

# 第6章

## 磁场对电流的作用

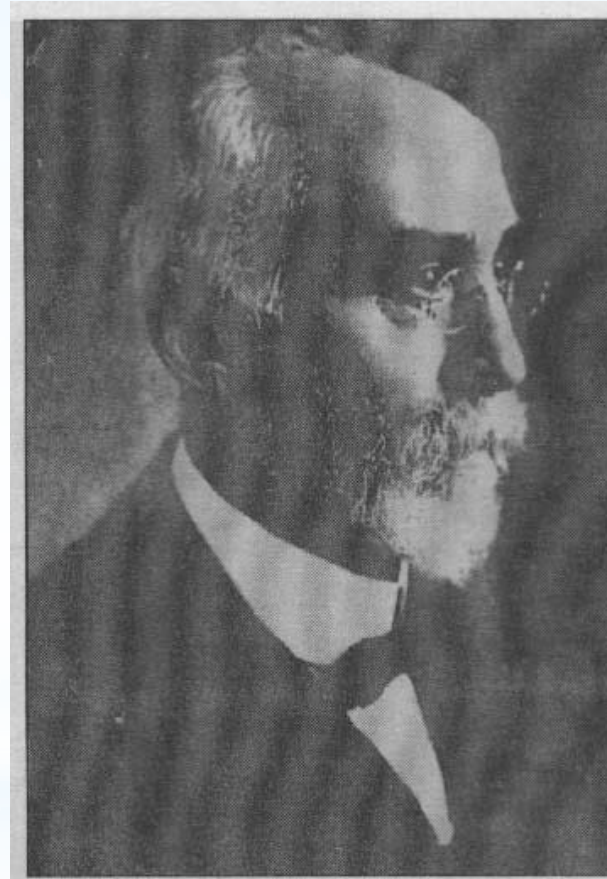
**Magnetic Force on a current-  
carrying conductor**

# 一 磁场对运动电荷的作用

## Magnetic Force on a Moving Charge

**洛伦兹: 1853-1928。**

荷兰物理学家、数学家，  
1902年获诺贝尔物理学奖。  
经典电子论的创立者，发现  
洛伦兹力，对相对论的建立  
有贡献（洛伦兹变换）。



**Hendrik Antoon Lorentz**

# 1-1 带电粒子在磁场中的运动

## Lorentz Force 洛伦兹力

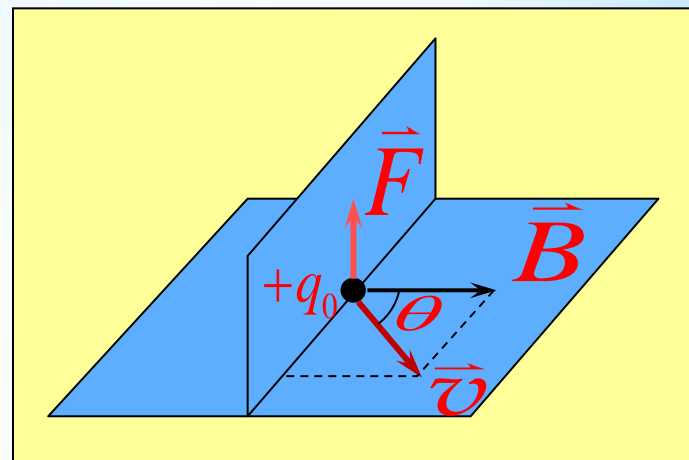
$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$F = q v B \sin \theta$$

说明:

(1)洛伦兹力 $F$ 的方向垂直于 $v$ 和 $B$ 所确定的平面。

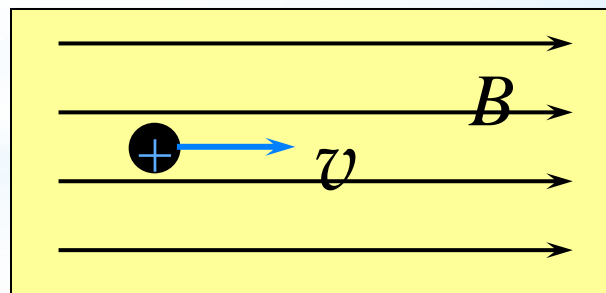
(2)洛伦兹力 $F$ 不能改变带电粒子速度 $v$ 的大小，只能改变其运动方向。



### 1. 运动方向与磁场方向平行

$$F = q v B \sin \theta$$

$$\theta = 0 \quad F = 0$$



结论： 带电粒子作匀速直线运动。

## 2. 运动方向与磁场方向垂直

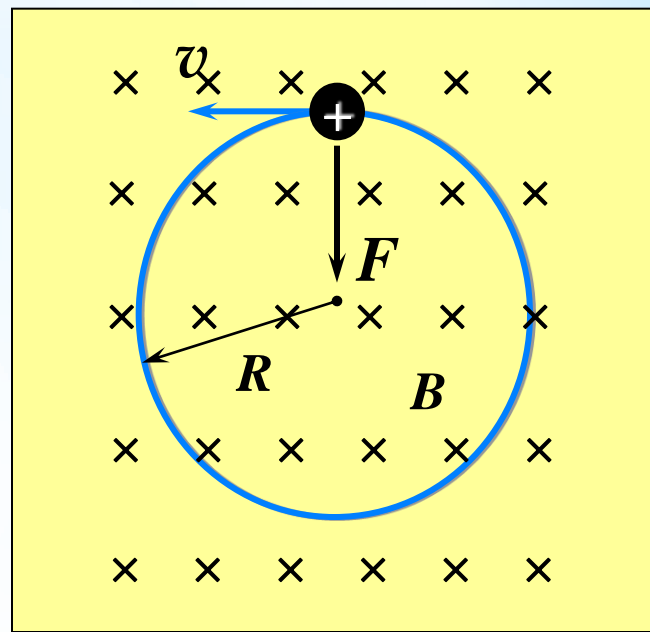
$$F = qvB$$

运动方程:  $qvB = m \frac{v^2}{R}$

半径:  $R = \frac{mv}{qB}$

周期:  $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{1}{f}$

结论: 带电粒子作匀速圆周运动, 其周期和频率与速度无关。



### 3. 运动方向沿任意方向 $\vec{v}$ 与 $\vec{B}$ 成 $\theta$

$$v_{//} = v \cos \theta \quad \text{匀速直线运动,}$$

$$v_{\perp} = v \sin \theta \quad \text{匀速圆周运动}$$

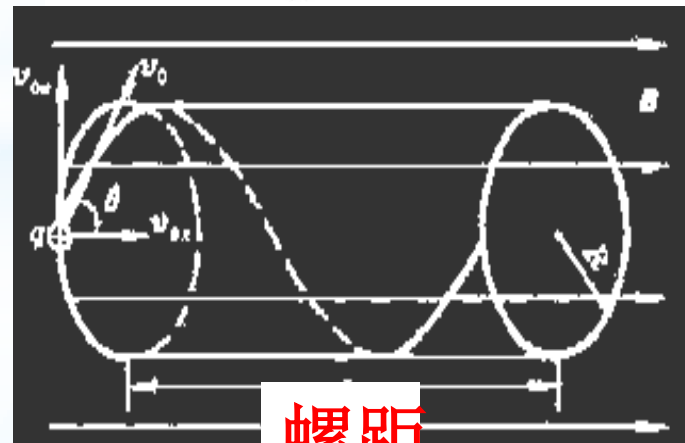
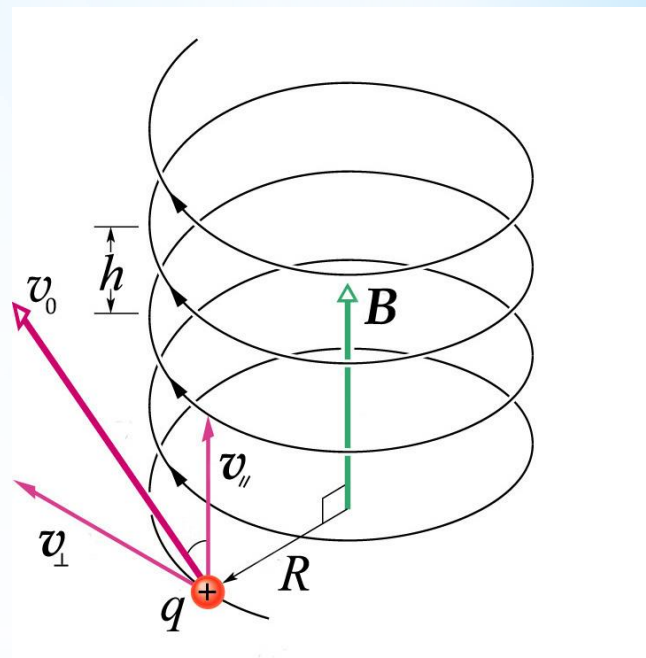
### 结论：螺旋运动

$$\text{半径: } R = \frac{m v_{\perp}}{q B} = \frac{m v \sin \theta}{q B}$$

$$\text{周期: } T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{q B}$$

螺距：（经过一个周期粒子前进的距离）

$$h = v_{//} T = \frac{2\pi m}{q B} v \cos \theta$$

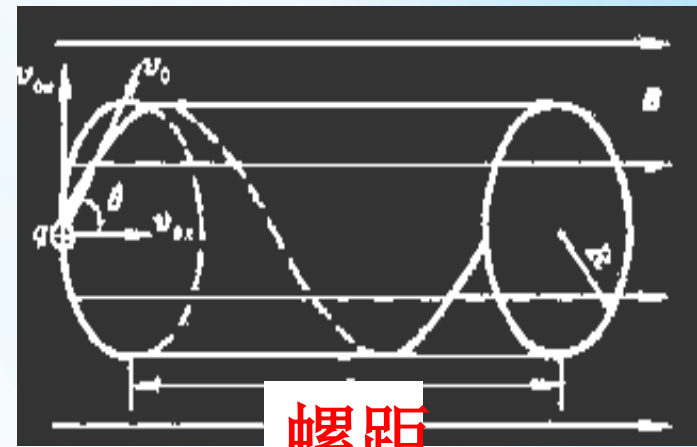


螺距

## 磁聚焦

应用:  $\begin{cases} v_{//} = v \cos \theta = v \\ v_{\perp} = v \sin \theta = v\theta \end{cases}$   
( $\theta$  足够小)

⇒ 螺距 $h$  相同



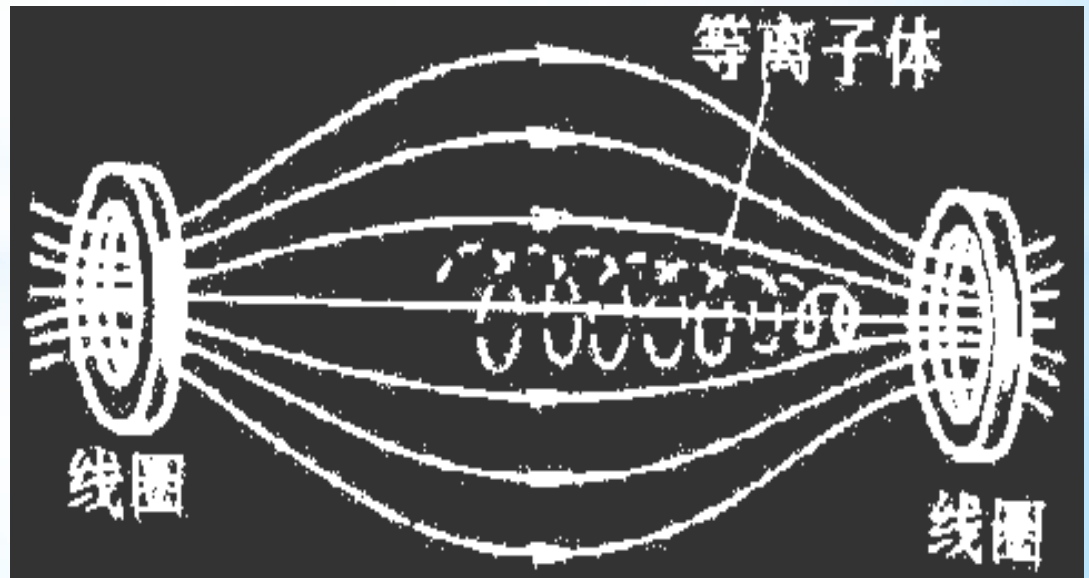
螺距

电子枪、电子显微镜

## 磁约束

利用磁场将高温等离子体约束在一定范围内. 将线圈称为磁塞、磁镜.

## 可控热核聚变



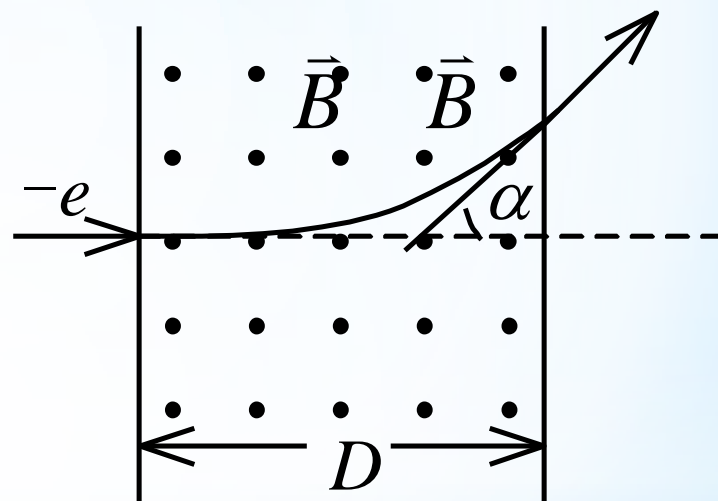
练习1: 一个动量为 $p$ 的电子, 沿图示方向入射并能穿过一个宽度为 $D$ 、磁感强度为  $\vec{B}$ , (方向垂直纸面向外) 的均匀磁场区域, 则该电子出射方向和入射方向间的夹角为

(A)  $\alpha = \cos^{-1} \frac{eBD}{p}$

(B)  $\alpha = \sin^{-1} \frac{eBD}{p}$

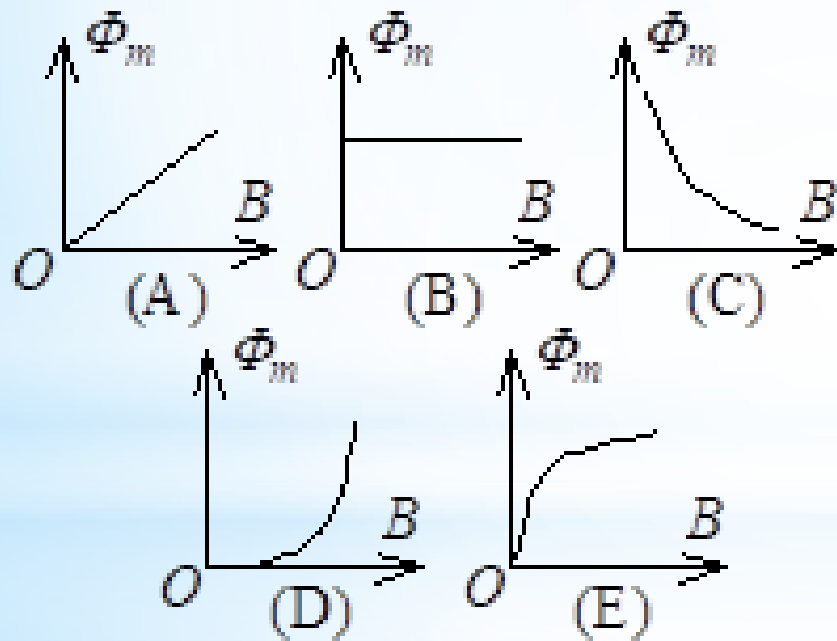
(C)  $\alpha = \sin^{-1} \frac{BD}{ep}$

(D)  $\alpha = \cos^{-1} \frac{BD}{ep}$



[ B ]

练习 2: 一质量为  $m$ 、电荷为  $q$  的粒子, 以与均匀磁场  $\vec{B}$  垂直的速度  $v$  射入磁场内, 则粒子运动轨道所包围范围内的磁通量  $\Phi_m$  与磁场磁感强度  $\vec{B}$  大小的关系曲线是(A)~(E)中的哪一条?



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

$$S = \pi R^2 = \pi \left( \frac{mv}{qB} \right)^2$$

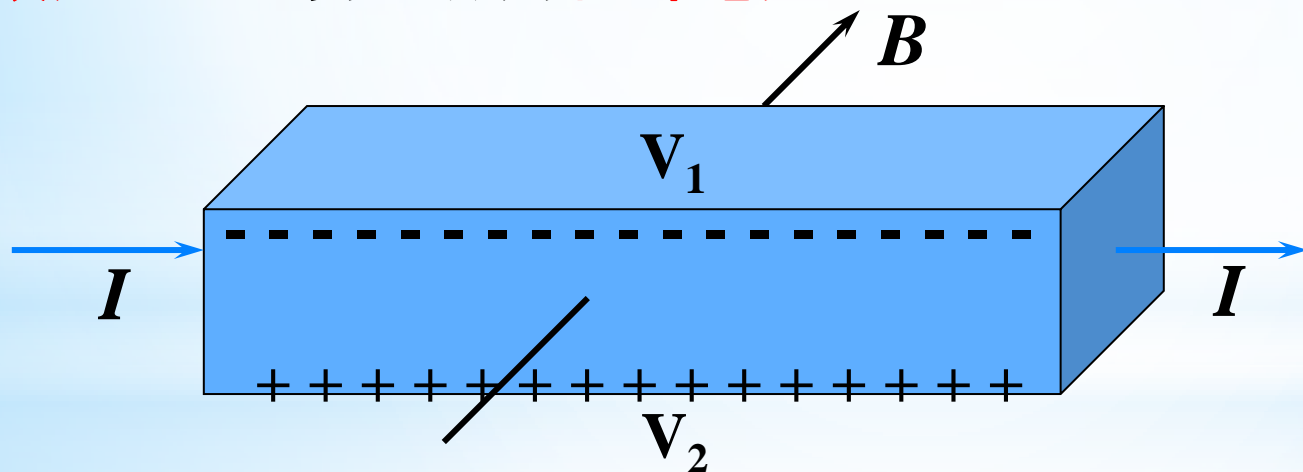
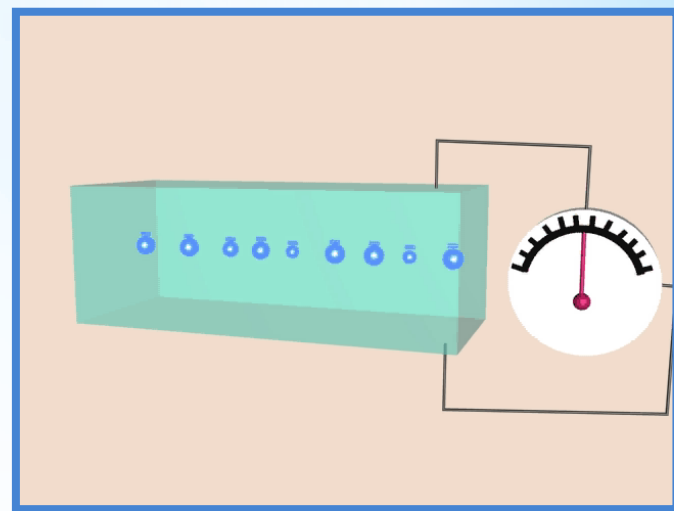
$$\Phi = BS = B\pi R^2 = \pi \frac{m^2 v^2}{q^2 B}$$

[ C ]



## 1-2 霍耳效应

1879年，霍尔（E.H.Hall，1855—1936）发现，把一载流导体放在磁场中时，如果磁场方向与电流方向垂直，则在与磁场和电流两者垂直的方向上出现横向电势差。这一现象称为**霍耳效应**，这电势差称为**霍耳电势差**。



原因：**运动电荷在磁场中受洛伦兹力。**

$$F_m = e v B \quad F_e = e E_H$$

动态平衡时:  $e v B = e E_H$

$$E_H = v B$$

$$V_H = V_1 - V_2 = -E_H b = -B b v$$

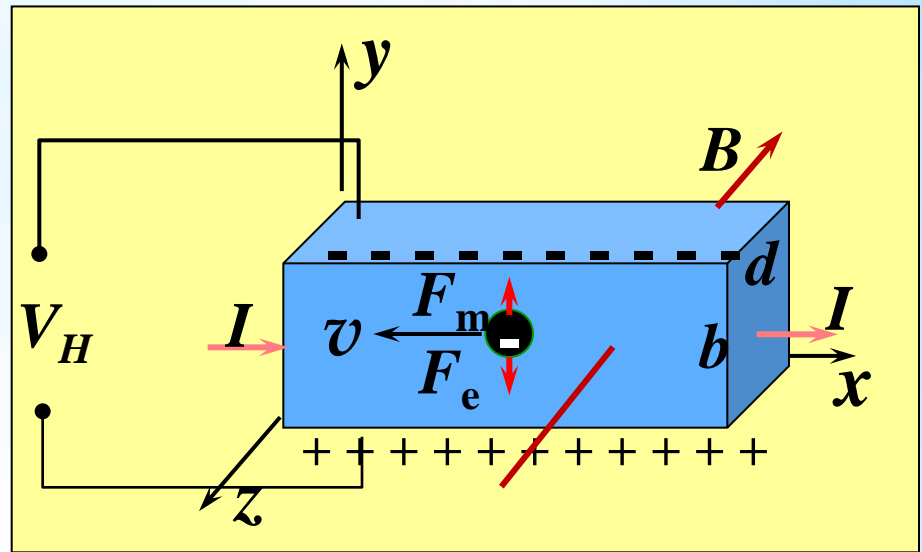
$$\because I = e n v b d \quad \therefore v = \frac{I}{e n b d} \quad \longrightarrow \quad V_H = - \frac{1}{e n} \frac{I B}{d}$$

$$\text{令: } R_H = - \frac{1}{e n}$$

$R_H$  称为**霍耳系数**

$$\therefore V_H = R_H \frac{I B}{d}$$

如果载流子带正电荷, 则  $R_H = \frac{1}{q n}$



$d$ 是沿磁场方向的边长

## 总 结:

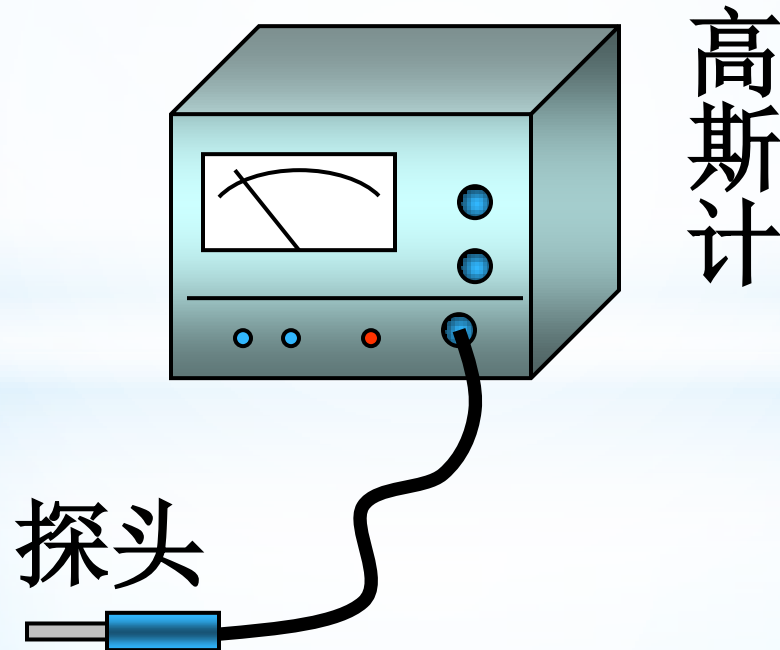
$$V_H = R_H \frac{IB}{d}$$

- 霍尔电压与电流强度、磁场成正比，与d成反比。
- 霍尔系数 $R_H$ 与载流子密度n成反比。
  - (1) 导体  $n$  较大， $R_H$  较小，霍尔效应较弱；
  - (2) 导体  $n$  较小， $R_H$  较大，霍尔效应显著。
- 载流子的类型影响霍尔电压。

# 霍尔效应的应用:

## (1) 测量磁场

由  $V_H = R_H \frac{IB}{d}$  可知  $V_H \propto B$



## (2) 测量半导体的性质

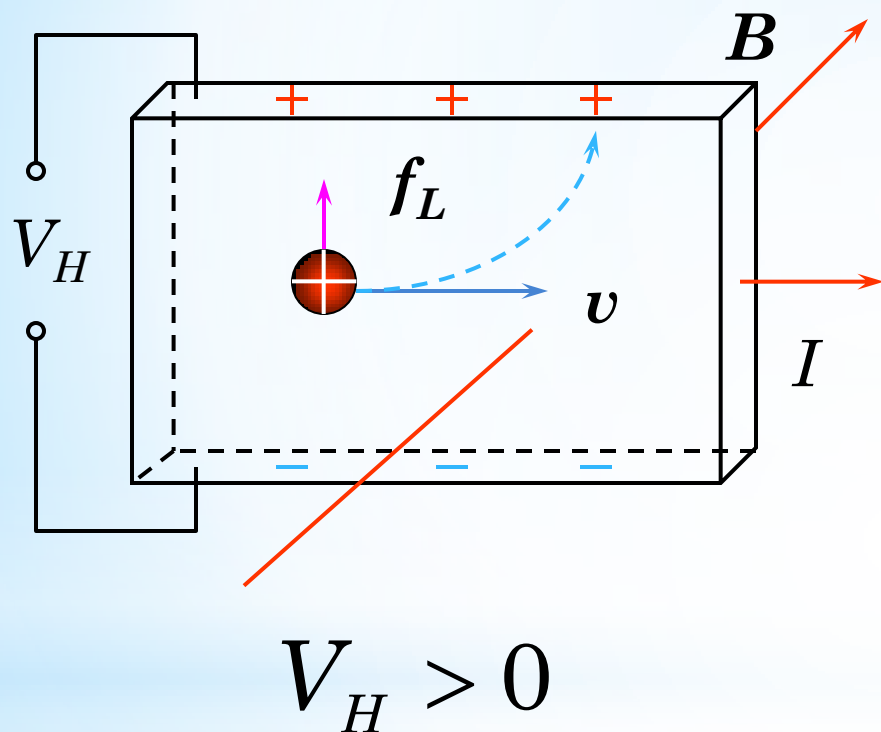
半导体根据掺杂不同:

空穴型 ( $p$ 型) 半导体,  
电子型 ( $n$ 型) 半导体。

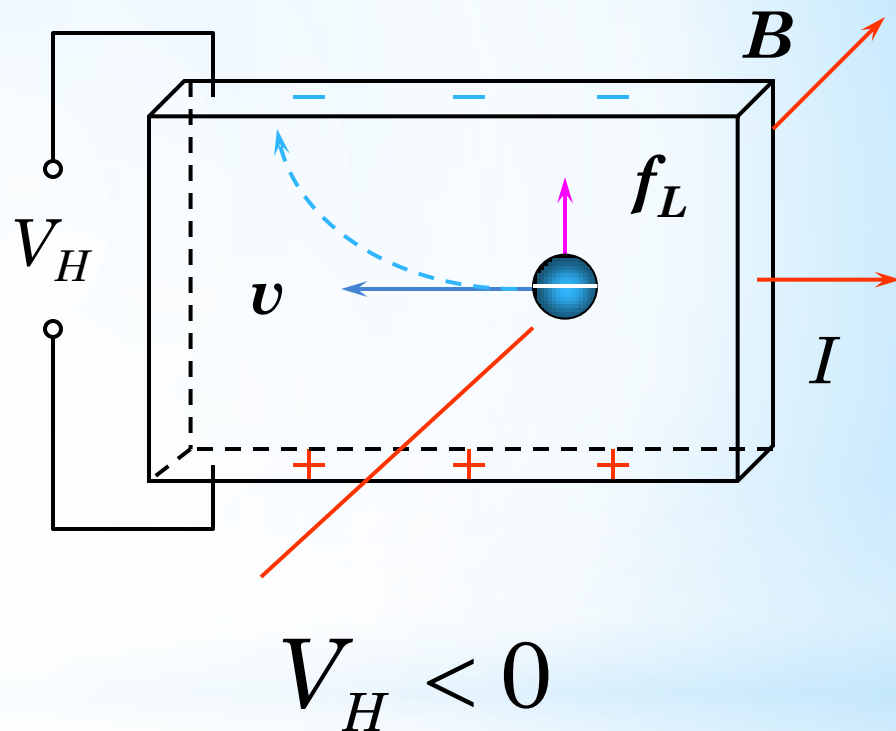
$P$ 型 主要载流子为正电荷;

$n$ 型 主要载流子为负电荷。

## $P$ 型半导体



## $n$ 型半导体 或导体



由  $V_H$  的正负就可知道半导体的类型。

# 1-3 带电粒子在电场磁场中的运动

## Charged Particle in Electromagnetic Field

$$\vec{f} = q\vec{E} + q\vec{V} \times \vec{B}$$

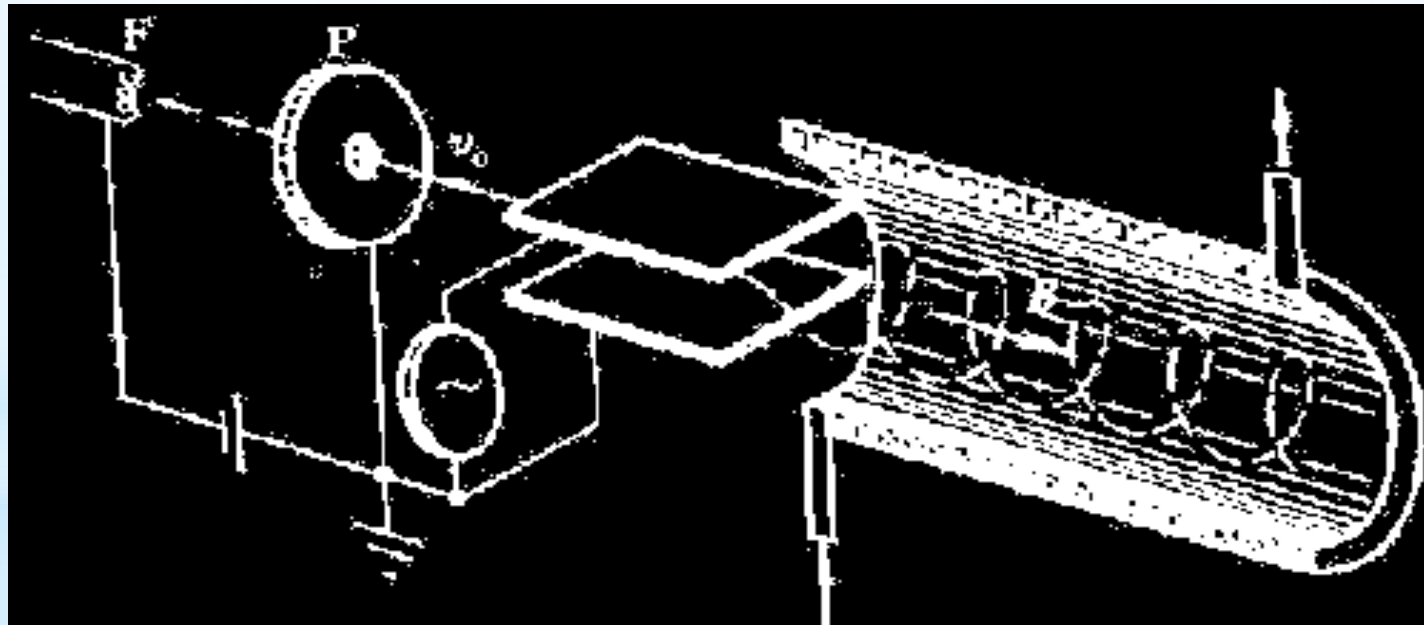
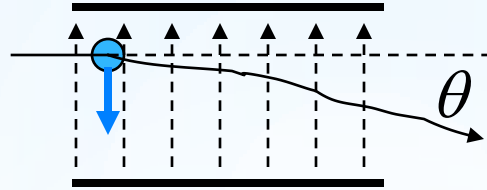
电场力，与电荷的  
运动状态无关

加速

磁场力，运动电荷  
才受磁力

束缚运动

# 1) Magnetic Focus 磁聚焦用来控制带电粒子的运动





条件： 横向电场， 纵向磁场

原理： 电子束经电场加速， 横向电场分离（ $\theta$ ），  
在纵向磁场作用下作螺旋线运动

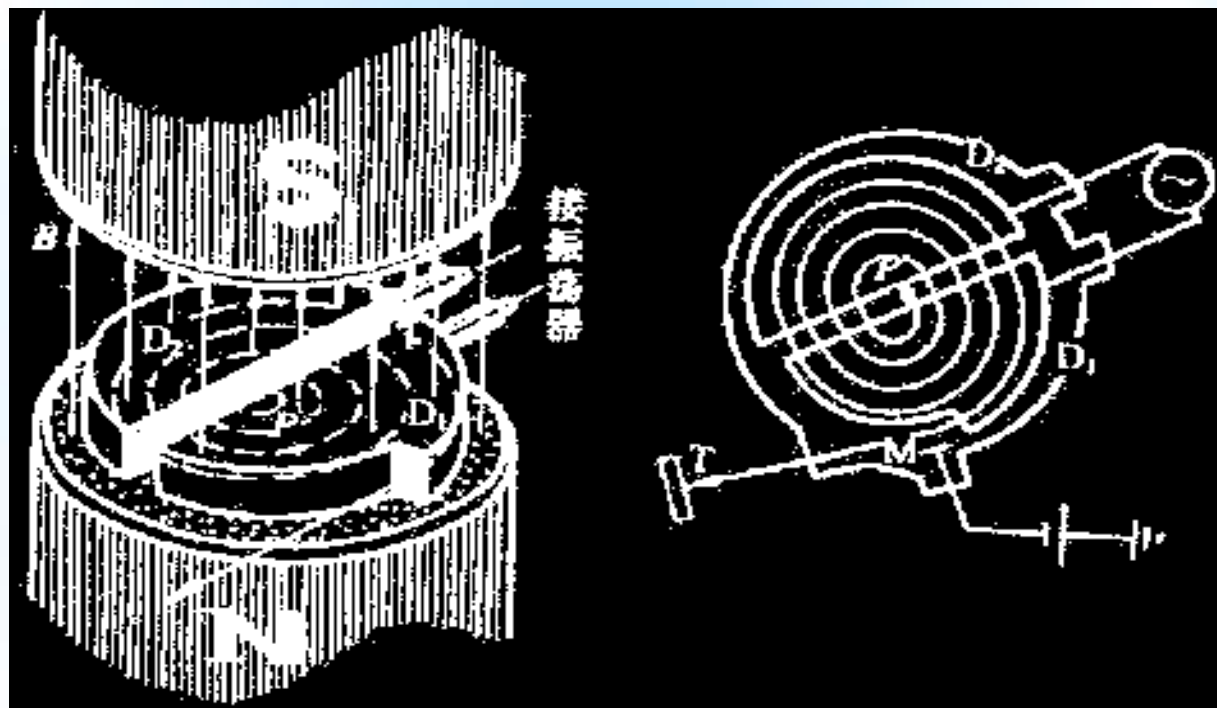
用途： 测微观粒子的荷质比（ p47, 159）

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 n^2}{B^2 l^2} \cdot U \quad (\text{推导略})$$

$$T = \frac{2\pi m}{Be} \quad n = \frac{l}{v_{0x} T} \quad (\text{圈数})$$

$l$  是纵向路径，  $U$  是加速电压

## 2、Cyclotron 回旋加速器



条件：交变电场，恒定强磁场共同作用。

原理：电子在狭缝处被电场加速，在盒内磁场作用下作圆周运动，周期与速率无关。

用途：获得高能粒子流  $R = \frac{v}{(\frac{q}{m})B}$        $T = \frac{\pi R}{v} = \frac{\pi}{(\frac{q}{m})B}$

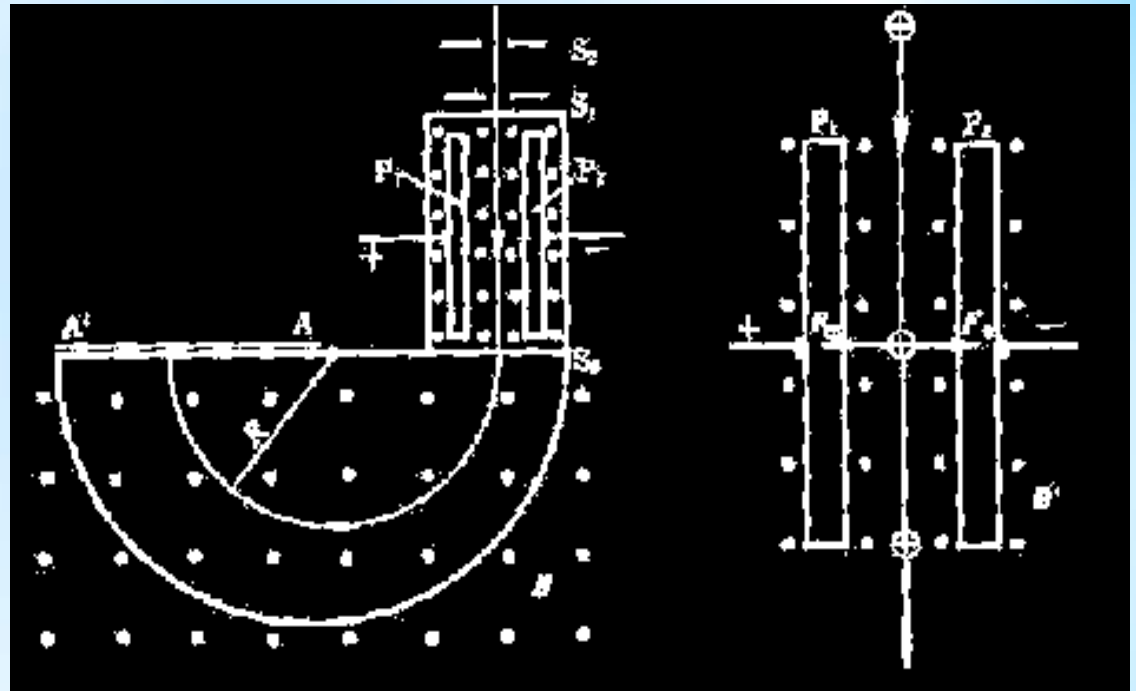
### 3 、Mass spectrometer

### 质谱仪

电子在正交电磁场  
中被滤速

$$qE = qvB$$

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



条件： 电场、磁场共同作用

原理： 电子在狭缝处被电场加速，在磁场作用下作圆周运动，粒子回旋半径与  $m$  成正比

用途： 获得高能粒子流

$$q\Delta U = \frac{1}{2}mv^2$$

$$m = \frac{qB^2 r^2}{2\Delta U}$$

作业： 15, 19