

第12章 稳恒磁场(4/4)

12.1 磁场 磁感应强度

一、磁现象→二、磁感应强度→三、磁感应线

12.2 毕奥—萨伐尔定律

一、毕奥-萨伐尔定律→二、毕-萨定律应用→三、运动电荷的磁场

12.3 磁场的高斯定理 安培环路定理

一、磁感线 磁通量→二、磁场的高斯定理→三、安培环路定理→四、安培环路定理应用

12.4 磁场对电流与运动电荷的作用

一、安培力(安培定律)→二、平行长直载流导线间的作用力→三、磁场对平面载流线圈的作用→四、磁力的功



12.5 带电粒子在电场和磁场中的运动

一、带电粒子在横向磁场中的圆周运动→二、带电粒子在磁场中的螺旋线运动→三、霍尔效应(洛伦兹力)

12.6 电场和磁场的统一性与相对性

一、洛伦兹力

在定义磁感应强度 B 时，我们用运动电荷在磁场中所受的力来描述，这就是洛伦兹力。

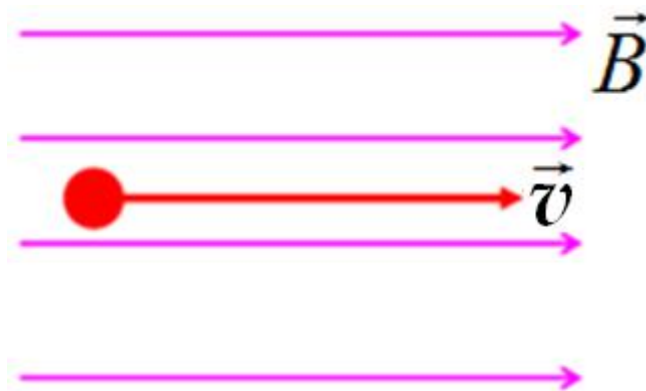
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

洛伦兹力对运动电荷不做功，也不满足牛顿第三定律！

二、带电粒子在均匀磁场中的运动

$$(1) \quad \vec{v} // \vec{B} \quad \vec{F}_m = 0$$

带电粒子作匀速直线运动



(2) $\vec{v} \perp \vec{B}$

洛伦兹力的大小

$$f = qvB$$

方向：垂直速度的和磁场的方向

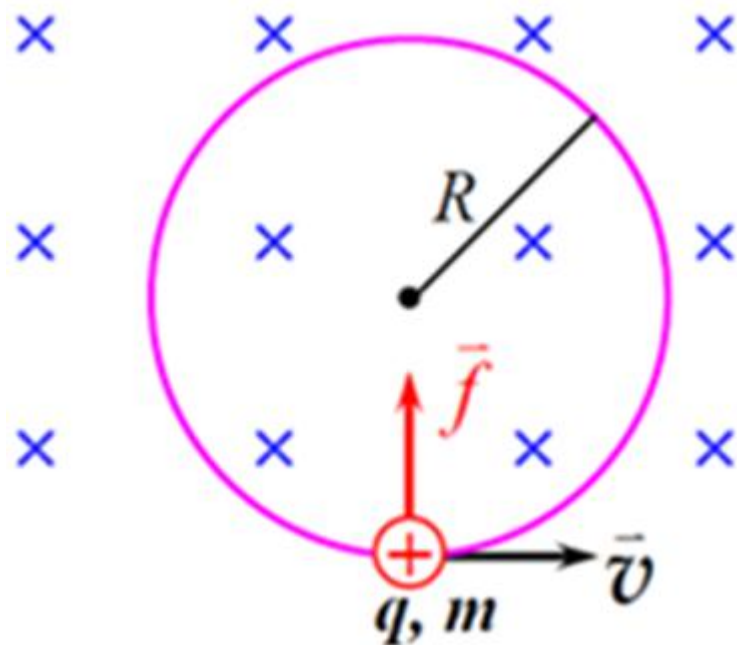
$$qvB = m \frac{v^2}{R}$$

回旋半径

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

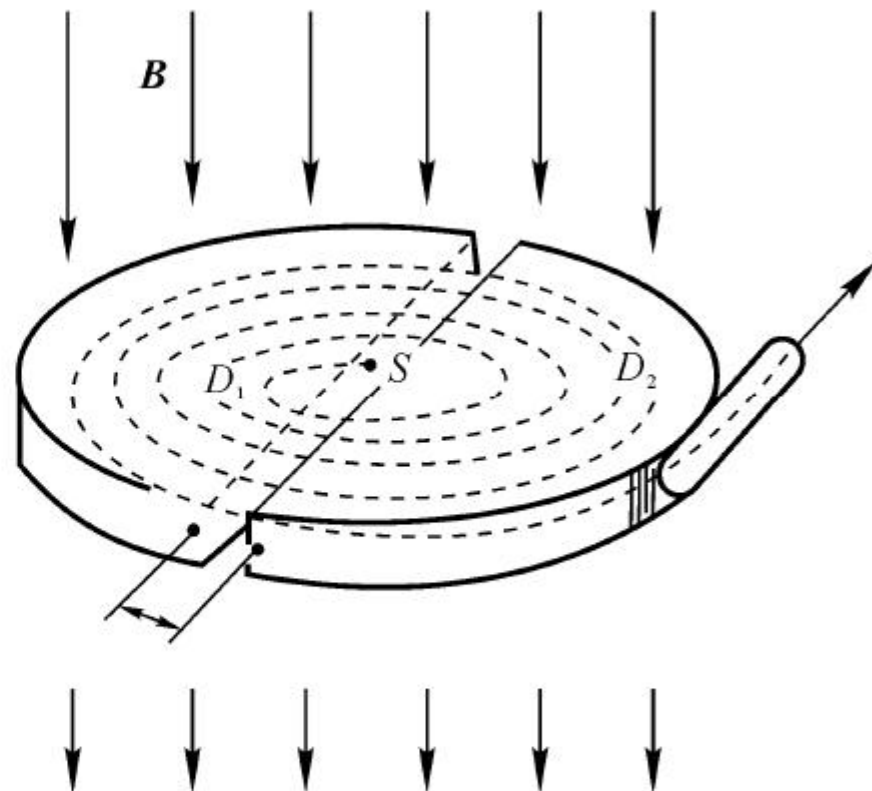
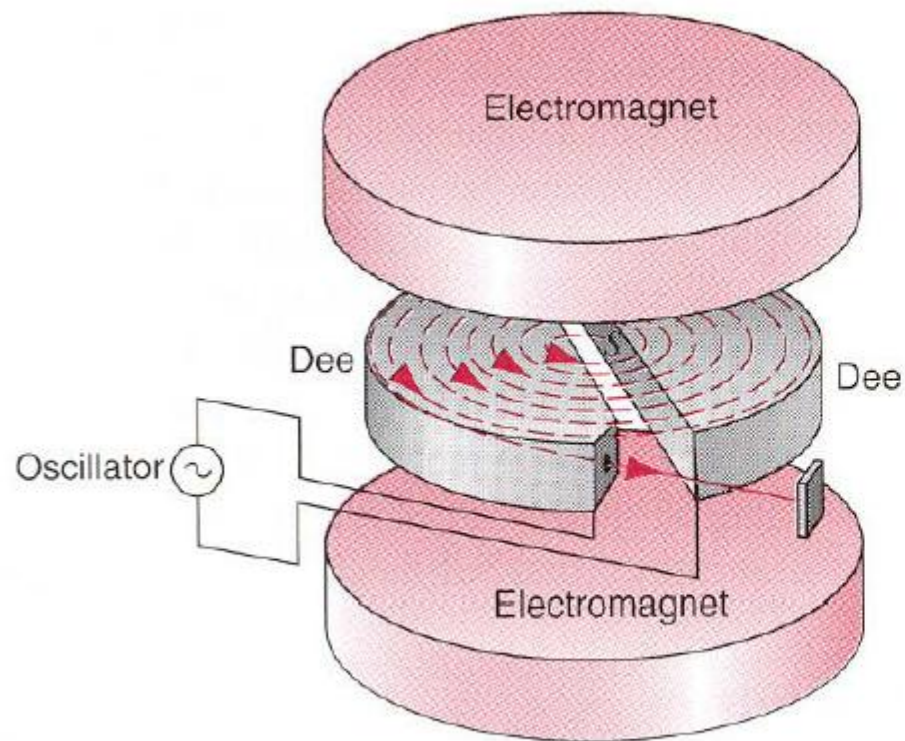
回旋周期

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \frac{mv}{qB} = \frac{2\pi m}{qB}$$



周期与速度无关

了解质谱仪、回旋加速器、同步加速器及对撞机等工作原理。

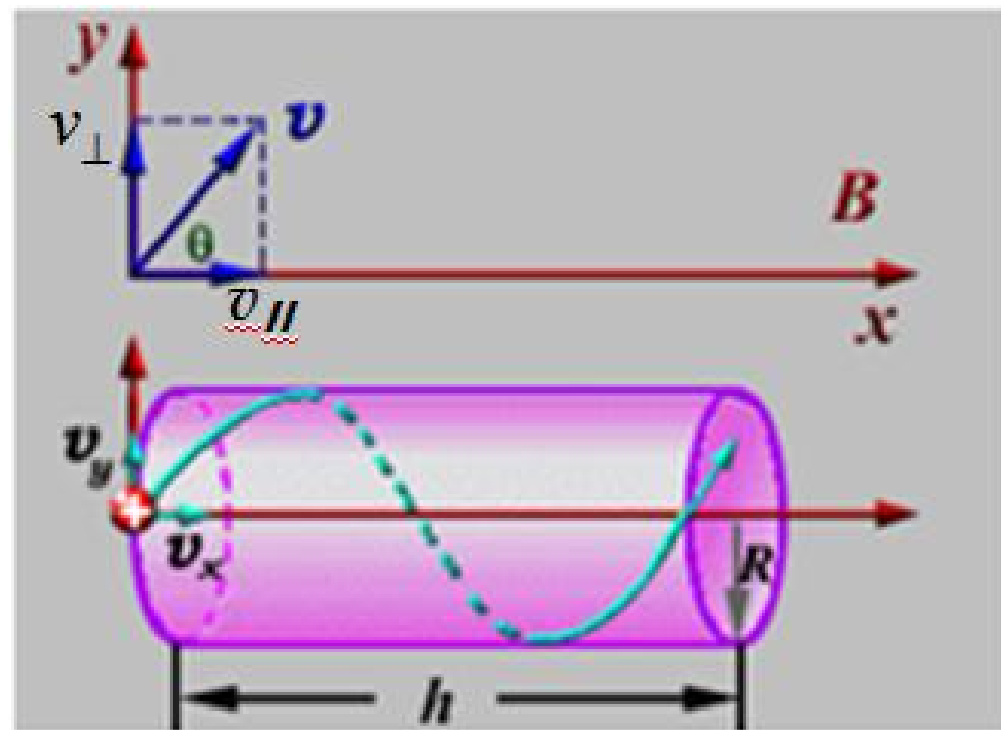


(3) \vec{v} 与 \vec{B} 有夹角 θ

$$\begin{cases} v_{\parallel} = v \cos \theta \\ v_{\perp} = v \sin \theta \end{cases}$$

$F_{\parallel}=0$, 匀速直线运动

$F_{\perp}=qvB\sin\theta$, 匀速圆周运动



粒子作螺旋线向前运动，轨迹是螺旋线。

回旋半径

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv}{qB} \sin \theta$$

螺距——粒子回转一周所前进的距离

回旋周期

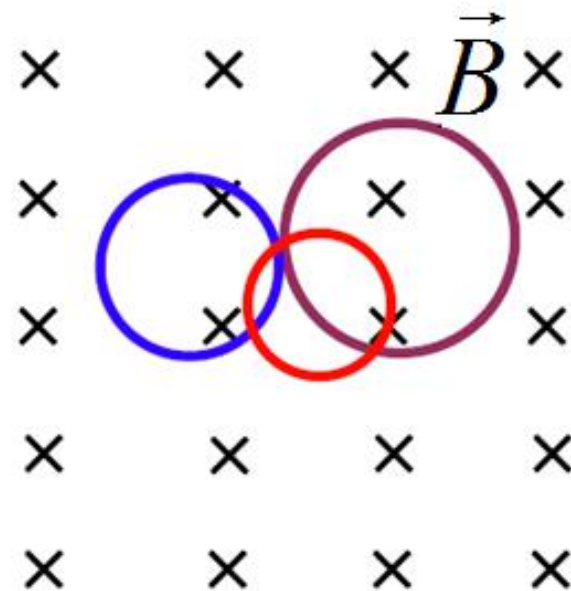
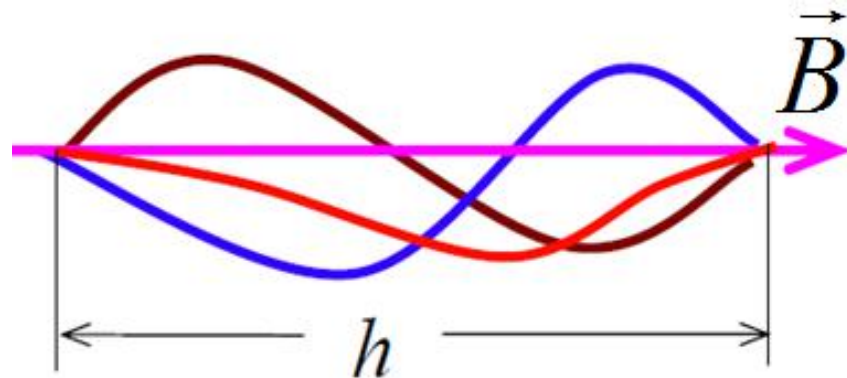
$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$d = v_{\parallel} T = \frac{2\pi m}{qB} v \cos \theta$$

* 磁聚焦 *magnetic focusing*

一束发散角不大的具有**相同荷质比**的带电粒子束，若这些粒子**沿磁场方向的分速度大小一样**，它们有相同的螺距，经过一个周期它们将重新会聚在另一点这种现象叫**磁聚焦**。

它广泛应用与电真空器件中如**电子显微镜**中。它起了光学仪器中的类似透镜的作用（**磁透镜**）。

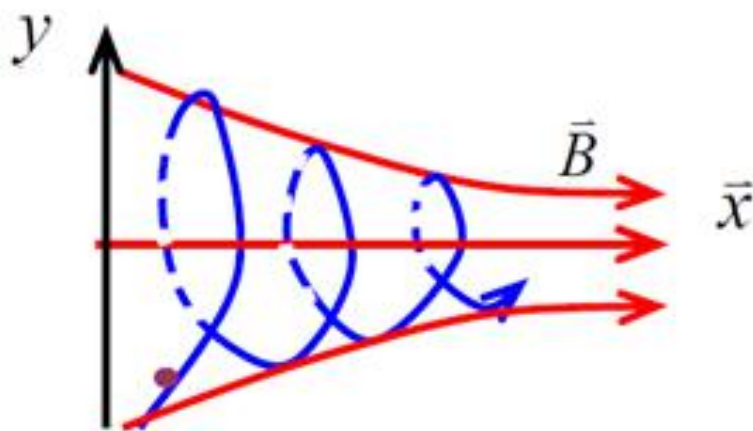


三、带电粒子在非均匀磁场中的运动

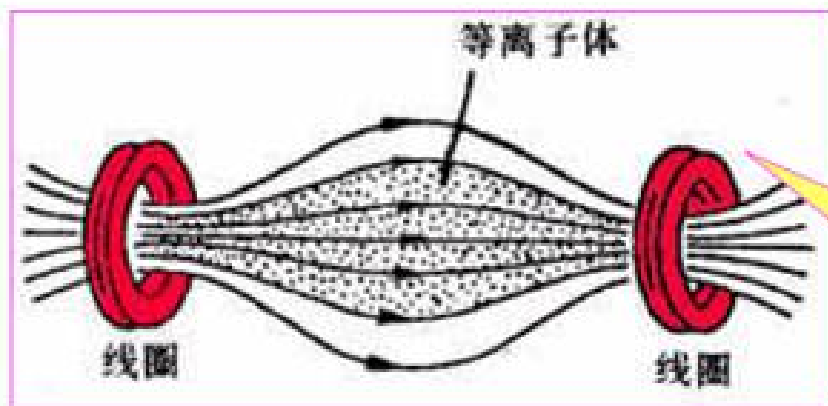
带电粒子进入轴对称会聚磁场，由于磁场的不均匀，洛仑兹力的大小要变化，所以不是匀速圆周运动。且半径逐渐变小。

使沿磁场的运动被抑，而被迫反转。象被“反射”回来一样——磁镜。

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv}{qB} \sin \theta$$



* 应用：
磁约束



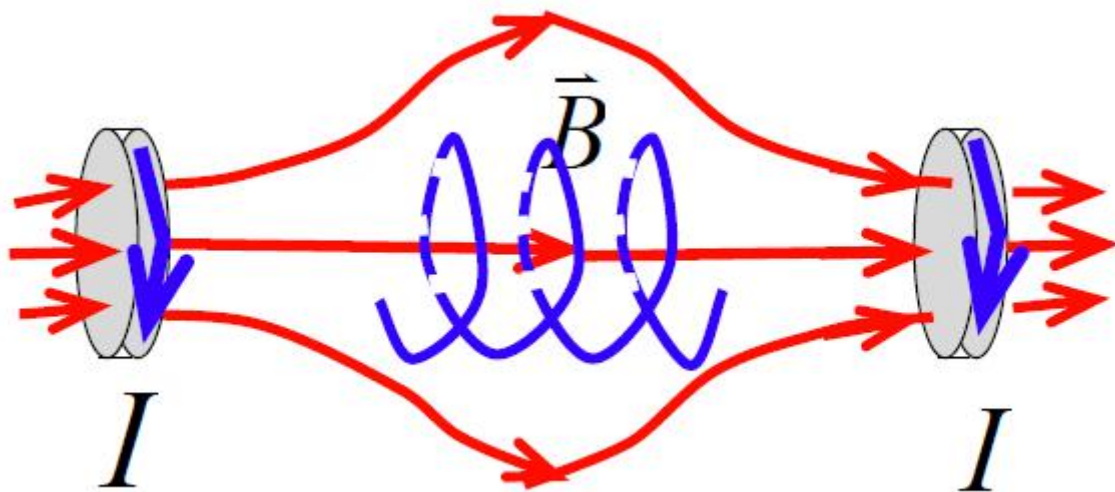
用于受控
热核反应中

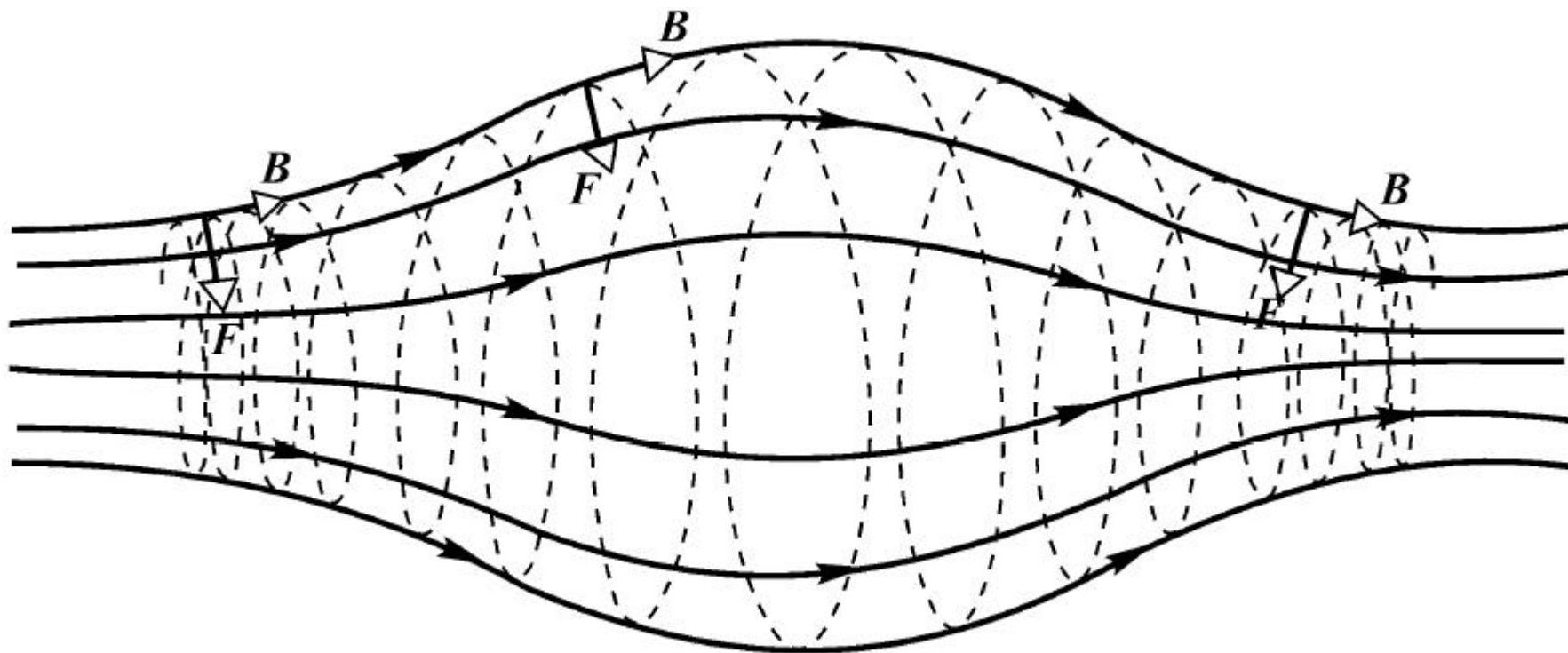
磁约束

带电粒子进入轴对称的会聚磁场，它便被约束在一根磁力线附近的很小范围内，它只有**纵向沿磁力线**的运动，而无**横向**跨越。或说在横向输运过程中它受到很大的限制。

* 磁约束

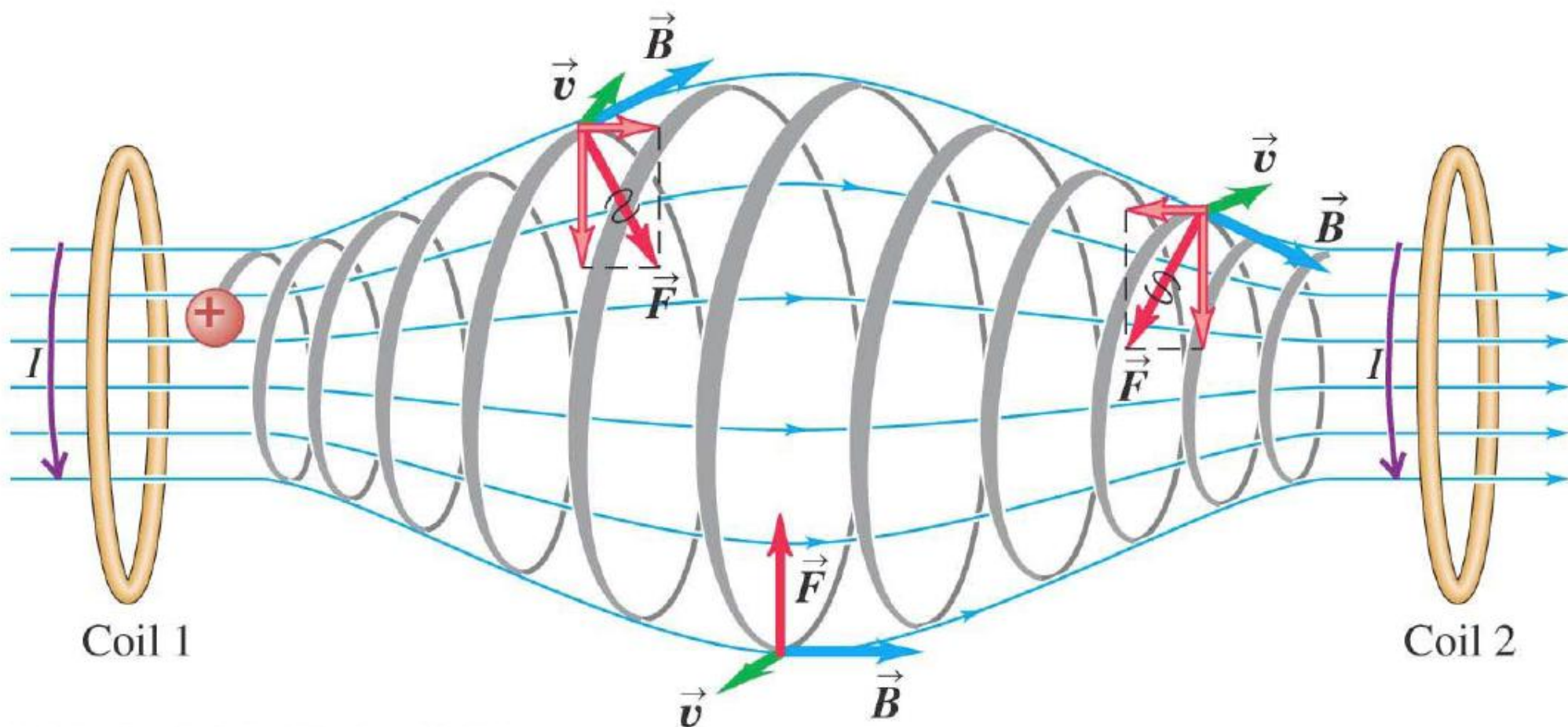
用于受控热核反应中





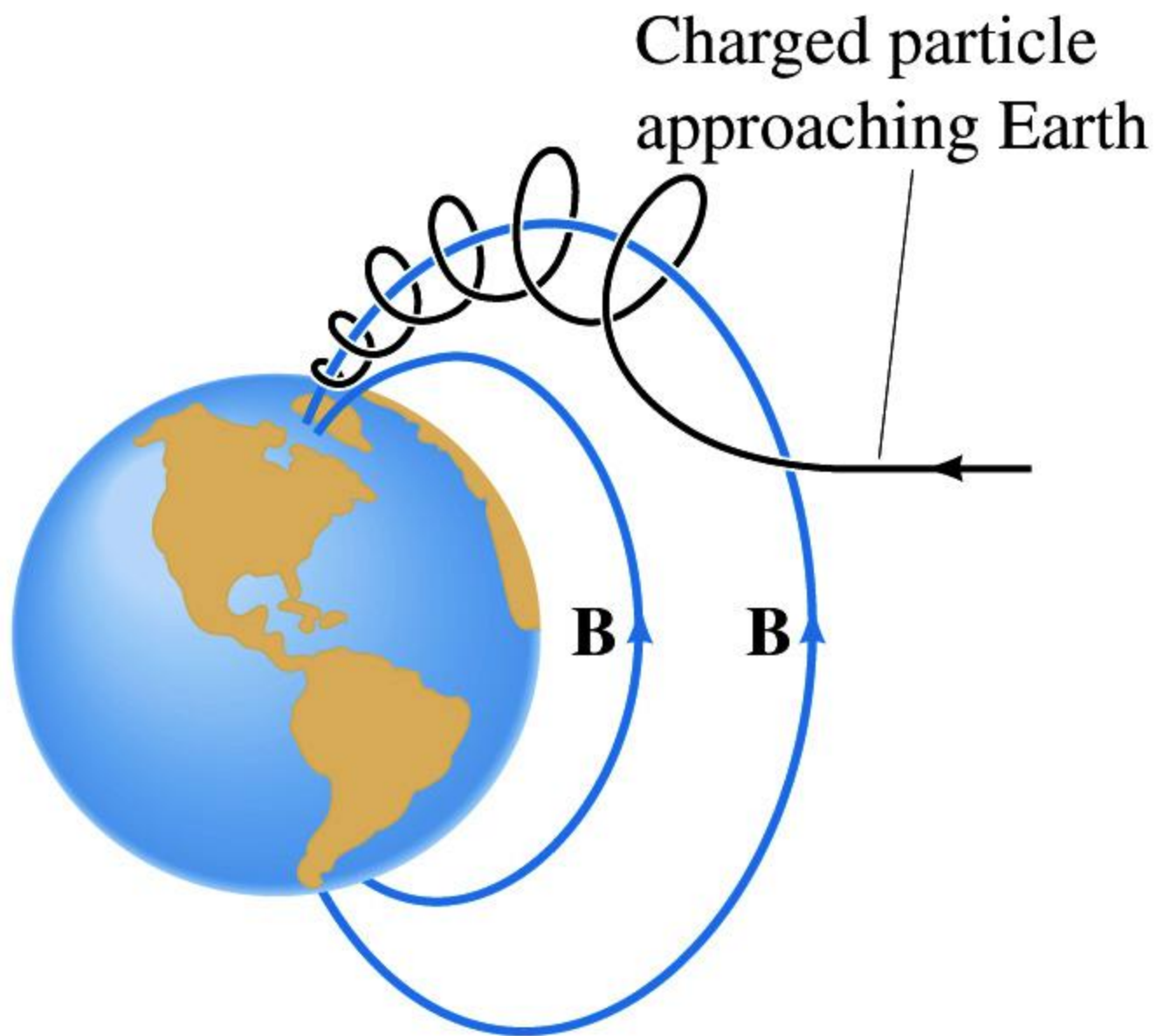
教材p156

原因分析: $\vec{F} \perp \vec{v} \times \vec{B}$



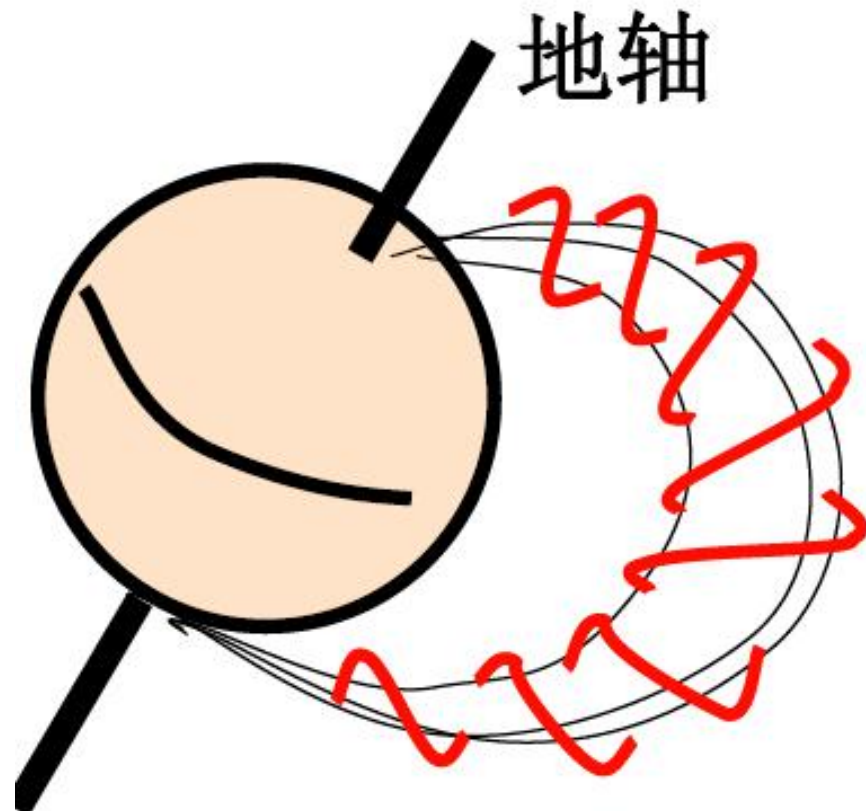
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

等离子体的磁约束——托卡马克装置

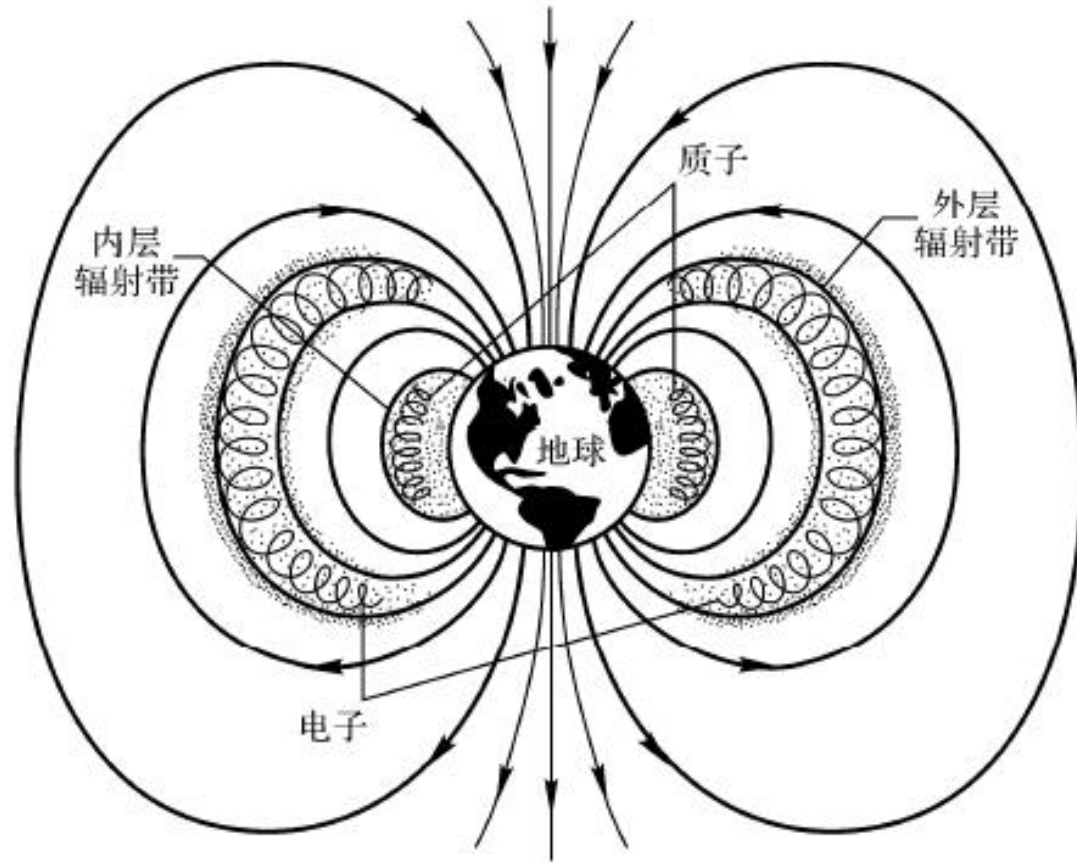


* 范阿仑辐射带 *Van Allen belts*

带电粒子（如宇宙射线的带电粒子）被地磁场捕获，绕地磁感应线作螺旋线运动，在近两极处地磁场增强，作螺旋运动的粒子被折回，结果沿磁力线来回振荡形成范阿仑辐射带。



因为它具有较高能量，曾在人造卫星的发射等空间科学中发现了它，并给予了必要的考虑。



当太阳黑子活动引起空间磁场的变化，使粒子在两极处的磁力线引导下，在两极附近进入大气层，能引起美妙的北极光。



图 1 弧状极光



图 2 带状极光

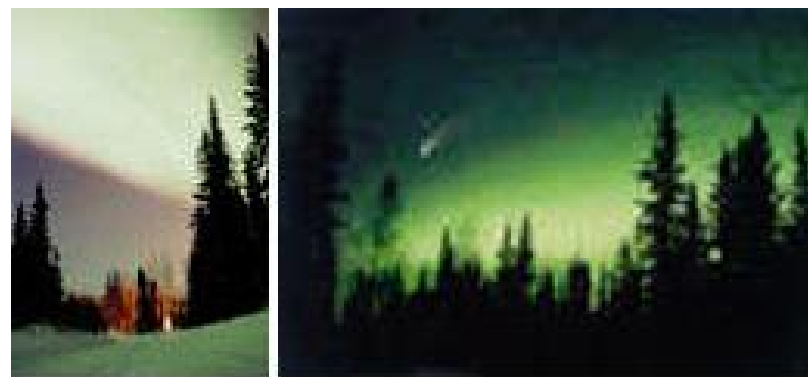
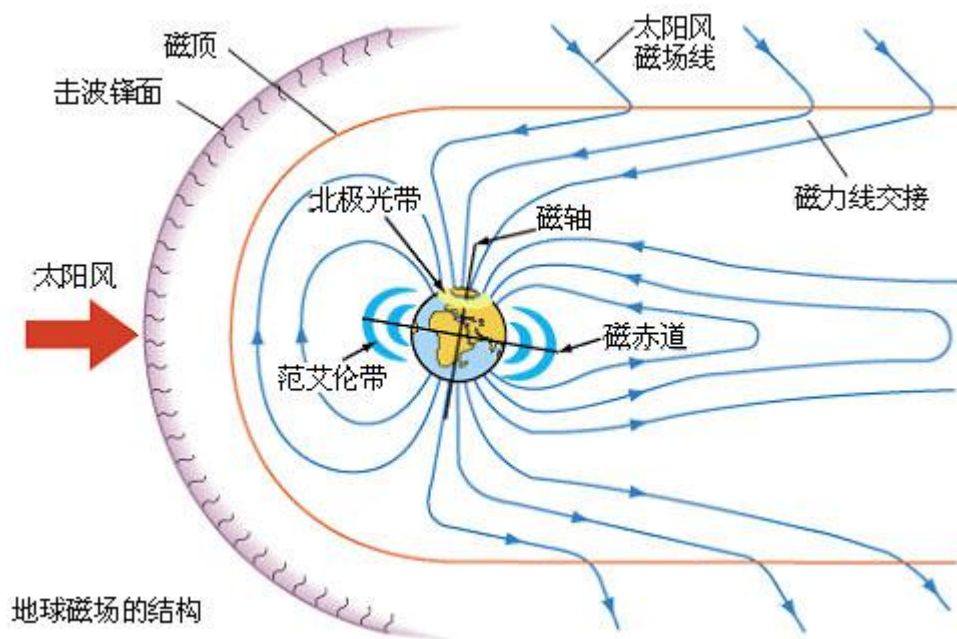


图 3 片状极光

四、带电粒子在电场和磁场中的运动

在定义磁感应强度 B 时，我们用运动电荷在磁场中所受的力来描述，这就是洛伦兹力。

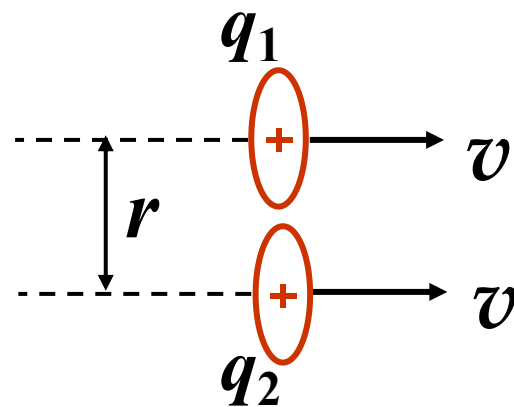
$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

如果空间同时存在有电场，则运动带电粒子所受的洛伦兹力为：

$$\vec{F}_m = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

(1) 运动电荷的磁力和电力

设电荷 q_1 和 q_2 以相同速度 v ($v \ll c$)相距 r 平行运动，因相对静止，两电荷所受电场力和静电场时相同。



所受电场力 $F_{e1} = F_{e2} = q_1 E_2 = q_2 E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$

所受电磁力* $F_{m1} = F_{m2} = q_1 v B_2 = q_2 v B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 q_2 v^2}{r^2}$

磁力与电力之比 $\frac{F_m}{F_e} = \epsilon_0 \mu_0 v^2$

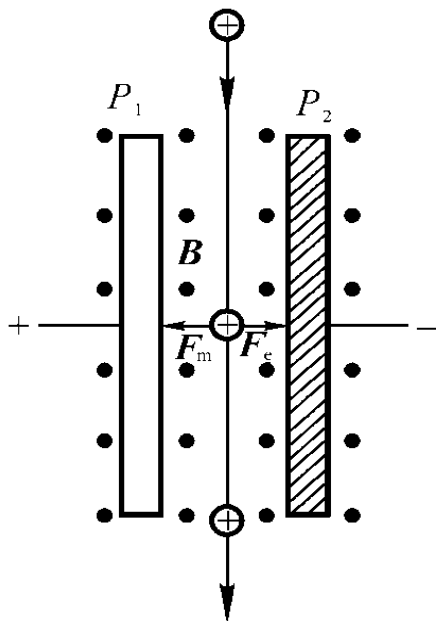
根据量纲关系, $\sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$ 应具有速度的单位, 设 $c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$

代入数据 $\epsilon_0 \mu_0$, 得 $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$, 这是光速!

这一关系导致了人们对光是电磁波的认识。

电磁力比电场力小得多 $\frac{F_m}{F_e} = \frac{v^2}{c^2}$

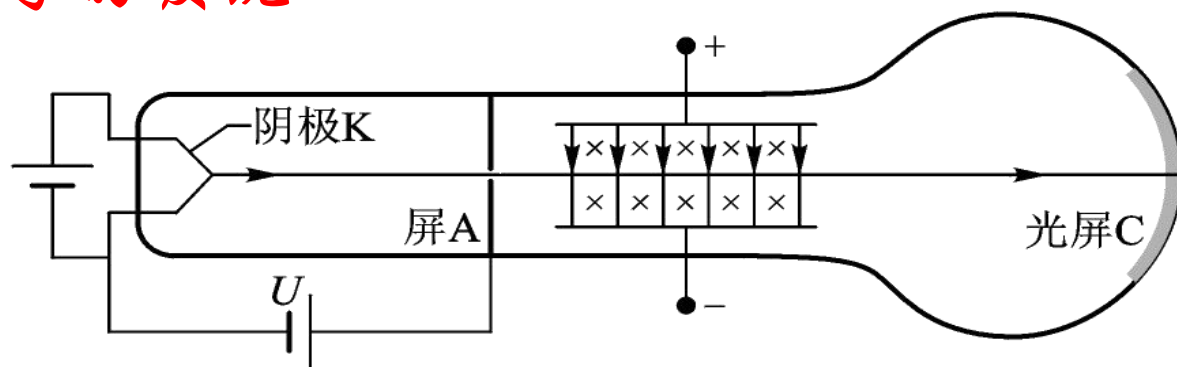
(2) 速度选择器



$$qvB = qE$$

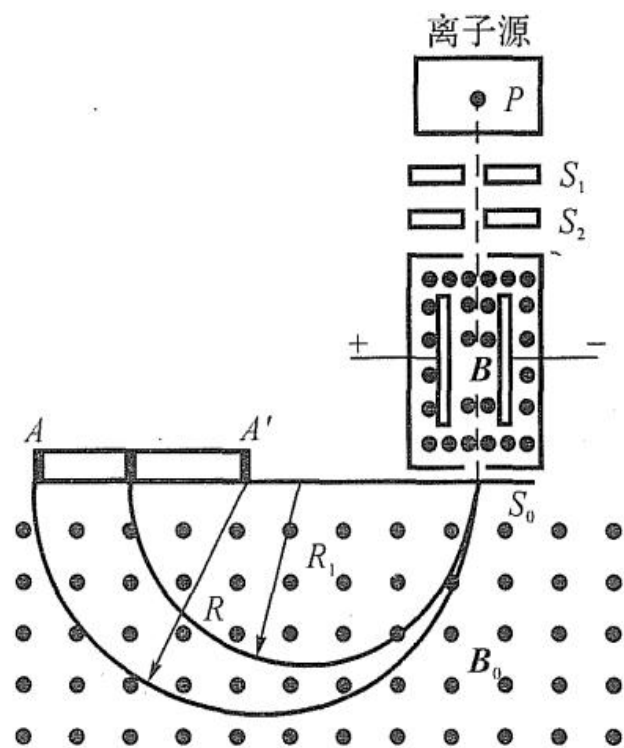
$$v = \frac{E}{B}$$

(3) 汤姆孙管 电子的发现



$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{2}mv^2 = eU \\ v = \frac{E}{B} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{e}{m} = \frac{E^2}{2UB^2}$$

补充例 质谱仪是分析同位素用的重要仪器,其原理如图所示:离子源 P 所产生的离子经过窄缝 S_1 和 S_2 之间的加速电场加速后,进入速度选择器;速度选择器中的电场强度 E 和磁感应强度 B 都垂直于离子速度 v , 且 $E \perp B$; 通过速度选择器的离子接着进入均匀磁场 B_0 中,沿半圆周运动并达到记录它们的照相底片上形成谱线。如果测得某一谱线 A 到入口处 S_0 的距离为 x , 试证明与此谱线相应的离子的质量为 $m = \frac{qB_0 Bx}{2E}$, q 为离子所带的电量。

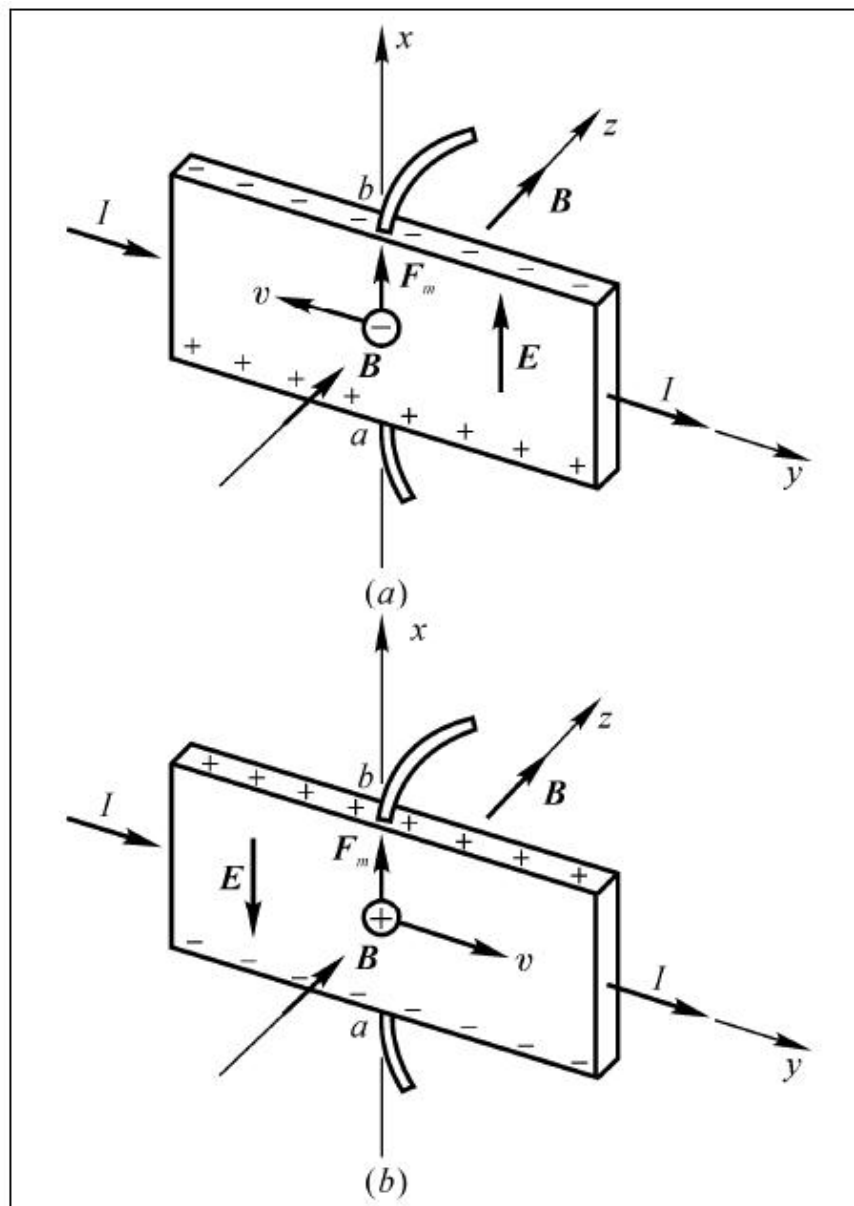


证明 由 $qE = qvB$ 知,能够通过速度选择器的离子速率为 $v = E/B$ 。底片上谱线 A 到入口处 S_0 的距离 x , 恰好等于离子圆周运动的直径

$$x = 2R = \frac{2mv}{qB_0} = \frac{2mE}{qBB_0} \quad \therefore \quad m = \frac{qB_0 Bx}{2E}$$

(4) 霍尔效应

要求会判别
有关问题，
关键是磁场
力的方向！

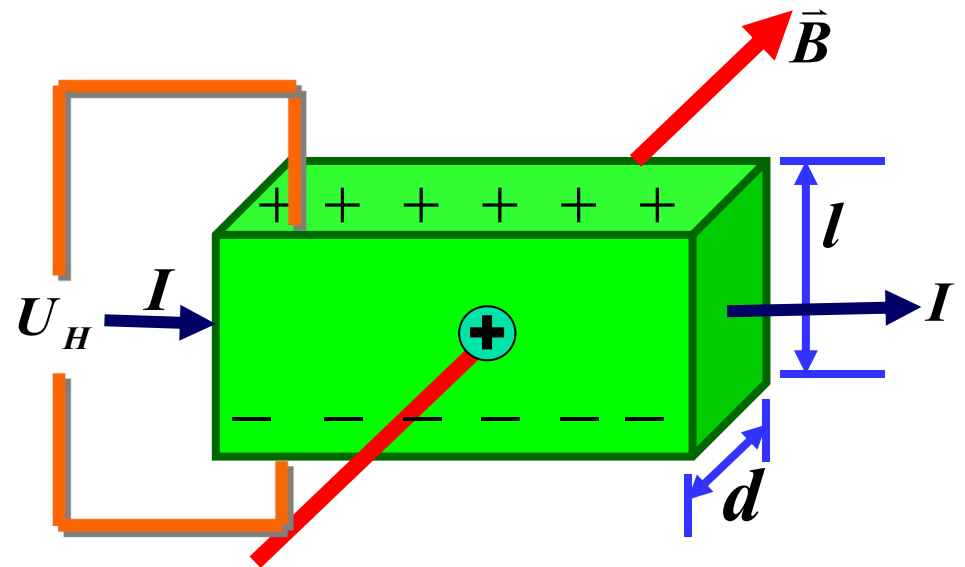


在均匀磁场中放置的矩形截面的载流导体中，若电流方向与磁场方向垂直，则在导体上垂直于电流又垂直于磁场方向上，上、下两表面将出现电势差。这种现象称为**霍尔效应**。所产生的横向电势差称为**霍尔电势差**。霍尔效应---1879年由年仅24岁的美国物理学家霍尔首先发现。

霍尔效应是应用运动电荷在磁场中受**洛伦兹力**所引起：

$$\vec{f} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

方向也可由左手定则判定



cf教材p176习题12.40情形

$$f_m = qvB$$

$$f_e = qE_H = q \frac{U_H}{l}$$

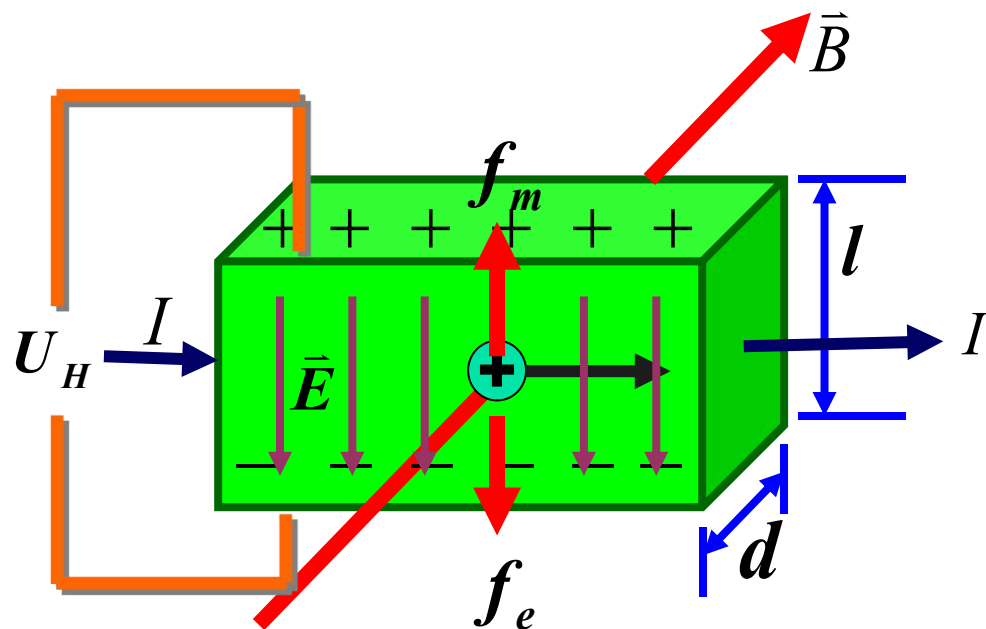
$$\because f_m = f_e \quad \therefore q \frac{U_H}{l} = qvB$$

$$\longrightarrow U_H = vBl$$

$$\text{又 } \because I = qnvS = qnvl d \longrightarrow v = \frac{I}{qnld}$$

$$U_H = \left(\frac{1}{nq} \right) \frac{IB}{d} \quad R_H = \frac{1}{nq} \longrightarrow$$

$$U_H = R_H \frac{IB}{d}$$



R_H - 霍尔系数(与材料有关) , d - 导体板厚度(沿 \vec{B} 方向)

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \quad R_H = \frac{1}{nq}$$

讨论：

- ① 在金属导体中， $n \approx 10^{28}/\text{m}^3$ ， U_H 很小；
在半导体中， $n \approx 10^{15}/\text{m}^3$ ， U_H 较大；
这就是霍尔元器件(传感器)为什么采用半导体的原因。
- ② 可以由 U_H 的正负来判断半导体中载流子的性质，是N型半导体（电子导电型），还是P型半导体（空穴导电型）。
- ③ 由霍尔效应可以测量磁场（磁强计、高斯计）；测量载流子浓度；测量载流子漂流速度等等。

*霍耳效应的应用

测量载流子类型

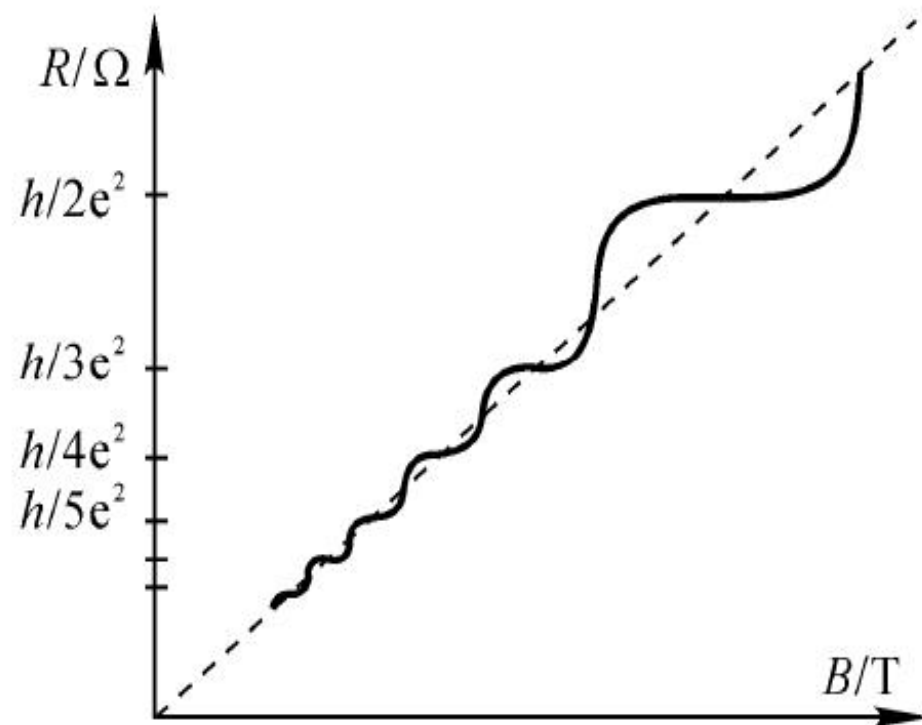
测量载流子浓度

测量磁感应强度

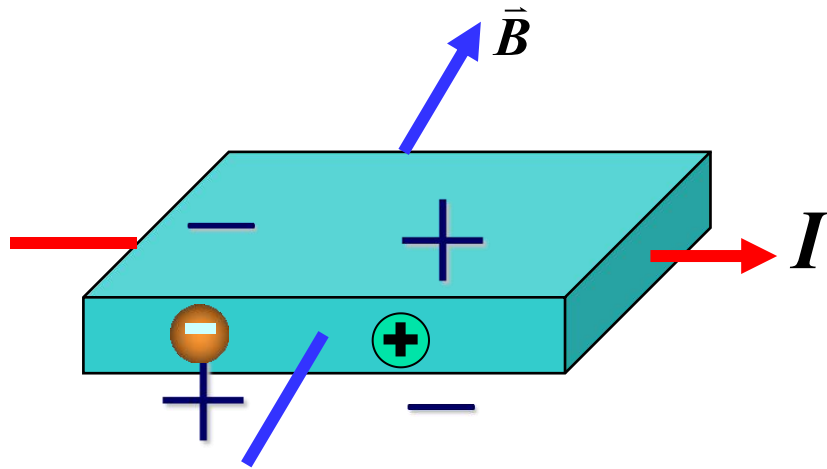
测量交直流电路中的电流和功率。

$$\frac{\Delta V_H}{i} = \frac{B}{nqt} \quad \text{Hall resistance}$$

$$R_H = \frac{h}{ie^2} \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$



例28 在一霍尔效应的实验中，通过半导体的电流和 \vec{B} 的方向垂直（如图所示）。如果上表面的电势较高，则导体中的多数载流子是__ (1)空穴 __电荷，如果下表面的电势较高，则导体中的多数载流子是__ (2)电子 __电荷。



① 上表面的电势高

根据 \vec{I} , \vec{B} , \vec{E} 的方向为相互正交 关系及电势高低，可判断载流子的正、负。

② 下表面的电势高

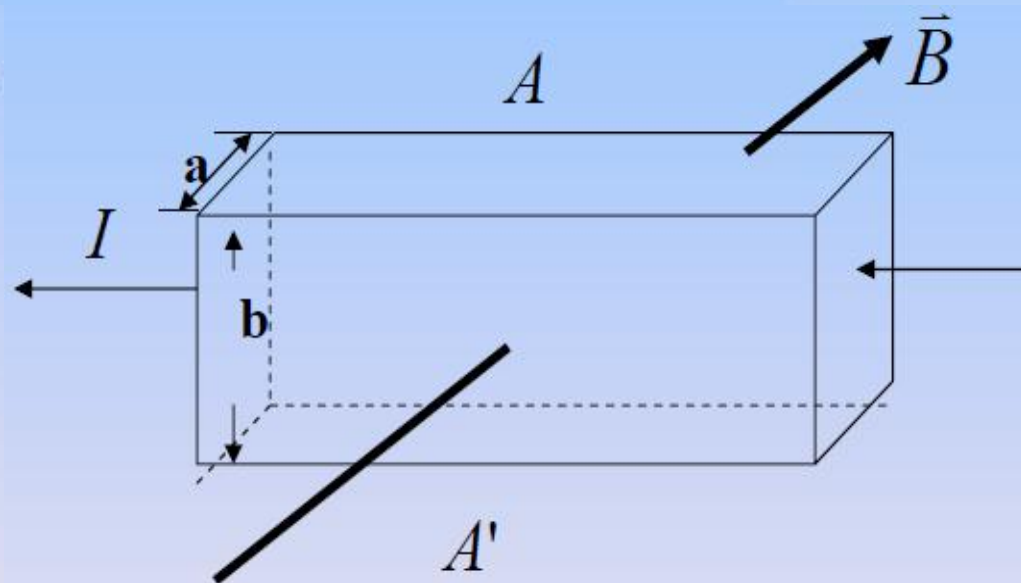
例29 $a = 0.1\text{cm}$ $b = 1.0\text{cm}$ $B = 0.2\text{T}$ $I = 2.0\text{mA}$

$$U_{AA'} = -5.0\text{mV}$$

问： 1) n 型 还是 p 型 半导体？

2) 载流子浓度？

3) 漂移速度？



解： P 型

$$U_{AA'} = \frac{1}{qn} \left(\frac{IB}{a} \right) \Rightarrow n = \frac{IB}{qaU_{AA'}} = 5 \times 10^{14} \text{ 个} / \text{cm}^3$$

$$qE = qvB \Rightarrow v = \frac{E}{B} = \frac{U_{AA'}}{Bb} = 2.5 \text{ 米} / \text{秒}$$

第12章 稳恒磁场(4/4)

12.1 磁场 磁感应强度

一、磁现象→二、磁感应强度→三、磁感应线

12.2 毕奥—萨伐尔定律

一、毕奥-萨伐尔定律→二、毕-萨定律应用→三、运动电荷的磁场

12.3 磁场的高斯定理 安培环路定理

一、磁感线 磁通量→二、磁场的高斯定理→三、安培环路定理→四、安培环路定理应用

12.4 磁场对电流与运动电荷的作用

一、安培力(安培定律)→二、平行长直载流导线间的作用力→三、磁场对平面载流线圈的作用→四、磁力的功

12.5 带电粒子在电场和磁场中的运动

一、带电粒子在横向磁场中的圆周运动→二、带电粒子在磁场中的螺旋线运动→三、霍尔效应(洛伦兹力)

12.6 电场和磁场的统一性与相对性

自学内容



作 业

第12章

第4次

P168

38

作 业

第12章全部

P168

3、 8、 9、 11、 13、

16、 17、 20、

26、 28、 30、

31、 38、