. Cảm ứng từ của dòng điện thẳng

Cho dòng điện có cường độ I chạy trên đoạn dây dẫn thẳng A_1A_2 , tìm vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$ do dòng điện gây ra tại điểm M cách dòng điện một khoảng h .



Hình 4.1: Vectơ cảm ứng từ $d\vec{B}$

Vectơ phần tử dòng điện $Id\vec{l}$ gây ra tại M một cảm ứng từ $d\vec{B}$ có phương vuông góc với mặt phẳng chứa dòng điện và điểm M, có chiều hướng vào trong (quy tắc cái đinh ốc) và có độ lớn:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \theta}{r^2}$$

$$r = \frac{h}{\sin \theta}; \quad dl = \frac{hd\theta}{\sin^2 \theta}$$

trong biểu thức dl ta lấy dấu dương (+) vì độ dài là một số dương.

$$\text{Suy ra: } dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi} \sin \theta d\theta$$

Vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$ do dòng điện cường độ I chạy trên đoạn dây dẫn thẳng A_1A_2 gây ra tại M cũng vuông góc với mặt phẳng hình vẽ, có chiều hướng vào trong (hình 4.2). Độ lớn của $\vec{B}$ bằng:

$$B_{A_1A_2} = \int_{A_1}^{A_2} dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi h} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta$$

$$B_{A_1A_2} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi h} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (4.5)$$

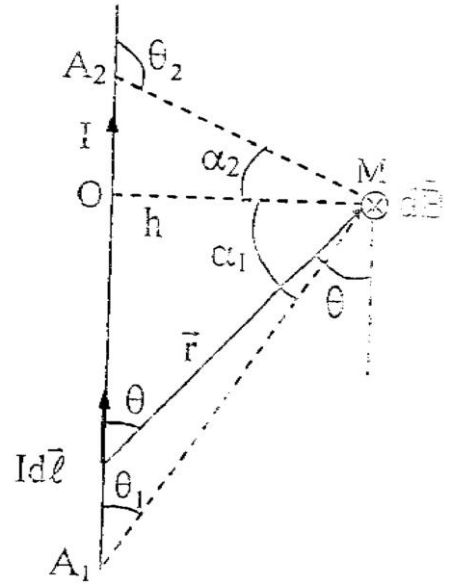
Lưu ý: Nếu dòng điện thẳng dài vô hạn ($\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi$) thì:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi h} \quad (4.6)$$

d. Cảm ứng từ của dòng điện tròn

Cho dòng điện cường độ I chạy trên dây dẫn là đường tròn tâm O, bán kính R. Tìm cảm ứng từ $\vec{B}$ do dòng điện này gây ra tại điểm M trên trục của đường tròn và cách tâm O một đoạn h.

Chọn hệ trục tọa độ Oxyz như hình 4.3 với gốc tọa độ tại tâm vòng tròn và trục Oz trùng với trục vòng tròn



Hình 4.2: $\vec{B}$ của dòng điện thẳng

Phần tử dòng điện $Id\vec{l}$ gây ra tại M một cảm ứng từ $d\vec{B}$ có phương vuông góc với mặt phẳng chứa $Id\vec{l}$ và điểm M, có độ lớn:

$$dB = \frac{\mu\mu_0 Idl}{4\pi r^2}$$

Do tính đối xứng nên $\vec{B}$ khi chiếu lên các trục Ox, Oy, Oz thì chỉ còn thành phần theo Oz: $\vec{B} = k B_z$.

$$\text{Vì } \cos\beta = \sin\alpha = \frac{R}{r} \Rightarrow dB_z = dB \cos\beta = \frac{\mu\mu_0 Idl}{4\pi r^2} \cdot \frac{R}{r}$$

$$B = \int_{(\text{dòng điện})} dB_z = \frac{\mu\mu_0 IR^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}}$$

$$\vec{B} = \vec{k} \frac{\mu\mu_0 IS}{2\pi(R^2 + h^2)^{3/2}} \quad (4.7)$$

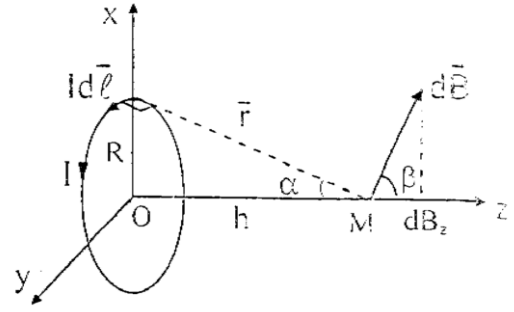
với $S = \pi R^2$ là diện tích của mạch điện tròn.

$$\text{Đặt: } \vec{p}_m = IS \vec{n} \quad (4.8)$$

ở đây $\vec{n}$ là vectơ đơn vị pháp tuyến của diện tích phẳng giới hạn bởi dòng điện tròn, trong trường hợp ta xét thì $\vec{n} \equiv \vec{k}$, còn $S = \pi R^2$ là diện tích giới hạn bởi dòng điện tròn bán kính R. Vectơ $\vec{p}_m$ vuông góc với diện tích phẳng của dòng điện tròn (hướng theo trục của dòng điện tròn) có chiều thuận với dòng điện theo quy tắc đinh ốc và có độ lớn $p_m = IS$. Vectơ $\vec{p}_m$ được gọi là vectơ momen từ. Vectơ momen từ đặc trưng cho tính chất từ của dòng điện.

Thay (4.8) vào (4.7), ta được:

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi(R^2 + h^2)^{3/2}} \vec{p}_m \quad (4.9a)$$



Hình 4.3: $\vec{B}$ của dòng điện tròn

$$\text{Độ lớn: } B = \frac{\mu\mu_0 \cdot p_m}{2\pi(R^2 + h^2)^{3/2}} = \frac{\mu\mu_0 IR^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}} \quad \text{với } p_m = IS = I\pi R^2 \quad (4.9b)$$

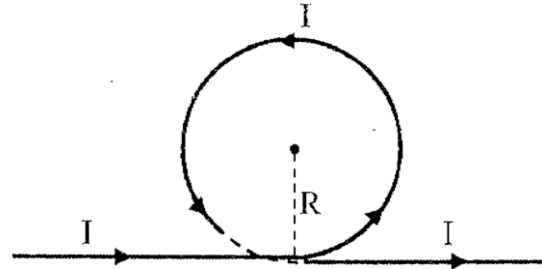
Tại tâm dòng điện $h = 0$, nên cảm ứng từ $\vec{B}_0$ tại tâm là:

$$\vec{B}_0 = \frac{\mu\mu_0}{2\pi R^3} p_m \quad (4.10a)$$

$$\text{Độ lớn: } B_0 = \frac{\mu\mu_0 \cdot p_m}{2\pi R^3} = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} \quad (4.10b)$$

Trong hệ SI, cảm ứng từ có đơn vị là Tesla (T), còn cường độ từ trường có đơn vị là Ampe trên mét (A/m).

Ví dụ 4.1: Dòng điện $I = 20\text{A}$ chạy qua dây dẫn rất dài như hình (4.4). Biết bán kính của vòng tròn là 10cm và hệ thống đặt trong không khí. Tính cường độ từ trường tại tâm O của vòng tròn.



Hình 4.4

Giải: Có thể chia dòng điện thành hai phần: phần chạy trên dây dẫn thẳng dài và phần chạy trên vòng dây tròn.

Cảm ứng từ tương ứng do các phần này gây ra tại tâm O vòng dây là: $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$

Do các vectơ $\vec{B}_1$ và $\vec{B}_2$ đều vuông góc với mặt phẳng hình vẽ và cùng hướng ra ngoài nên $\vec{B}$ cũng vuông góc với mặt phẳng hình vẽ, hướng ra ngoài và có độ lớn:

$$B = B_1 + B_2 = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R} + \frac{\mu\mu_0 I}{2R} = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} \left(\frac{1}{\pi} + 1 \right)$$

Cường độ từ trường tại tâm O của vòng dây bằng:

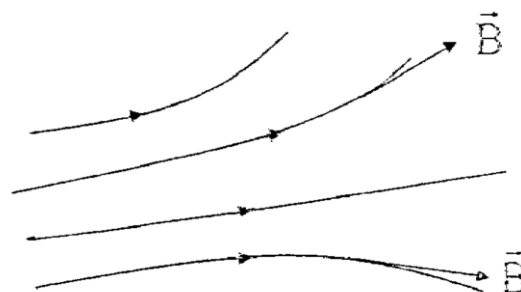
$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{I}{2R} \left(\frac{1}{\pi} + 1 \right) = \frac{20}{2 \cdot 0,1} \left(\frac{1}{3,14} + 1 \right) = 132 \text{ A/m}$$

4.1.4 Đường sức cảm ứng từ

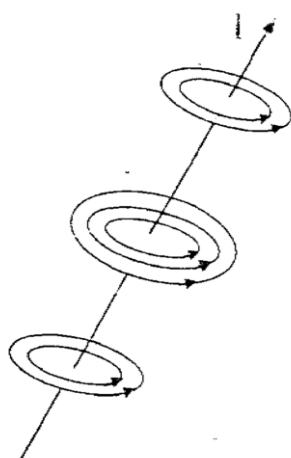
Để mô tả hình ảnh cụ thể của từ trường, người ta đưa ra khái niệm đường sức cảm ứng từ.

Đường sức cảm ứng từ (gọi tắt là đường sức từ) là đường cong vẽ trong từ trường, sao cho tiếp tuyến tại mỗi điểm của nó trùng với phương của vectơ cảm ứng từ tại điểm đó.

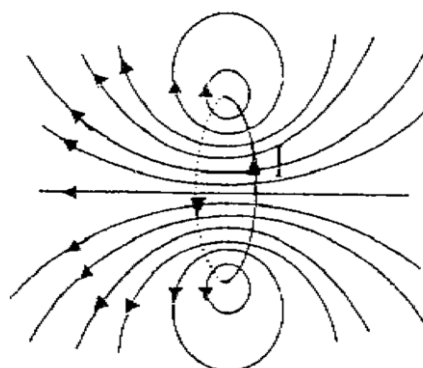
Chiều của đường sức cảm ứng từ là chiều của vectơ cảm ứng từ tại điểm đó.



Hình 4.5: Đường sức cảm ứng từ



Hình 4.6: Đường sức từ của dòng điện thẳng



Hình 4.7: Đường sức từ của dòng điện tròn

Người ta quy ước vẽ số đường sức từ qua một đơn vị diện tích đặt vuông góc với đường sức bằng trị số của vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$ tại đó. Từ trường đều thì các đường sức từ song song và cách đều nhau.

Các đường cảm ứng từ không cắt nhau vì tại mỗi điểm vectơ cảm ứng từ chỉ có một giá trị xác định. Các đường cảm ứng từ là các đường cong khép kín.

4.2 ĐỊNH LÝ GAUSS ĐỐI VỚI TỪ TRƯỜNG

4.2.1 Từ thông

Từ thông qua diện tích dS được định nghĩa:

$$d\Phi_m = \vec{B} \cdot d\vec{S} = B \cdot dS \cdot \cos\alpha \quad (4.11)$$

Từ thông qua toàn bộ mặt S :

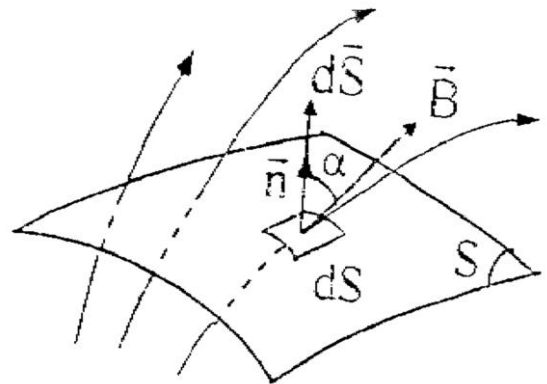
$$\Phi_m = \int_{(S)} d\Phi_m = \int_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = \int_{(S)} B \cdot d\vec{S} \cdot \cos\alpha \quad (4.12)$$

Nếu mặt S là phẳng, đặt trong từ trường đều thì:

$$\Phi_m = B \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (4.13)$$

Ý nghĩa từ thông: Giá trị của từ thông qua diện tích S bằng số đường sức từ gởi qua mặt S .

Trong hệ SI, đơn vị của từ thông là Weber (Wb).



Hình 4.8: Từ thông qua mặt S

4.2.2 Định lý Gauss

Ta biết rằng trong điện trường, điện thông gởi qua một mặt kín bất kỳ thì tỷ lệ với tổng điện tích chứa trong mặt kín đó. Bằng cách suy luận tương tự, trong từ trường, từ thông gởi qua một mặt kín bất kỳ thì cũng phải tỷ lệ với tổng từ tích chứa trong mặt kín đó. Tuy nhiên, sự khác nhau căn bản giữa điện trường và từ trường ở chỗ: điện trường được gây ra bởi các điện tích đứng yên, còn từ trường được gây ra bởi các điện tích chuyển động, chứ không phải các từ tích. Cho đến nay người ta chưa tìm được các từ tích trong tự nhiên.

Vì lý do đó định lý Gauss đối với từ trường được phát biểu như sau: *Từ thông gởi qua bất kỳ mặt kín nào cũng bằng không.*

$$\text{Biểu thức định lý Gauss: } \oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (4.14)$$

$$\text{Hay ở dạng vi phân: } \text{div} \vec{B} = 0 \quad (4.15)$$

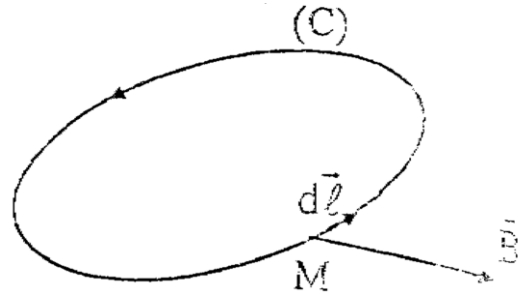
Các biểu thức (4.14), (4.15) chứng tỏ đường sức từ trường phải là đường khép kín. Các trường có đường sức khép kín gọi là trường xoáy. Vì vậy, *từ trường là một trường xoáy.*

4.3 ĐỊNH LÝ AMPÈRE (ĐỊNH LÝ DÒNG TOÀN PHẦN)

4.3.1 Lưu số của vectơ cảm ứng từ

Xét một đường cong kín (C) bất kỳ trong không gian có từ trường. Trên (C) ta lấy một độ dời $d\vec{l}$ vô cùng bé. Tích phân $\oint_{(C)} \vec{H} d\vec{l}$ được gọi là lưu số của vectơ cảm

ứng từ $\vec{B}$ dọc theo đường cong kín (C) trong từ trường.



Hình 4.9: Lưu số của vectơ $\vec{B}$

4.3.2 Định lý Ampère

Lưu số của vectơ cảm ứng từ dọc theo một đường cong kín (C) bất kỳ bằng tổng đại số các cường độ dòng điện qua diện tích giới hạn bởi đường cong kín đó nhân với $\mu\mu_0$.

Biểu thức định lý:

$$\oint_{(C)} \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 \sum_{k=1}^n I_k \quad (4.15)$$

$$\text{Dạng vi phân: } \text{rot} \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{j} \quad (4.16)$$

với $\vec{j}$ là vectơ mật độ dòng điện qua mặt S.

Tích phân trong (4.15) là tích phân đường. Theo chiều lấy tích phân, dòng điện nào tuân theo quy tắc đinh ốc sẽ có dấu dương, ngược lại mang dấu âm.

4.3.3 Áp dụng định lý Ampère để xác định từ trường

a. Từ trường trong cuộn dây hình xoắn (toroid)

Giả sử cuộn dây gồm N vòng có cường độ dòng điện I chạy qua. Do tính chất đối xứng của toàn bộ cuộn dây đối với tâm O, vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$ tại mọi điểm trên đường tròn (C), tâm O, bán kính r ($R_1 < r < R_2$) đều có giá trị bằng nhau, có phương tiếp tuyến với (C), có chiều như hình 4.10. R_1 , R_2 lần lượt là bán kính trong và bán kính ngoài của cuộn dây hình xoắn.

Vì có N dòng điện xuyên qua mặt (S) giới hạn bởi đường tròn (C) , ta có:

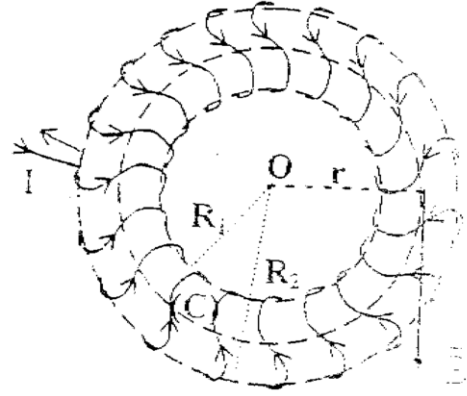
$$\oint_{(C)} \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 \cdot NI \Rightarrow B \cdot 2\pi r = \mu\mu_0 \cdot NI$$

$$\text{Vậy: } B = \frac{\mu\mu_0 NI}{2\pi r} \quad (4.17)$$

$$\text{hay: } B = \mu\mu_0 nI \quad (4.18)$$

trong đó $n = \frac{N}{2\pi r}$ là số vòng dây trên đơn vị

chiều dài của đường tròn (C) . Ở ngoài cuộn dây ($r < R_1$ hoặc $r > R_2$) từ trường bằng không.



Hình 4.10: Cuộn dây toroid

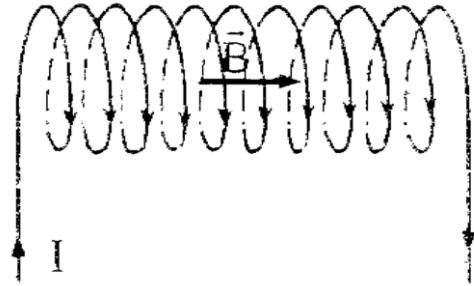
b. Từ trường trong ống dây điện rất dài (solenoid)

Ống dây thẳng dài vô hạn có thể xem như một cuộn dây điện hình xoắn có các bán kính bằng vô cùng: $R_1 = R_2 = \infty$.

Do đó cảm ứng từ tại mọi điểm bên trong ống dây đều bằng nhau và bằng:

$$B = \mu\mu_0 nI \quad (4.19)$$

Trong thực tế, những ống dây có chiều dài lớn hơn mười lần đường kính của nó đều có thể coi như ống dây dài vô hạn.



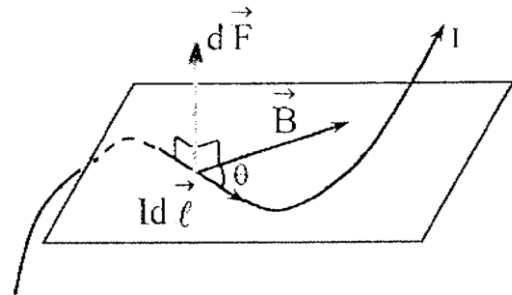
Hình 4.11: Ống dây solenoid

4.4 ĐỊNH LUẬT AMPÈRE

4.4.1 Biểu thức định luật

Khi đặt phần tử dòng điện $Id\vec{l}$ tại nơi có vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$ thì nó sẽ chịu tác dụng bởi lực từ $d\vec{F}$ được xác định như sau:

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times d\vec{B} \quad (4.20)$$



Hình 4.12: Lực Ampère $d\vec{F}$

Biểu thức (4.20) do nhà vật lý người Pháp Ampère thiết lập từ thực nghiệm gọi là định luật Ampère. $d\vec{F}$ gọi là lực Ampère.

Từ đó suy ra rằng: Phần tử dòng điện $Id\vec{l}$ đặt tại nơi có cảm ứng từ $\vec{B}$ sẽ chịu tác dụng bởi lực Ampère $d\vec{F}$:

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \quad (4.21)$$

Lực Ampère (cũng là lực từ) $d\vec{F}$ có phương vuông góc với mặt phẳng chứa hai vectơ $Id\vec{l}$ và $\vec{B}$, có chiều theo quy tắc đinh ốc, có độ lớn:

$$dF = IdlB\sin\theta \quad (4.22)$$

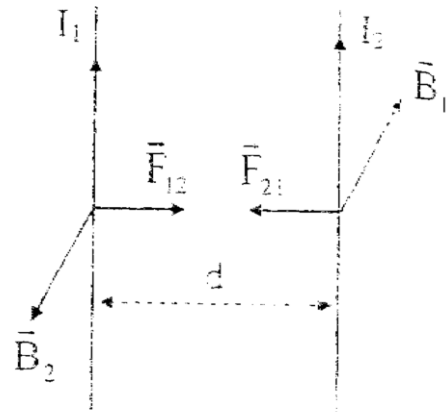
Người ta cũng có thể xác định chiều của lực Ampère theo quy tắc bàn tay trái: Đặt bàn tay trái sao cho các đường sức từ xuyên vào lòng bàn tay, chiều từ cổ tay đến đầu các ngón tay là chiều của dòng điện, thì chiều của ngón tay cái dang ra là chiều của lực từ.

Ví dụ, áp dụng định luật Ampère để tính lực tương tác giữa hai dòng điện thẳng dài vô hạn có cường độ không đổi I_1 và I_2 chạy qua. Gọi d là khoảng cách giữa hai dòng điện. Cảm ứng từ $\vec{B}_1$ do dòng điện I_1 tạo ra tại các điểm trên dòng điện I_2 có phương vuông góc với mặt phẳng của hai dòng điện và có độ lớn:

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi d} \quad (4.23)$$

Lực do dòng điện I_1 tác dụng lên một đơn vị chiều dài của dòng điện I_2 là $\vec{F}_{21}$. Lực này có phương nằm trong mặt phẳng của hai dòng điện, có chiều hướng về phía I_1 nếu hai dòng điện cùng chiều, hoặc có chiều hướng ra xa I_1 nếu hai dòng điện ngược chiều và có độ lớn:

$$F_{21} = I_2 B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \quad (4.24)$$



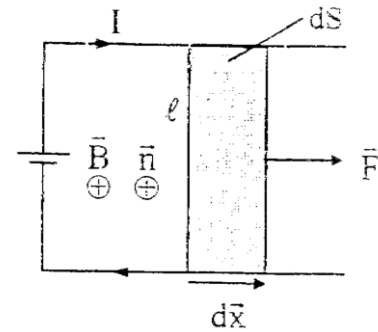
Hình 4.13: Lực tương tác giữa hai dòng điện thẳng song song dài vô hạn

Tương tự, dòng điện I_2 tác dụng lên một đơn vị chiều dài của dòng điện I_1 một lực $\vec{F}_{12}$ cùng phương, ngược chiều và cùng độ lớn với $\vec{F}_{21}$ (hình 4.13).

Như vậy, hai dòng điện song song, cùng chiều thì hút nhau, còn hai dòng điện song song, ngược chiều thì đẩy nhau.

4.4.2 Công của lực từ

Xét một mạch điện kín là một khung dây trong đó có dòng điện không đổi cường độ I chạy qua. Khung dây có một phần đứng yên và một thanh có độ dài l có thể trượt tịnh tiến trên khung. Đặt khung trong từ trường đều $\vec{B}$ sao cho các đường cảm ứng từ vuông góc với mặt phẳng khung. Với chiều của dòng điện và từ trường như hình 4.14 thì thanh l sẽ bị tác dụng của lực $\vec{F}$ hướng sang phải và có độ lớn: $F = IBl$.



Hình 4.14: Công của lực từ

Khi thanh l dịch chuyển một đoạn nhỏ dx thì lực $\vec{F}$ thực hiện một công:

$$dA = F \cdot dx = IBl \cdot dx = IB \cdot dS = I \cdot d\Phi_m$$

Ở đây dS là diện tích mà thanh l vẽ được khi chuyển động một đoạn dx ; còn $d\Phi_m = I \cdot dS$ là số gia của từ thông đi qua khung khi thanh chuyển động.

Nếu thanh l di chuyển từ vị trí (1) đến vị trí (2) thì công A của lực từ là:

$$A_{12} = \int_1^2 I d\Phi_m = I (\Phi_{m2} - \Phi_{m1}) = I \Delta \Phi_m \quad (4.25)$$

Vậy, khi dây dẫn có dòng điện không đổi chạy qua, di chuyển trong từ trường đều thì công của lực từ tác dụng lên dây dẫn bằng tích số của cường độ dòng điện với độ biến thiên của từ thông qua dây dẫn.

4.5 TÁC DỤNG CỦA TỪ TRƯỜNG LÊN MẠCH ĐIỆN KÍN

4.5.1 Lực từ tác dụng lên dây dẫn kín

Xét một mạch điện kín có hình dạng bất kỳ (có thể phẳng hay không phẳng) được đặt trong từ trường đều $\vec{B}$. Mỗi phần tử $I d\vec{l}$ của mạch điện chịu tác dụng của một lực từ:

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

Lực từ tổng hợp tác dụng lên cả mạch điện kín là:

$$\vec{F} = \oint_{(C)} d\vec{F} = \oint_{(C)} I d\vec{l} \times \vec{B}$$

Vì I và B không đổi nên có thể đưa ra khỏi dấu tích phân: $\vec{F} = I \left(\oint_{(C)} d\vec{l} \right) \times \vec{B} = 0$

vì tích phân $\oint_{(C)} d\vec{l} = 0$. Lực từ tổng hợp tác dụng lên mạch điện kín trong từ trường bằng

không nên mạch điện không chuyển động tịnh tiến trong từ trường.

4.5.2 Momen lực từ tác dụng lên khung dây dẫn kín

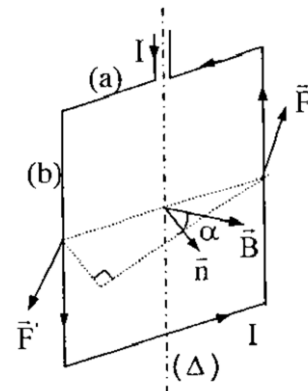
Để đơn giản ta xét một khung dây dẫn cứng hình chữ nhật có các cạnh a, b . Khung có thể quay quanh một trục (Δ) và được đặt trong một từ trường đều $\vec{B}$ vuông góc với trục (Δ) (hình 4.15). Giả sử có dòng điện cường độ I chạy trong khung và gọi $\vec{n}$ là vectơ đơn vị pháp tuyến của mặt khung thì vectơ diện tích $\vec{S}$ là:

$$\vec{S} = S\vec{n} = ab\vec{n}$$

Trên hai cạnh (a), lực từ có giá trị bằng nhau, cùng phương nhưng ngược chiều. Vì vậy chúng hoàn toàn cân bằng nhau.

Trên hai cạnh (b) chịu tác dụng của hai lực từ $\vec{F}$ và $\vec{F}'$ có cùng giá trị:

$$F = F' = IbB$$



Hình 4.15: Tác dụng của từ trường lên mạch điện kín

Hai lực $\vec{F}$ và $\vec{F}'$ tác dụng vào hai cạnh (b) tạo thành một ngẫu lực làm quay khung góc α , sao cho khung vuông góc với $\vec{B}$. Khi đó $\vec{n}$ và $\vec{B}$ song song, cùng chiều. Độ lớn của momen ngẫu lực bằng

$$M = BIab \sin \alpha = BIS \sin \alpha \quad (4.26)$$

Ở đây S là diện tích của khung dây, còn α là góc giữa vectơ đơn vị pháp tuyến $\vec{n}$ của khung với vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$.

Nếu khung dây gồm N vòng giống nhau thì:

$$M = NBIab \sin \alpha = NBIS \sin \alpha \quad (4.27)$$

Biểu thức (4.26) có thể viết dưới dạng vectơ:

$$\vec{M} = I(\vec{S} \times \vec{B}) \quad (4.28)$$

Đưa vào định nghĩa momen từ của dòng điện kín:

$$\vec{p}_m = I\vec{S} \quad (4.29)$$

Khi đó (4.28) có dạng:

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B} \quad (4.30)$$

Hiện tượng quay khung dây trong từ trường đều được áp dụng trong các máy đo điện.

4.6 CHUYỂN ĐỘNG CỦA HẠT MANG ĐIỆN TRONG TỪ TRƯỜNG

4.6.1 Lực Lorentz

Một hạt mang điện tích q (gọi tắt là hạt điện) chuyển động với vận tốc $\vec{v}$ tương đương như dòng điện và đại lượng vật lý đặc trưng cho dòng điện là vectơ phần tử dòng điện. Người ta đã chứng minh rằng: $I d\vec{l} = q\vec{v}$

Nếu hạt mang điện q chuyển động trong từ trường $\vec{B}$ thì sẽ chịu tác dụng của lực từ là:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (4.31)$$

Biểu thức (4.31) do nhà vật lý người Hà Lan Lorentz rút ra từ thực nghiệm và được gọi là lực Lorentz.

Lực Lorentz có phương vuông góc với các vectơ $\vec{v}$ và $\vec{B}$, có chiều sao cho ba vectơ $q\vec{v}$, $\vec{B}$, $\vec{F}$ lập thành tam diện thuận, và có độ lớn:

$$F = |q|Bv\sin\theta \quad (4.32)$$

Lực Lorentz luôn góc với vectơ vận tốc của hạt điện, nghĩa là vuông góc với đường đi nên không sinh công. Vì thế độ lớn vận tốc của hạt điện là không đổi. Lực Lorentz chỉ làm cho vectơ vận tốc của hạt điện thay đổi về phương mà không làm thay đổi về độ lớn. Nói cách khác, hạt điện chuyển động trong từ trường đều thì chỉ có gia tốc pháp tuyến mà không có gia tốc tiếp tuyến.

Lưu ý: Người ta thường dùng *quy tắc bàn tay trái* để xác định chiều của lực Lorentz tác dụng lên điện tích dương và *quy tắc bàn tay phải* đối với điện tích âm:

Đặt bàn tay trái (hoặc phải) sao cho các đường cảm ứng từ xuyên qua lòng bàn tay, chiều từ cổ tay đến bốn ngón tay là chiều của vectơ vận tốc $\vec{v}$, thì ngón tay cái choãi ra 90° là chiều của lực Lorentz.

4.6.2 Chuyển động của hạt điện trong từ trường đều

❖ *Trường hợp 1:* Vectơ vận tốc $\vec{v}$ của hạt điện song song với vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$.

Trong trường hợp này lực Lorentz $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = 0$, hạt chuyển động thẳng đều.

❖ *Trường hợp 2:* Vectơ vận tốc $\vec{v}$ của hạt điện vuông góc với vectơ cảm ứng từ $\vec{B}$.

Lực Lorentz trong trường hợp này có độ lớn: $F = |q|Bv = \text{const}$

Theo định luật II Newton, ta có:

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

Do đó, bán kính quỹ đạo bằng:

$$r = \frac{mv}{|q|B} = \text{const} \quad (4.33)$$

với m , q lần lượt là khối lượng và điện tích của hạt điện. Hạt điện chuyển động tròn đều với tốc độ v .

Thời gian T để hạt điện chuyển động được một vòng (một chu kỳ) là:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B} \quad (4.34)$$

❖ **Trường hợp 3:** Vectơ vận tốc $\vec{v}$ của hạt điện xiên góc với cảm ứng từ $\vec{B}$.

Phân tích vectơ $\vec{v}$ thành hai thành phần: thành phần $\vec{v}_{//}$ song song với đường sức từ, thành phần $\vec{v}_{\perp}$ vuông góc với các đường sức từ (hình 4.16).

Ta có: $\vec{v} = \vec{v}_{//} + \vec{v}_{\perp}$

trong đó:
$$\begin{cases} v_{\perp} = v \sin \theta \\ v_{//} = v \cos \theta \end{cases}$$

Lực Lorentz tác dụng lên hạt điện:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = q(\vec{v}_{//} + \vec{v}_{\perp}) \times \vec{B}$$

Vì $\vec{v}_{//}$ song song với $\vec{B}$ nên $q\vec{v}_{//} \times \vec{B} = 0$

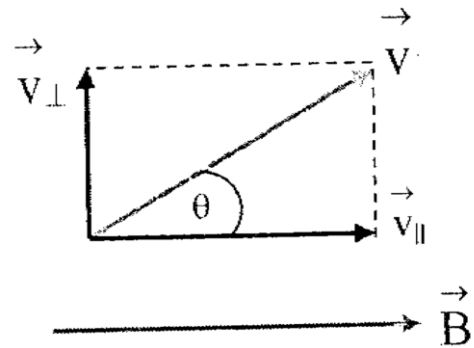
Vậy: $\vec{F} = q\vec{v}_{\perp} \times \vec{B}$; độ lớn $F = qv_{\perp}B$ (4.35)

Nhận xét: Chuyển động của hạt điện là tổng hợp của hai chuyển động:

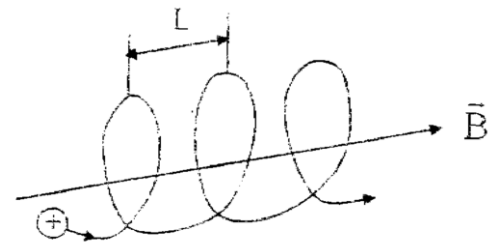
❖ Chuyển động tịnh tiến theo phương của từ trường $\vec{B}$ với vận tốc không đổi $v_{//} = v \cos \theta$.

❖ Chuyển động tròn đều trong mặt phẳng vuông góc với $\vec{B}$. Bán kính của chuyển động tròn này bằng:

$$r = \frac{mv_{\perp}}{|q|B} = \frac{mv \sin \theta}{|q|B} \quad (4.36)$$



Hình 4.16



Hình 4.17: Quỹ đạo hạt điện trong từ trường đều

Như vậy, quỹ đạo của điện tích q là đường xoắn lò xo nằm trên mặt trụ có trục song song với $\vec{B}$.

Khoảng cách giữa hai vòng xoắn liên tiếp gọi là bước xoắn. Bước xoắn được xác định theo công thức:

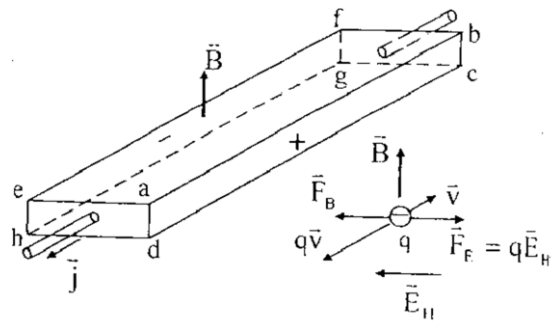
$$L = v_{//} T = 2\pi \frac{mv \cos \theta}{|q|B} \quad (4.37)$$

Chiều xoáy của đường xoắn phụ thuộc dấu của điện tích. Nếu $q > 0$ thì đường xoắn có chiều ngược chiều kim đồng hồ, nếu $q < 0$ thì đường xoắn có chiều thuận chiều kim đồng hồ.

4.7 HIỆU ỨNG HALL

Hiệu ứng Hall liên hệ đến sự phát sinh một hiệu điện thế khi một dây dẫn có dòng điện chạy qua được đặt trong một từ trường.

Để đơn giản ta xét một vật dẫn điện hình hộp đặt xen vào một mạch có dòng điện không đổi chạy qua và giả sử mật độ dòng điện $\vec{j}$ song song với cạnh ab (hình



Hình 4.18: Hiệu ứng Hall

4.18). Các hạt điện chuyển động có thể mang điện tích âm hoặc dương. Ở đây ta xét trường hợp các điện tích âm (vật dẫn điện bằng kim loại).

Nếu cho tác dụng lên khối vật dẫn điện $abcdefgh$ một từ trường $\vec{B}$ thẳng góc với mặt $abfe$ thì một hiệu điện thế U_H sẽ xuất hiện giữa hai mặt $abcd$ và $efgh$.

Hiệu ứng trên do nhà vật lý người Mỹ Hall đưa ra năm 1879 và được gọi là hiệu ứng Hall. Hiệu điện thế U_H gọi là hiệu điện thế Hall. Hiệu ứng Hall được giải thích như sau:

Khi chuyển động, hạt điện q (mang điện tích âm) chịu tác dụng của lực $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ hướng về mặt $efgh$. Do đó những điện tích âm bị lệch về mặt $efgh$ và tụ tập lại tại mặt này, trong khi những điện tích dương xuất hiện tại mặt $abcd$. Hệ thống thành

một tụ điện: Một điện trường tĩnh $\vec{E}_H$ hướng từ mặt abcd đến mặt efgh. Điện trường này tác dụng lên q một lực tĩnh điện: $\vec{F}_E = q\vec{E}_H$.

E_H tăng theo mật độ điện tích tụ tập trên hai mặt abcd và efgh.

$$\text{Khi } \vec{F}_B + \vec{F}_E = 0 \text{ hay } q\vec{v} \times \vec{B} + q\vec{E}_H = 0 \quad (4.38)$$

thì $\vec{E}_H$ đạt giá trị giới hạn và các điện tích di chuyển không bị lệch về mặt efgh nữa. Các hạt điện chuyển động mà không bị lệch trong điện trường và từ trường vuông góc.

$\vec{E}_H$ được gọi là điện trường Hall, hiệu điện thế Hall được xác định bởi biểu thức:

$$U_H = E_H \cdot L \quad (4.39)$$

trong đó L là khoảng cách giữa hai mặt abcd và efgh.

Gọi n là mật độ điện tích chuyển động, ta có thể viết đẳng thức (4.38) như sau:

$$nq\vec{v} \times \vec{B} + nq\vec{E}_H = 0$$

$$\text{mà } \vec{j} = nq\vec{v} \text{ nên } \vec{E}_H = -\frac{1}{nq}(\vec{j} \times \vec{B})$$

$$\text{Gọi } R_H = \frac{1}{nq} \quad (4.40)$$

là hằng số Hall, ta được:

$$\vec{E}_H = -R_H(\vec{j} \times \vec{B}) \quad (4.41)$$

Từ (4.40) ta nhận thấy, dấu và trị số của hằng số Hall cho biết dấu của các hạt mang điện tạo ra dòng điện và mật độ của chúng.

Hiệu ứng Hall có nhiều ứng dụng trong kỹ nghệ, trong việc thiết kế các bộ phận cảm biến không tiếp xúc. Cảm biến là các dụng cụ đo trạng thái của hệ và có thể được dùng để chuyển những tín hiệu sao cho một đáp ứng có thể được làm đối với những thay đổi của hệ. Nguyên tắc của cảm biến là một sự thay đổi trong từ trường

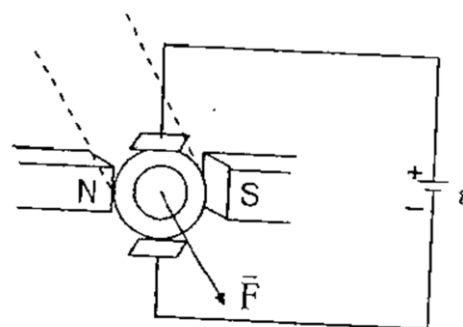
trong những mẫu dẫn điện mà qua đó ta đo hiệu điện thế Hall sẽ cho sự thay đổi tương ứng trong hiệu điện thế Hall.

Sau đây là vài ví dụ: Những bàn phím máy vi tính mà thường được dùng nhiều và liên tục được thiết kế bằng cách dùng bộ cảm biến Hall. Một nam châm vĩnh cửu nhỏ được gắn vào đáy mỗi nút trên bàn phím, bên dưới có một mẫu dẫn điện mà qua đó hiệu điện thế Hall được đo. Trong những thiết kế hiện đại, các mẫu dẫn điện này gồm một lớp dẫn điện mỏng được gắn trên chất nền thường làm bằng xaphia. Sự thay đổi trong vị trí của nam châm đối với lớp dẫn điện có thể làm thay đổi từ trường ở trong lớp dẫn điện này. Những thay đổi như vậy dẫn tới những thay đổi trong hiệu điện thế và sẽ dẫn đến máy vi tính để báo hiệu rằng một nút trên bàn phím đã được ấn.

4.8 MỘT VÀI ỨNG DỤNG

4.8.1 Bơm điện từ

Lực tác dụng lên các hạt mang điện trong điện từ trường là cơ sở lý thuyết để chế tạo bơm điện từ. Kỹ thuật này được dùng để bơm các dòng chất lỏng kim loại, ví dụ như natri nóng chảy. Đặc biệt bơm điện từ được dùng để duy trì sự lưu thông máu trong tim nhân tạo.



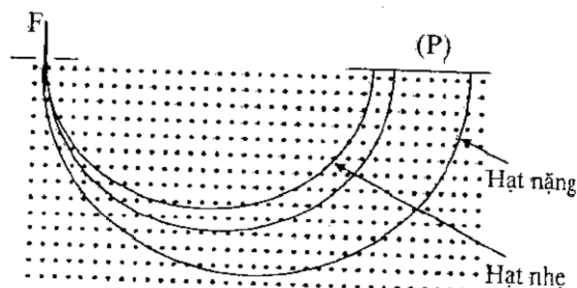
Hình 4.19: Bơm điện từ

Cấu trúc của bơm điện từ để duy trì sự lưu thông máu được trình bày trong hình 4.19. Như ta biết trong máu có các ion dương và âm, dưới tác dụng của điện trường, các ion dương chuyển động xuống dưới tạo thành một dòng điện có chiều từ trên xuống dưới. Dòng điện này lại nằm trong từ trường có chiều từ trái sang phải.

Dưới tác dụng của từ trường, các hạt mang điện (cả âm lẫn dương) đều phải dịch chuyển từ trong ra ngoài theo chiều của động mạch. Nhờ vậy mà máu có thể lưu thông được.

4.8.2 Xác định điện tích riêng của ion, khối phổ kế

Nếu các hạt mang điện có cùng điện tích nhưng có khối lượng khác nhau, thì khi ra khỏi khe hở của máy chọn vận tốc và chuyển động trong cảm ứng từ $\vec{B}$, quỹ đạo của chúng là những vòng tròn có bán kính khác nhau. Bán kính của những hạt nặng lớn hơn bán kính của những hạt nhẹ. Nếu ta đặt một phim chụp ảnh P như trong hình 4.20, trên phim sẽ được một hệ thống những vạch song song gọi là khối phổ.



Hình 4.20: Khối phổ kế

Giả sử máy chọn vận tốc phóng ra những ion dương O^+ và H^+ , có điện tích $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$, bán kính quỹ đạo của O^+ và H^+ là R_O và R_H tỷ lệ với khối lượng m_O và m_H của chúng. Nhưng m_O và m_H có thể coi như bằng khối lượng nguyên tử A_O và A_H của oxy và hiđrô.

$$\text{Vậy: } \frac{A_H}{A_O} = \frac{R_H}{R_O}$$

Ta có thể đo được R_O và R_H , do đó nếu ta ấn định rằng khối lượng nguyên tử oxy là 16,0000 đơn vị khối lượng nguyên tử (trong hệ thống đơn vị hóa học) thì đẳng thức trên cho ta tính được khối lượng của nguyên tử hiđrô.

Cũng có thể dùng phương pháp khối phổ kế để đo khối lượng nguyên tử của các nguyên tố bằng cách so sánh với khối lượng nguyên tử của oxy, được chọn làm nguyên tố chuẩn. Khi khảo sát khối phổ của oxy, người ta nhận thấy rằng khối phổ có ba vạch, chứng tỏ oxy có ba đồng vị, đó là ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O ; trong đó ^{16}O chiếm 99,76% hỗn hợp. Vì vậy các nhà vật lý không chọn oxy làm nguyên tố chuẩn mà lại chọn carbon (C) và ấn định rằng khối lượng nguyên tử của C là 12,0000.

Phương pháp khối phổ kế còn cho ta xác định mật độ các chất đồng vị của một nguyên tố: thay vì của những vạch quang phổ, các máy đếm sẽ cho mật độ các chất đồng vị.