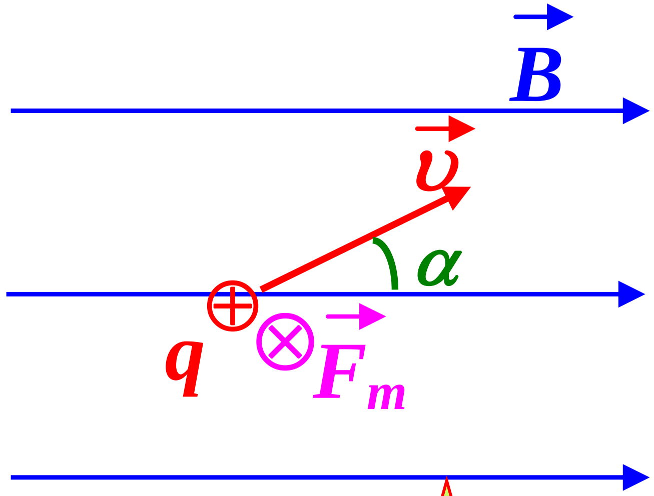
§7-7 磁场对运动电荷的作用

一、洛仑兹力

$$F = qvB$$

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



大小：$F = qvB\sin\alpha$

α =0或 π 时，$F = 0$

$\alpha = \pi/2$时，$F_m = q\upsilon B$ (最大)

方向： q-正电荷，满足右手螺旋定则

q-负电荷，与上述指向相反；

F 做功吗？

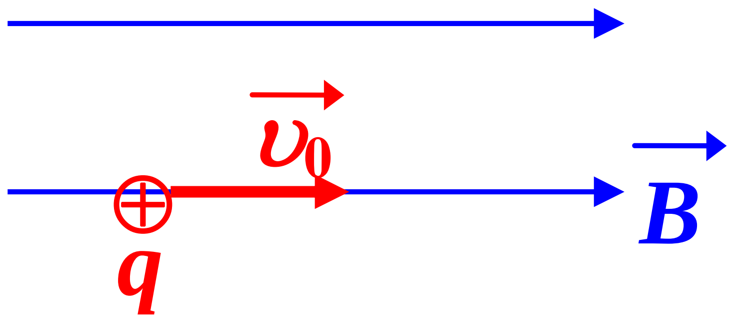
二、带电粒子在磁场中的运动

条件： 均匀磁场B，带电粒子(质量m、电荷q)以速度υ_0进入磁场

1、磁感应强度与速度一致

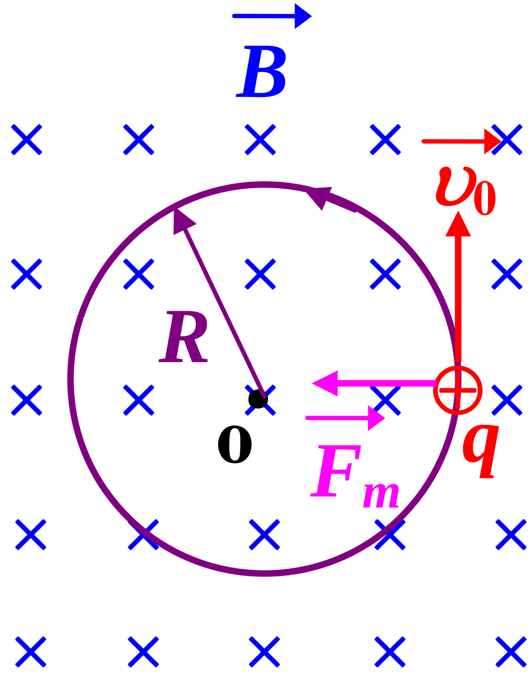
粒子不受洛仑兹力
作匀速直线运动

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



2、磁感应强度与速度垂直

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



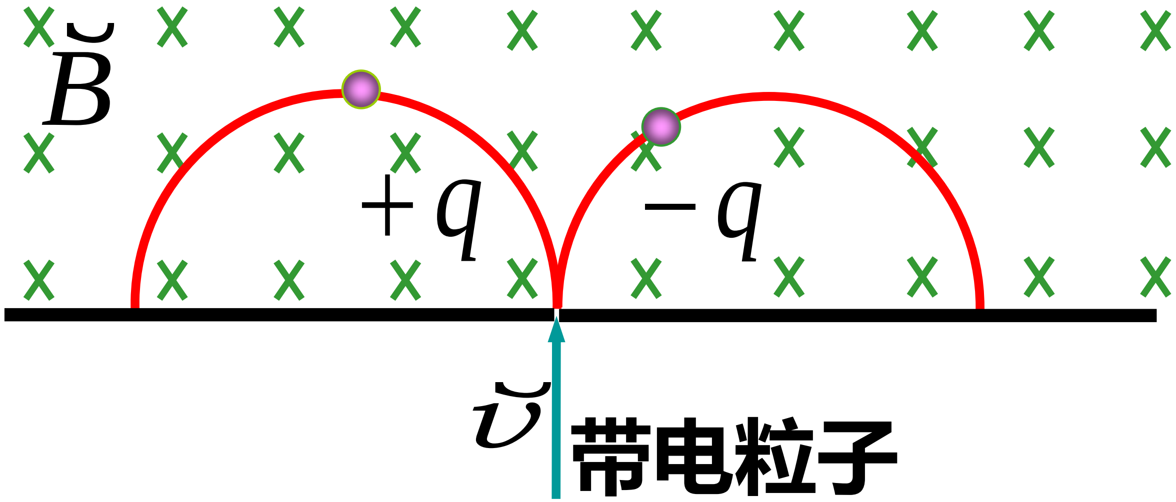
$$qv_0B = \frac{mv_0^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv_0}{qB}$$

荷质比，比荷 q/m

回旋周期 $T = \dfrac{2\pi R}{v_0} = \dfrac{2\pi m}{Bq}$ **回旋频率** $\nu = \dfrac{1}{T} = \dfrac{Bq}{2\pi m}$

应用：判断粒子的正负

根据带电粒子的偏转方向来判断 $\vec{F}' = q\vec{v} \times \vec{B}$



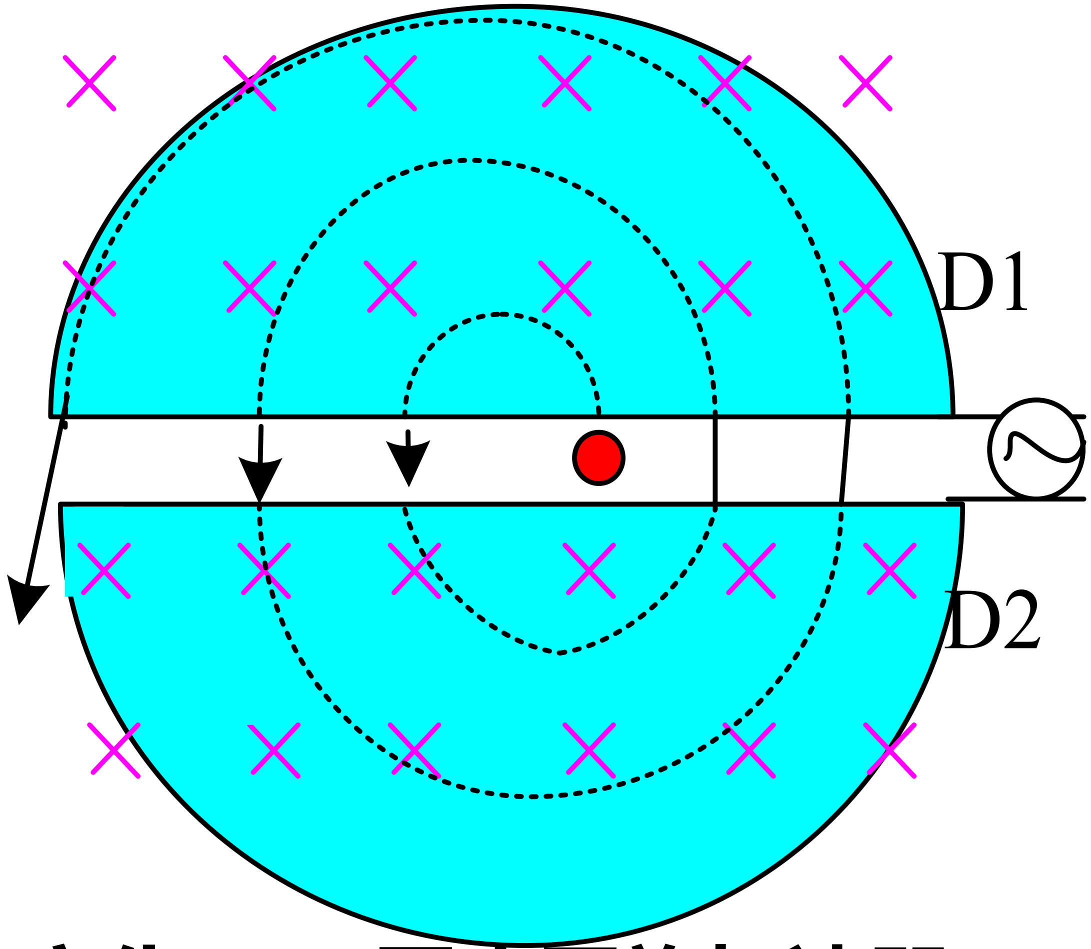
根据宇宙射线轰击铅板所产生的粒子轨迹,发现了正电子

应用：回旋加速器

$$F = qvB$$

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

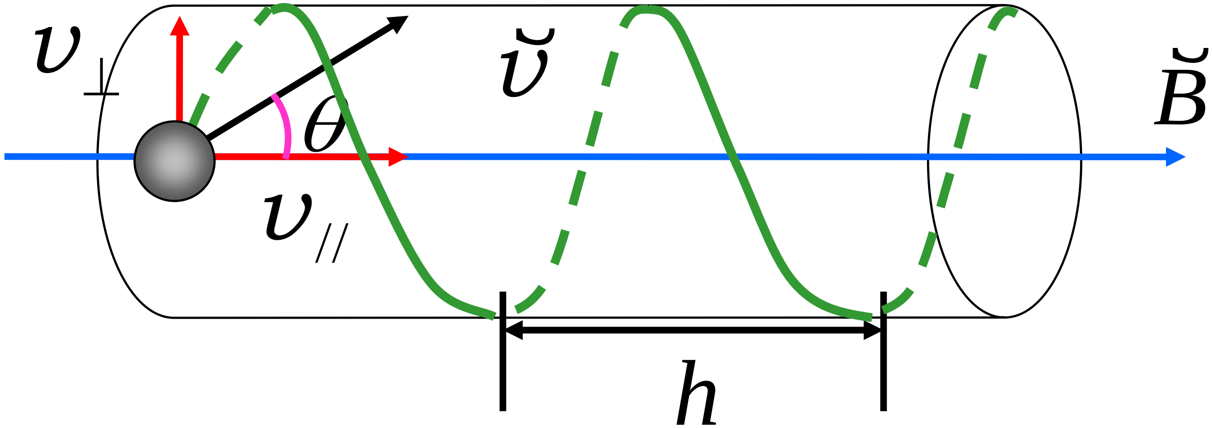
$$T = \frac{2\pi R}{v_0} = \frac{2\pi m}{Bq}$$



当速度接近于光速时，m变化，---同步回旋加速器

3、磁感应强度与速度成θ角

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



$$v_{//} = v\cos\theta$$

$$v_{\perp} = v\sin\theta$$

$$R = \frac{m v_{\perp}}{qB} = \frac{m v \sin\theta}{qB} \qquad T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB}$$

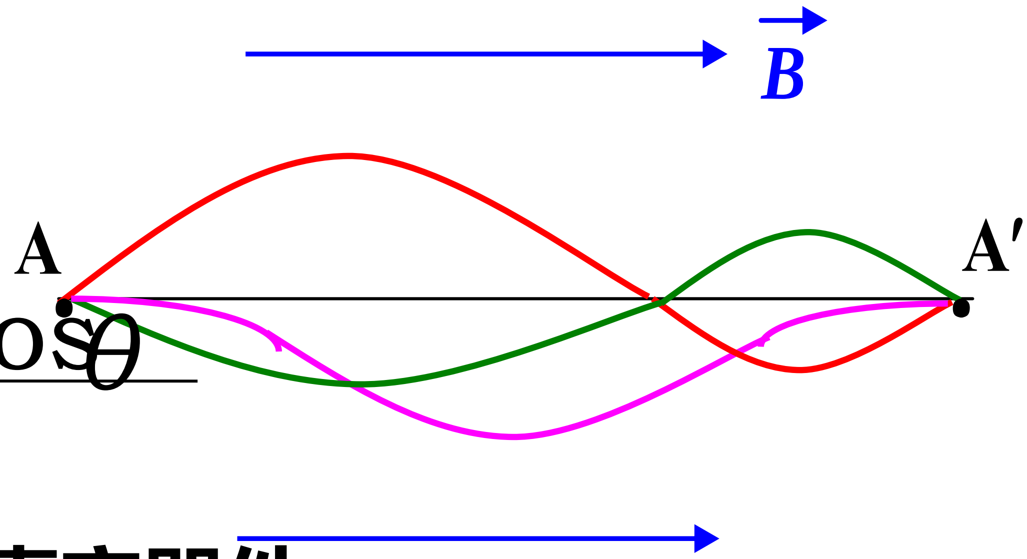
螺距 h：

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

应用:1)磁聚焦

$$v_{//} = v\cos\theta$$

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



广泛应用于电子显微镜和真空器件

2) 磁约束效应

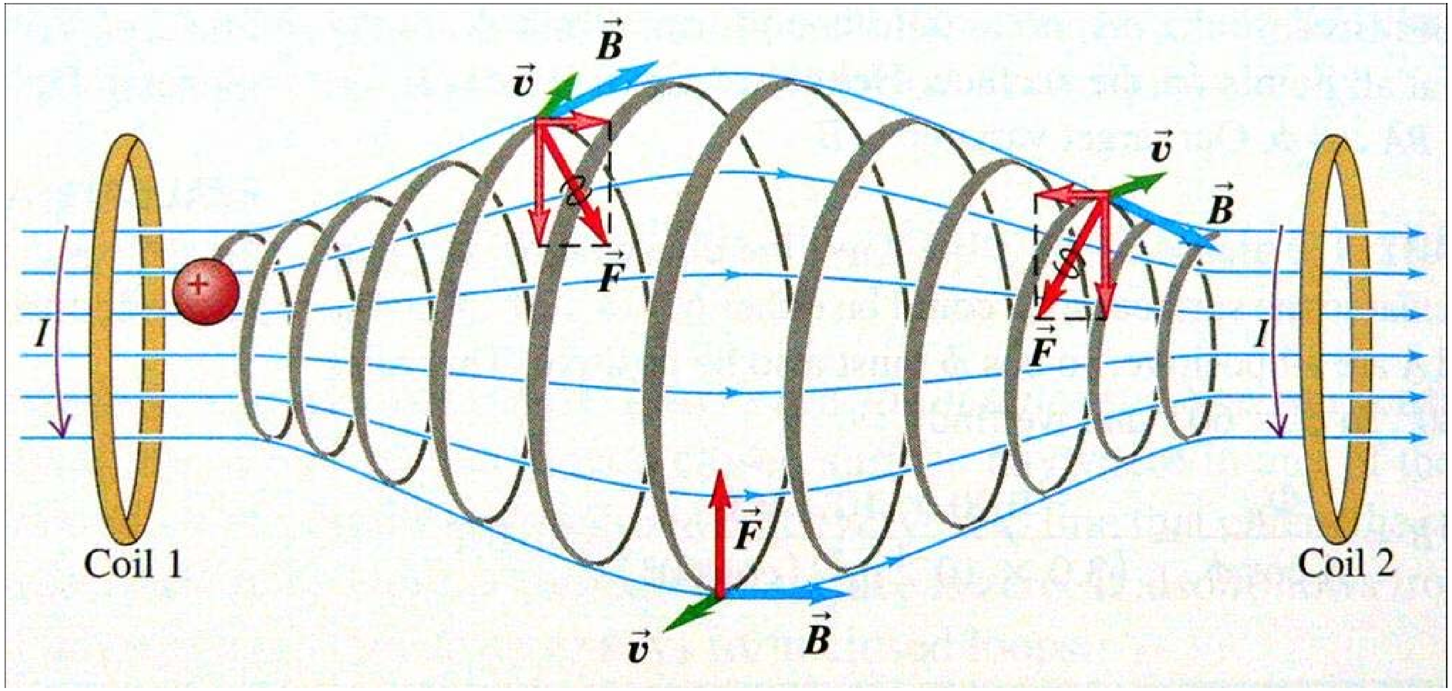
$$R = \frac{mv\sin\theta}{qB} \propto \frac{1}{B}$$ **磁场增强，运动半径减少。**

强磁场可约束带电粒子在一根磁场线附近 —— 磁约束效应。

3)非均匀磁场中

带电粒子向磁场较强的方向运动时，螺旋的半径不断减小

电磁瓶
电磁镜



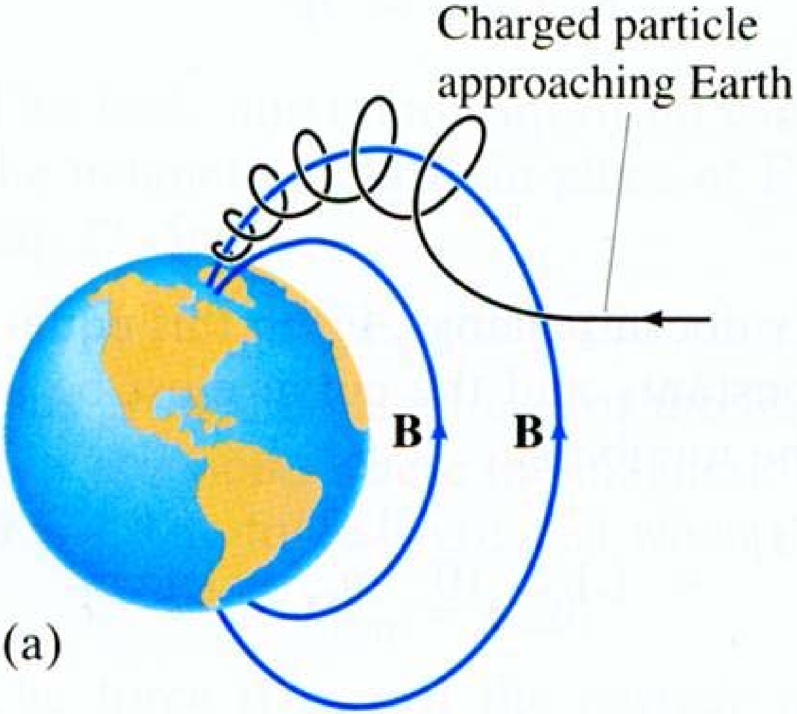
洛仑兹力恒有一指向磁场较弱方向的分力，此分力阻止带电粒子向磁场较强的方向运动。

这可使粒子沿磁场方向的速度减小到零，然后向反方向运动。

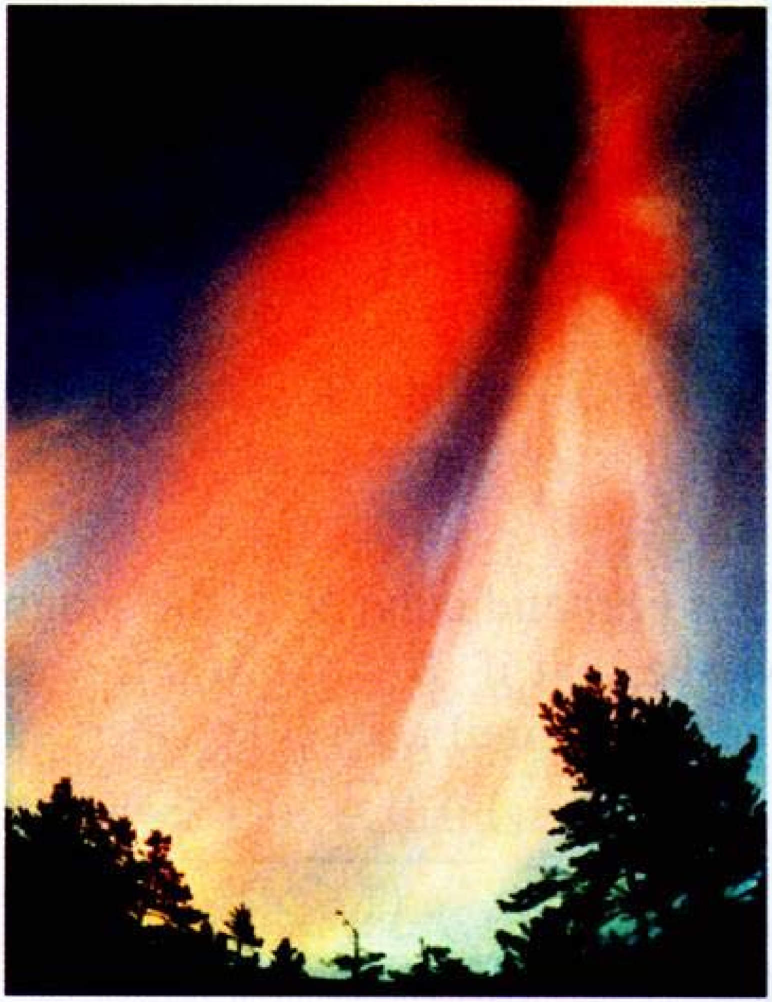
4) 极光

带电粒子区域

<u>范艾仑辐射带</u>



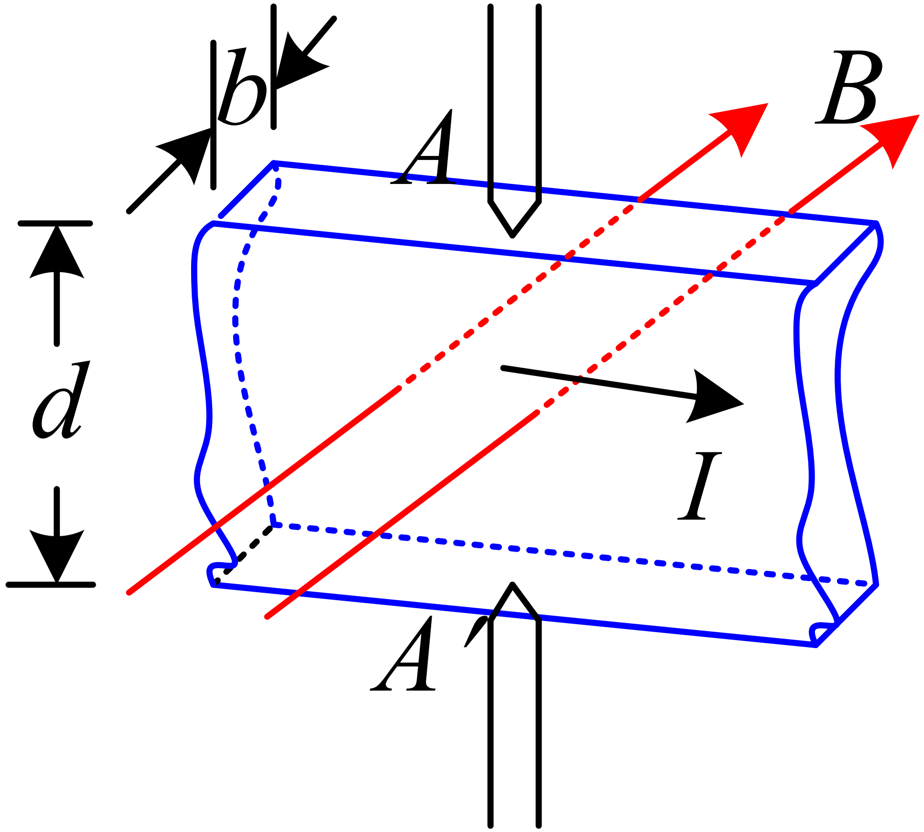
(a)



(b)

三、霍耳效应

1、霍耳效应



在磁场中，载流导体或半导体上出现横向电势差的现象。

2、霍耳电压

设载流子为正电荷，漂移速度为υ

载流子受洛仑兹力 $f = qvB$

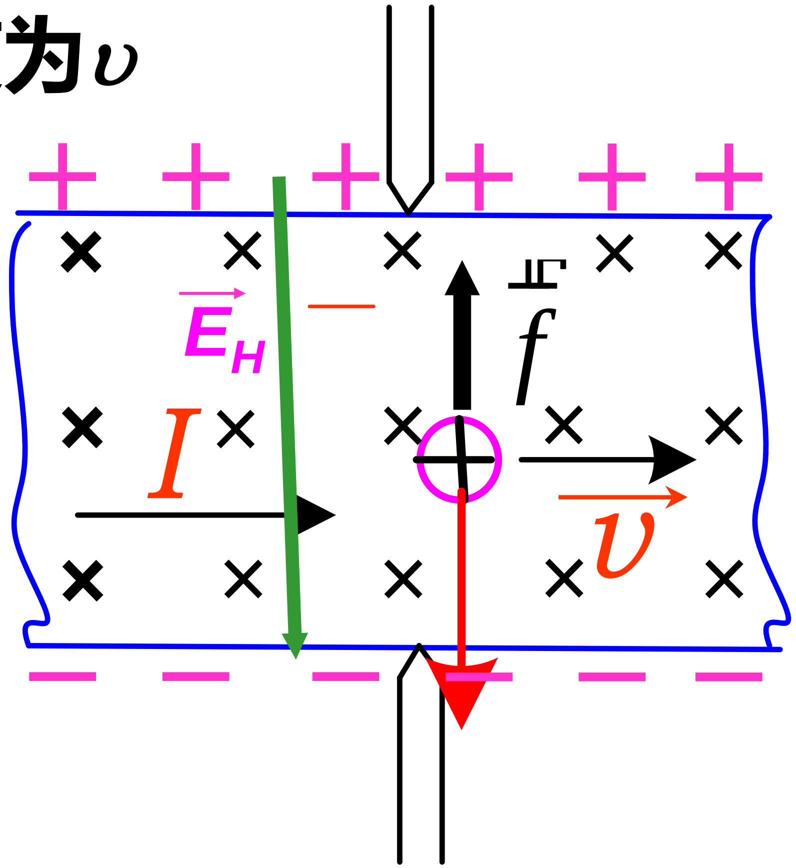
上端面 积累正电荷

下端面 积累负电荷

两端面间形成**霍尔电场**$\vec{E}_H$

载流子受霍耳电场力

$$F_H = qE_H$$



两力平衡时 $qvB = qE_H$

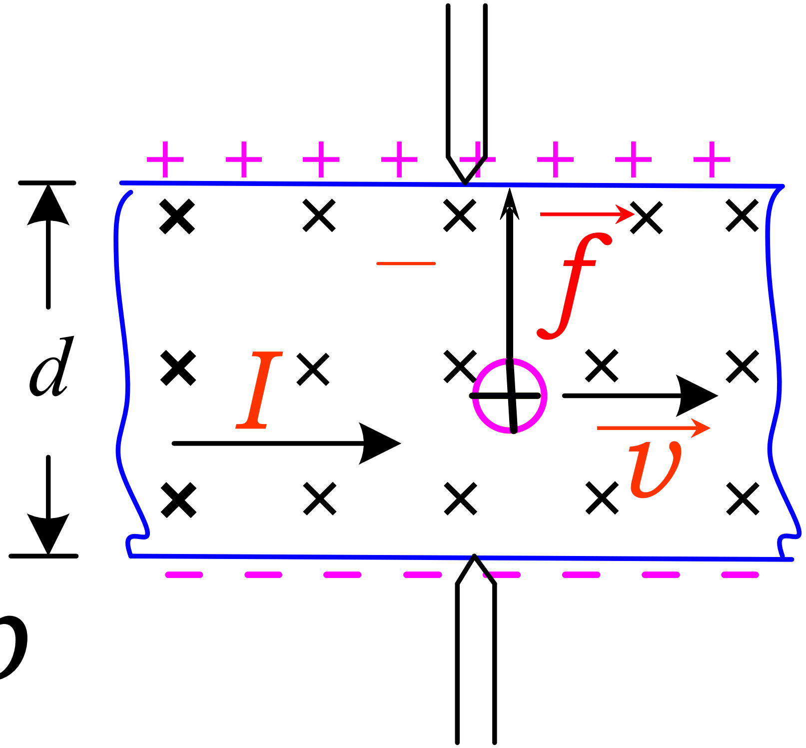
$$E_H = vB$$

$$U_H = E_H d = vBd$$

又电流强度为

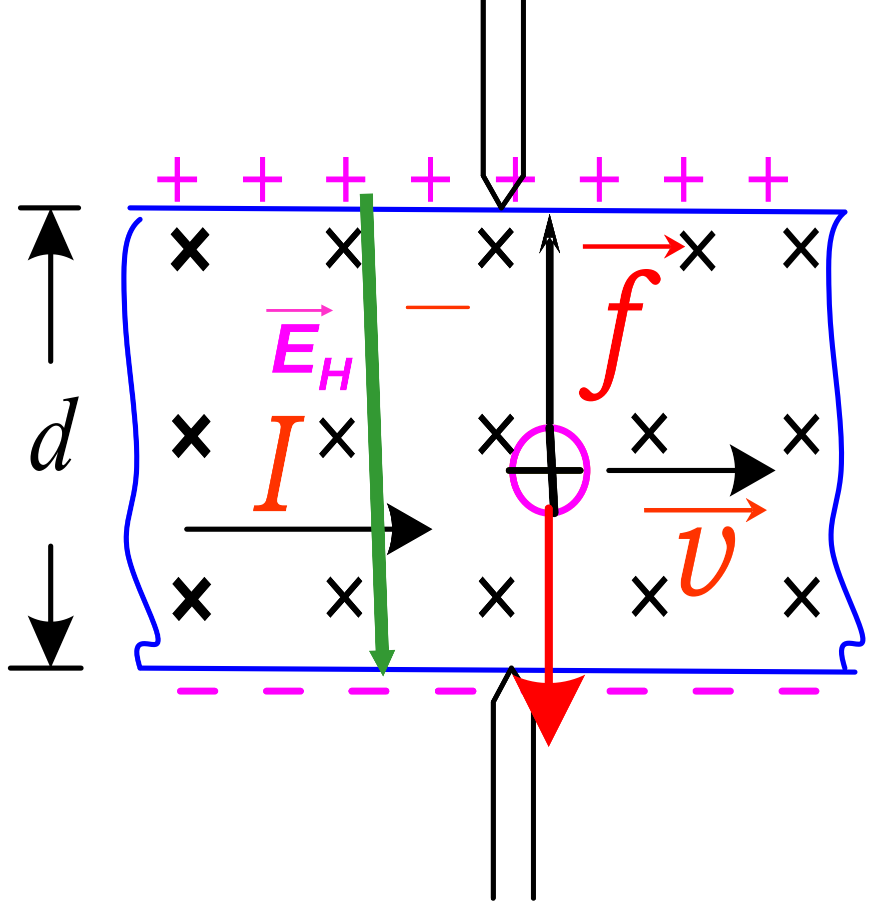
$$I = nqvS = nqvdb$$

则 $v = \dfrac{I}{nqdb}$



$$U_H = E_H d = vBd$$

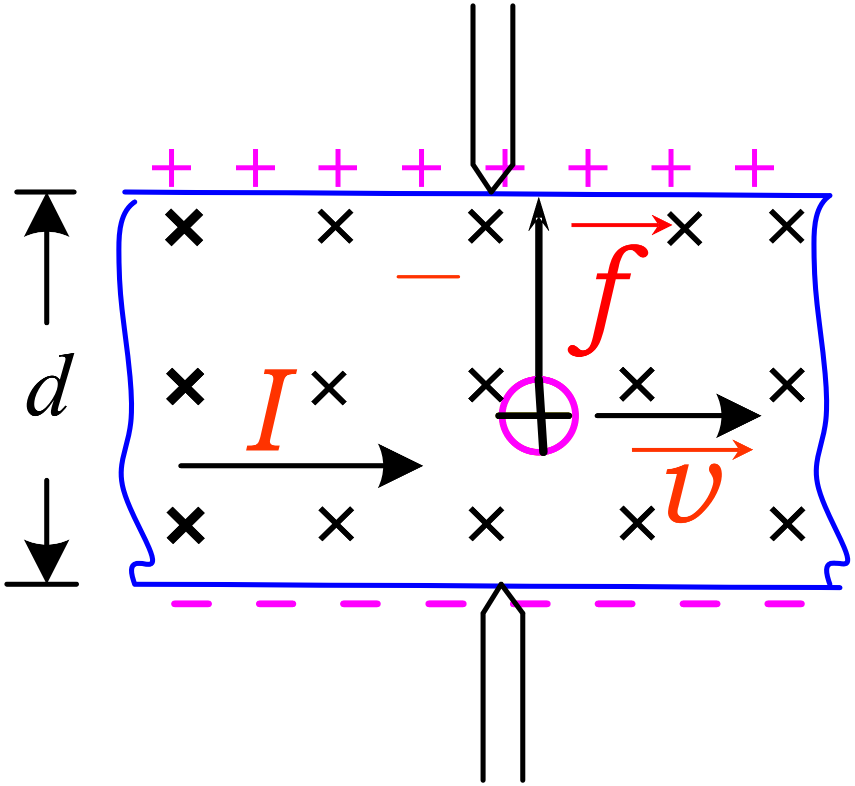
$$v = \frac{I}{nqdb}$$

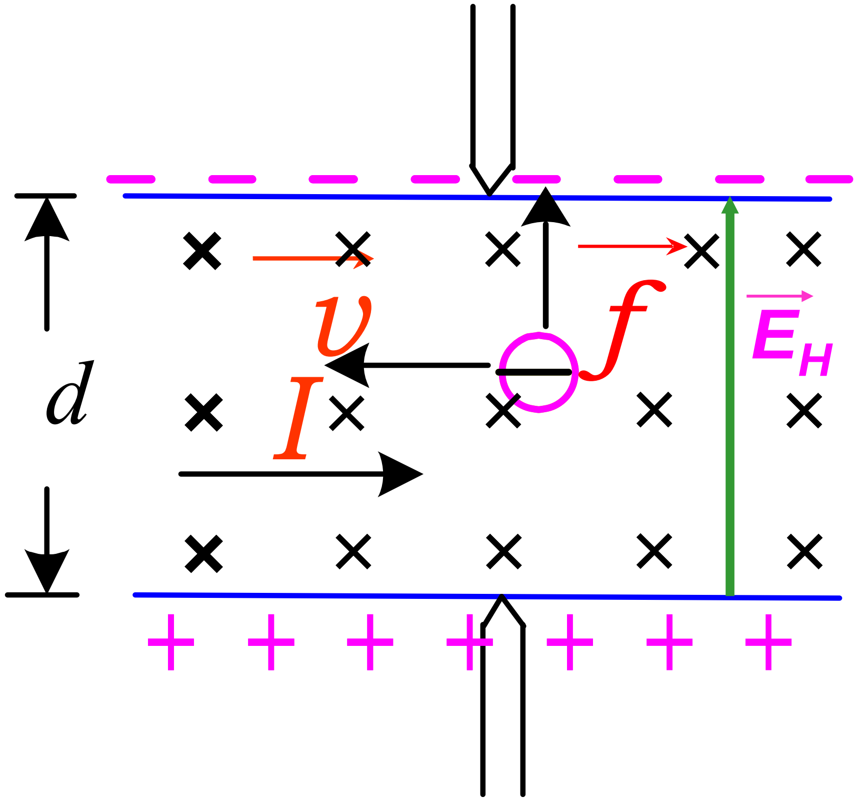


霍耳电压

$$\boxed{U_H = \frac{I}{nqdb} Bd = \frac{1}{nq} \frac{IB}{b}}$$

霍耳系数： $R_H = \dfrac{1}{nq}$





$$U_H = E_H d > 0$$

$$U_H = -E_H d < 0$$

$$\boxed{V_{上} - V_{下} = U_H = \frac{1}{nq}\frac{IB}{b}}$$

3.霍尔效应的应用

1).制作霍耳元件

$$U_H = \frac{1}{nq}\frac{IB}{b}$$

是作成很小尺寸的一种传感元件，

可以测量电流，磁感应强度，

2)判定导电机制

$$R_H = \frac{1}{nq}$$

对于 n 型半导体载流子为电子---------$R_H < 0$

对于 P 型半导体载流子为带正电的空穴-------$R_H > 0$

根据霍耳系数的符号可以确定半导体的类型

根据霍耳系数的大小的测定，可以确定载流子的浓度。

例如:

若 $V_2 > V_1$

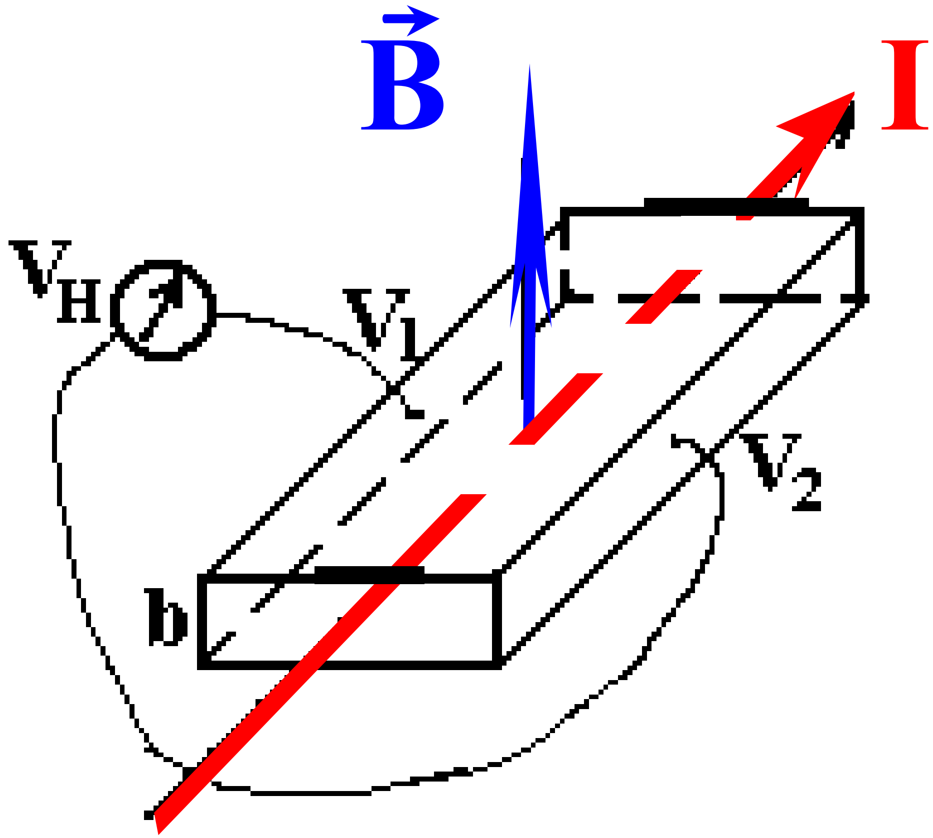
什么型半导体?

P 型

若 $V_2 < V_1$

什么型半导体?

n 型



§7-8 磁场对电流的作用

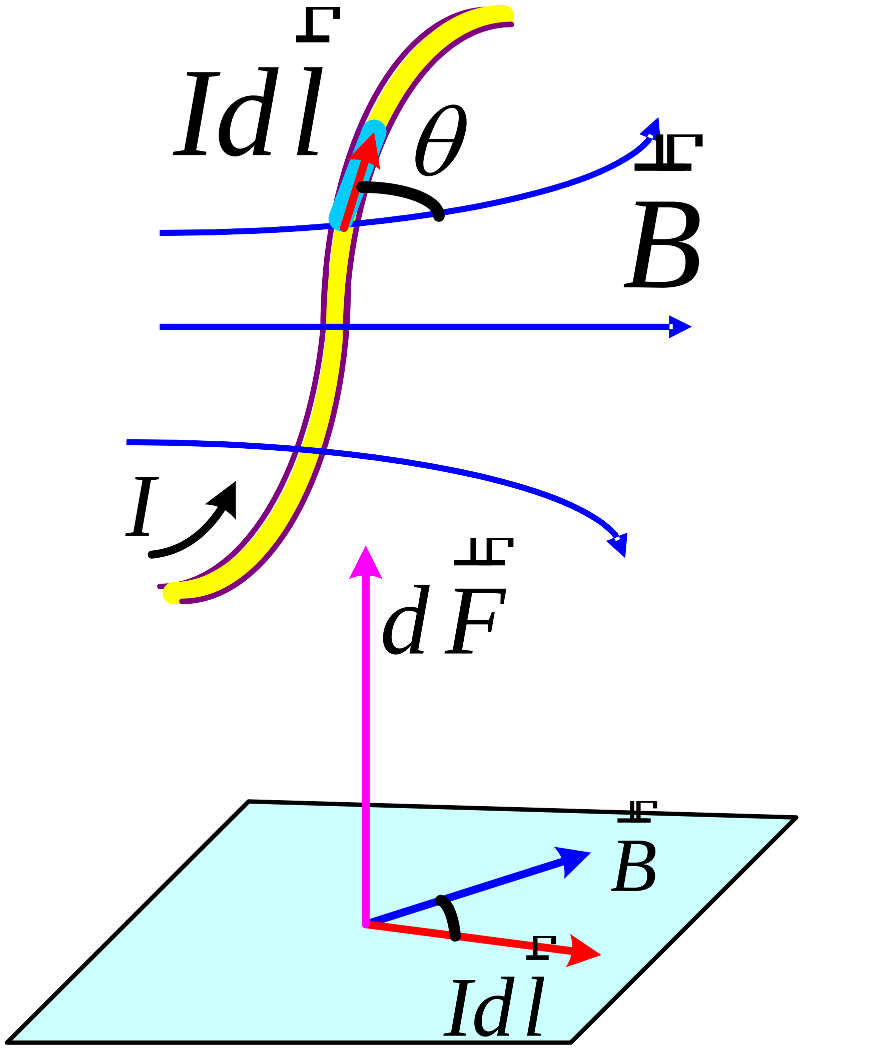
一、磁场对载流导线的作用

电流元所受到的磁场力

$$dF = BIdl\sin\theta$$

安培力 $d\vec{F} = Id\vec{l}\times\vec{B}$ ……**安培力公式**

$$\vec{F} = \int d\vec{F} = \int Id\vec{l}\times\vec{B}$$



例 求均匀磁场对图中半圆形导线的作用力

电流元受力大小为

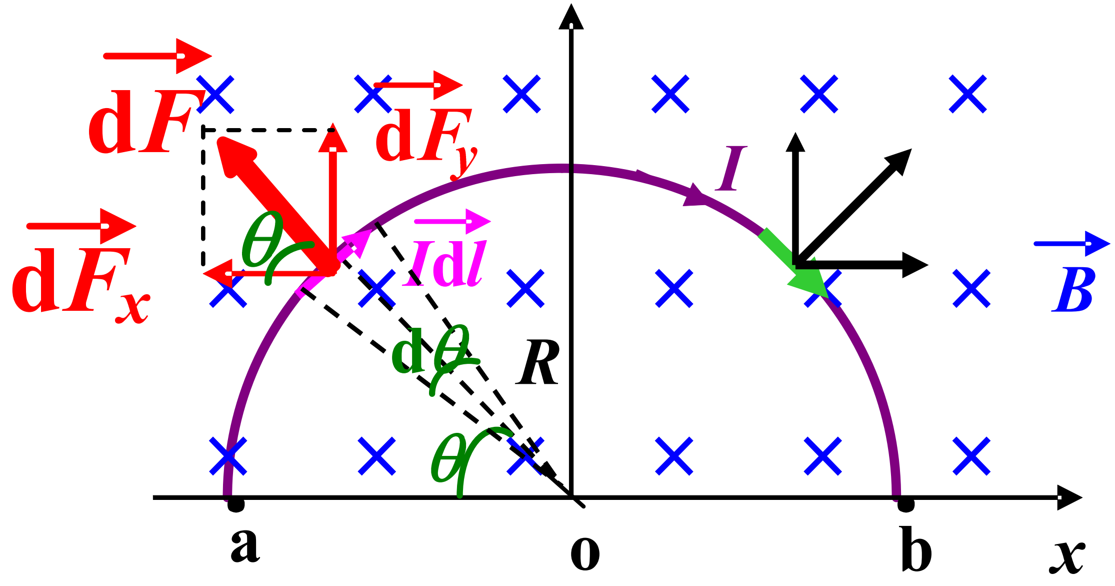
$$\mathrm{d}F = (I\mathrm{d}l)B$$

则两分力大小

$$dF_x = dF\cos\theta$$

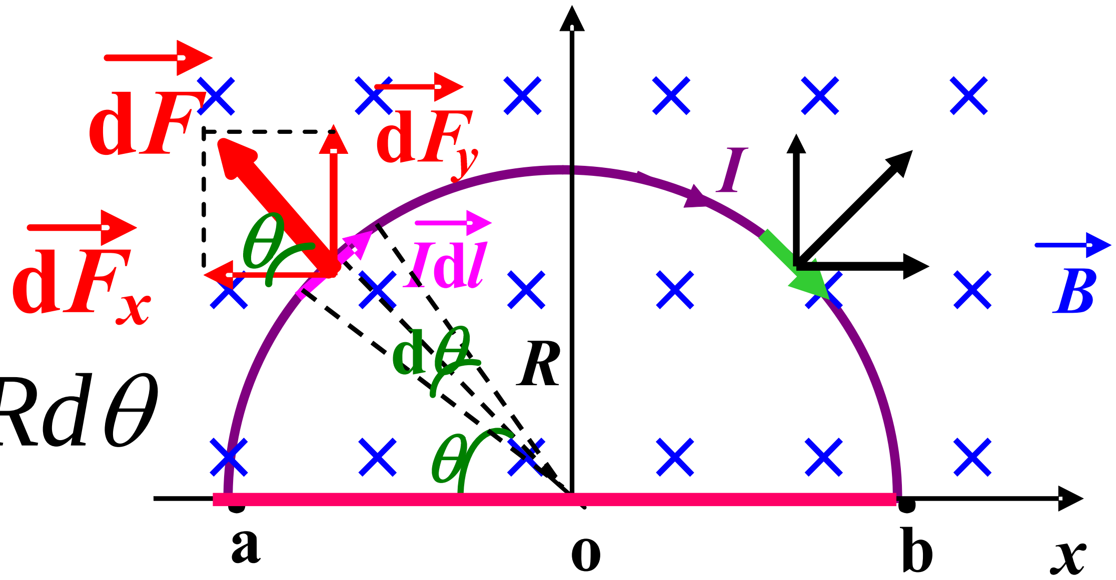
$$dF_y = dF\sin\theta$$

根据对称性，则$F_x = 0$



$$dF_y = dF\sin\theta$$

$$= IdlB\sin\theta = IB\sin\theta Rd\theta$$



$$F = F_y = \int_0^{\pi} IB\sin\theta Rd\theta = 2IRB$$

对于导线ab $F = 2IRB$

二、载流体之间的相互作用力

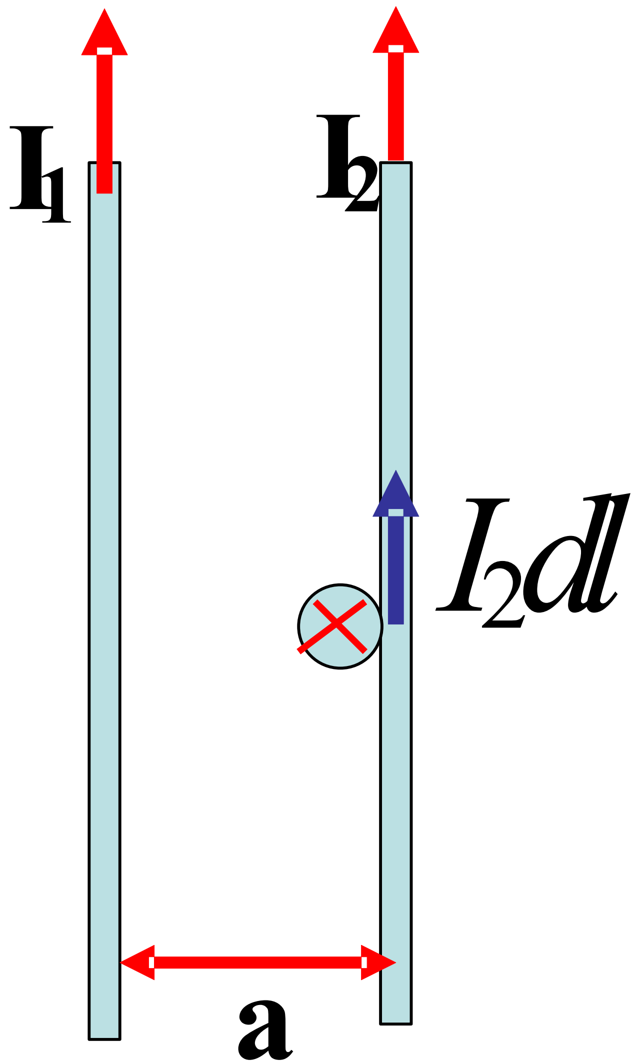
两无限长直导线

I_1在I_2处所产生的磁感应强度

$$\vec{B}_{21} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a} \otimes$$

I_2上电流元 $I_2 d\vec{l}$ **受力为：**

$$d\vec{F}_{21} = I_2 d\vec{l} \times \vec{B}_{21}$$



$$d\vec{F}_{21} = I_2 d\vec{l} \times \vec{B}_{21}$$

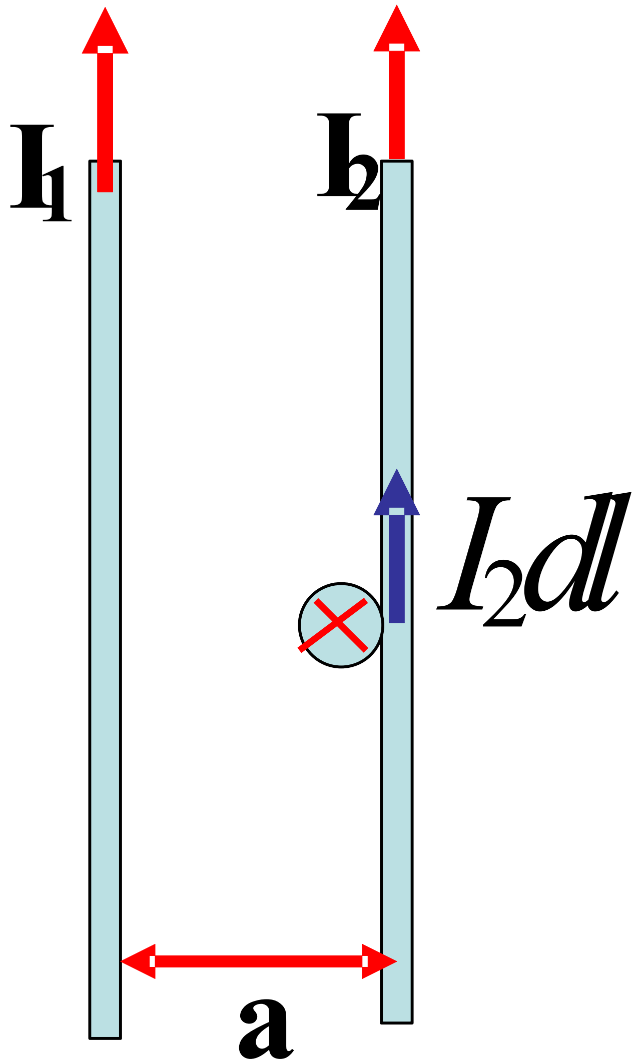
力的大小：

$$dF_{21} = I_2 dl B_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} dl$$

方向向左

I_2单位长度受力为：

$$f_{21} = \frac{dF_{21}}{dl} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$



I_1单位长度受力为：

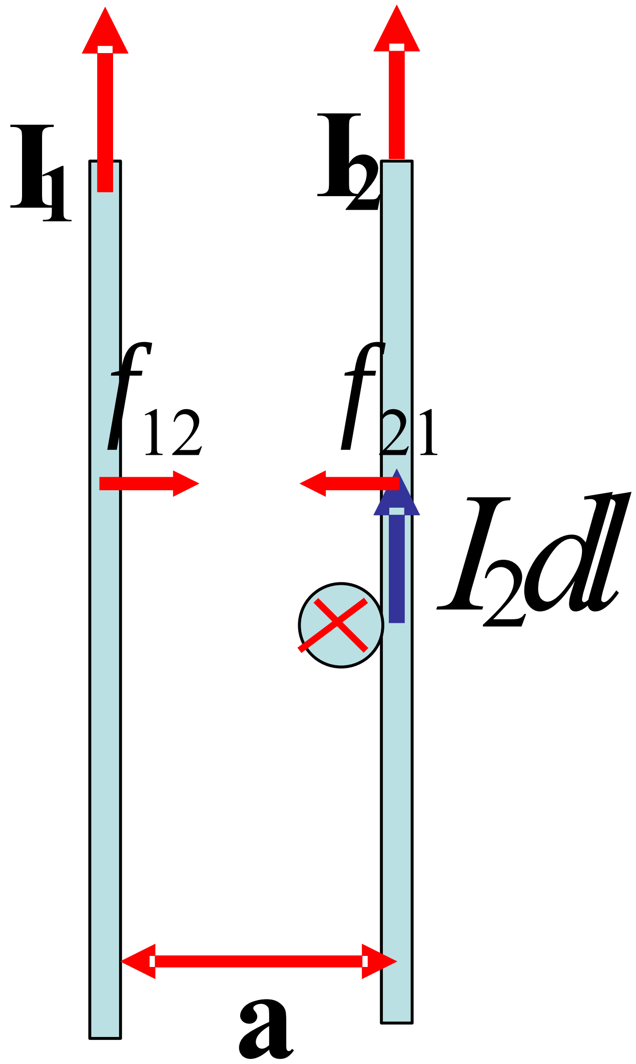
$$f_{12} = \frac{dF_{12}}{dl} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$

安培的定义

若a=1m，电流强度为1A，则每根导线所受安培力为

$$f = \frac{\mu_0 II}{2\pi a} = 2\times 10^{-7} N \bullet m^{-1}$$

$$I = \sqrt{\frac{2\pi a f}{\mu_0}} = 1A$$



三、均匀磁场对载流线圈的作用力

上下两边受力：

$$F_{ab}=\int_0^{l_1} IdlB\sin\left(90^\circ+\theta\right)=IBl_1\cos\theta$$

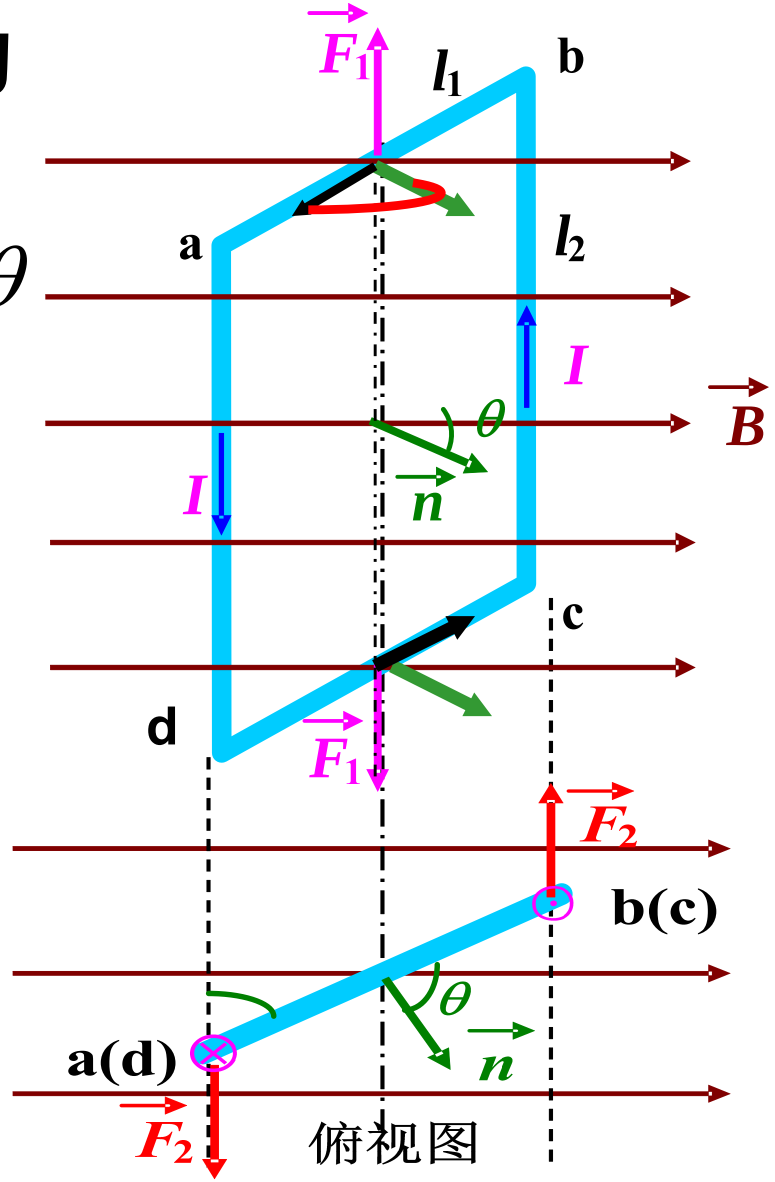
$$F_{dc}=\int_0^{l_1} IdlB\sin\left(90^\circ-\theta\right)$$

$$=IBl_1\cos\theta$$

可见， $F_{ab}=F_{dc}=F_1$

二力相互抵消，

不会引起线圈转动



左右两边受力：

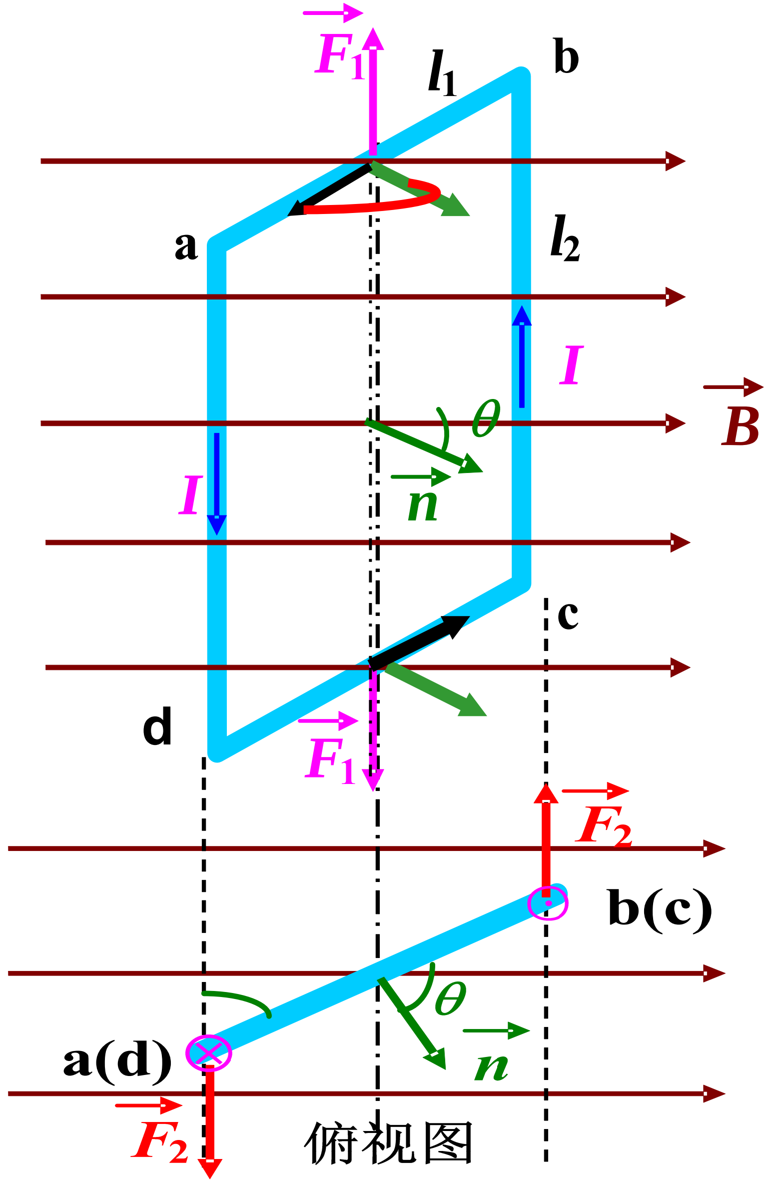
$$F_{ad}=\int_0^{l_2} IdlB=IBl_2$$

$$F_{bc}=\int_0^{l_2} IdlB=IBl_2$$

可见，$F_{ad}=F_{bc}=F_2$

此二力不在同一直线上，

将产生力矩，使得线圈转动



此二力形成的力偶矩为

$$\left|\vec{M}\right| = 2\left|\vec{r} \times \vec{F}_2\right| = 2F_2\left(\frac{l_1}{2}\right)\sin\theta$$

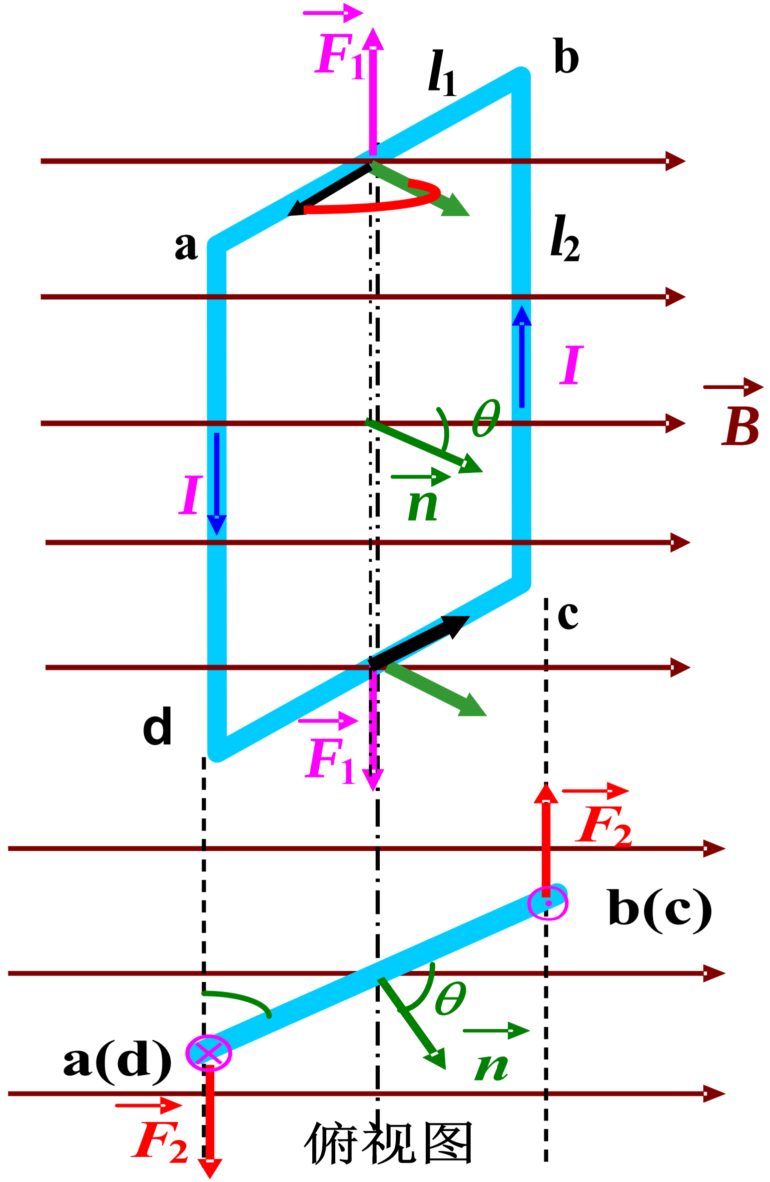
$$= 2IBl_2\left(\frac{l_1}{2}\right)\sin\theta = IBl_2l_1\sin\theta$$

故 $M = IBS\sin\theta$

定义线圈的磁矩 $\vec{P}_m = IS\hat{n}$

线圈的力偶矩 $M = P_m B\sin\theta$

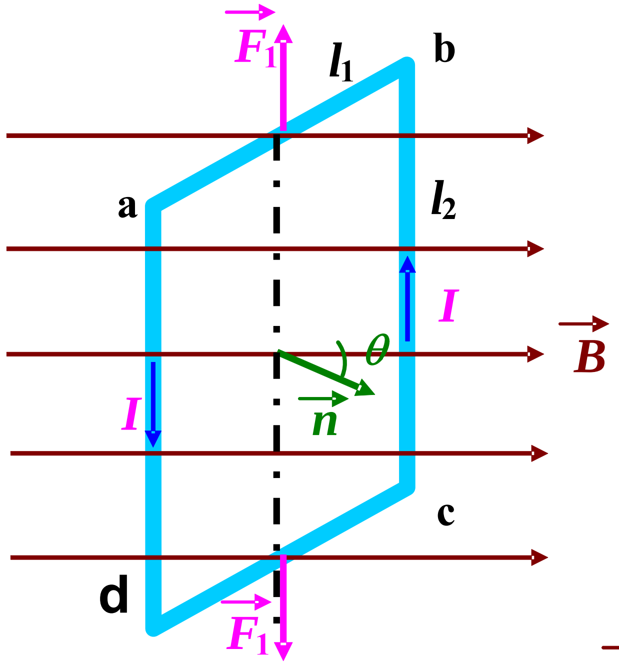
$$\boxed{\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}}$$



$$\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}$$

方向： **由叉积决定**

力矩的方向是沿轴的方向，不是指“顺时针”或“反时针”方向。



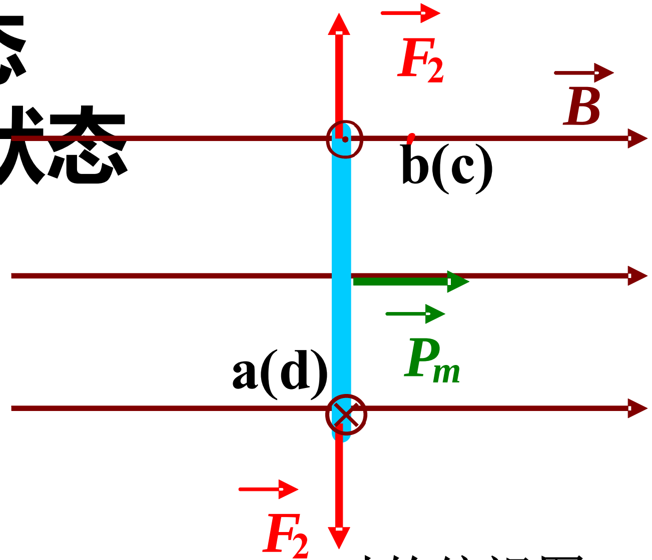
大小 $M = IBS\sin\theta$

$\theta = 0$，稳定平衡状态

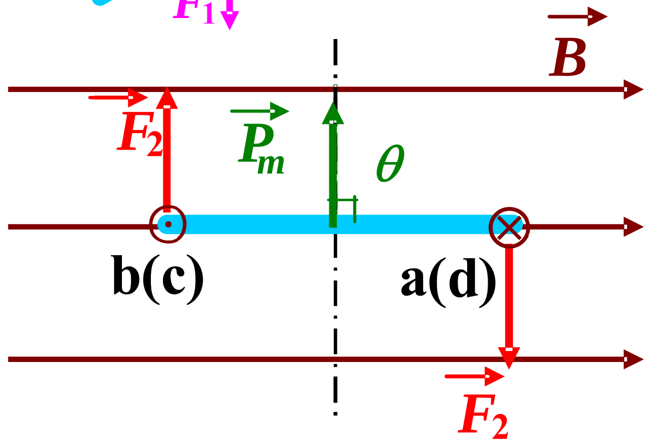
$\theta = \pi$，不稳定平衡状态

$\theta = \pi/2$时，

$$M_{\max} = IBS$$

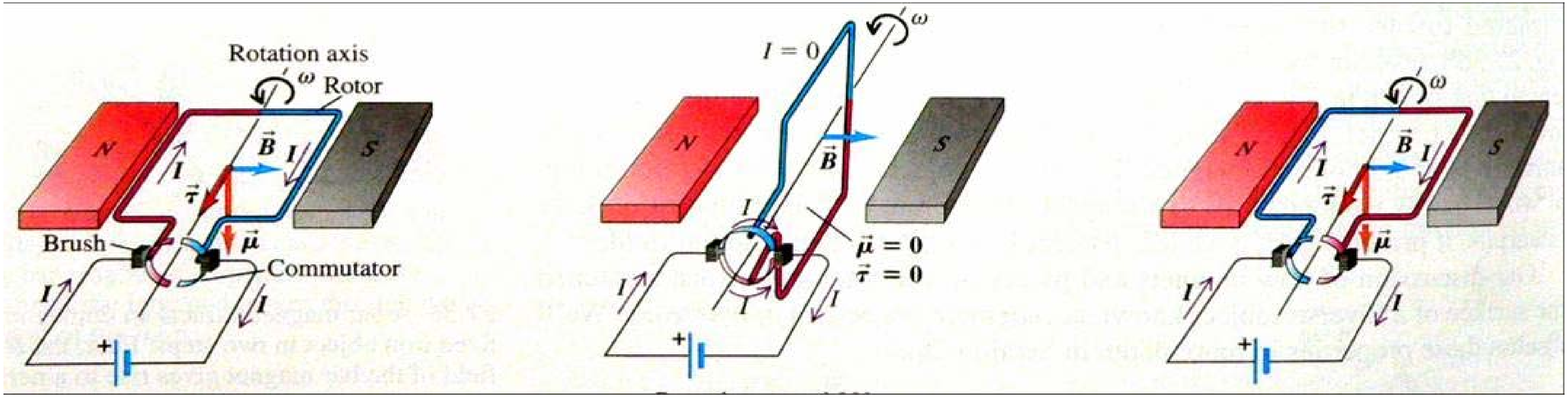


$\theta=0$ 时的俯视图



$\theta=\pi/2$ 时的俯视图

应用：电动机



Rotation axis
ω
Rotor
N
S
I
$\vec{B}$
$\vec{\tau}$
$\vec{\mu}$
Brush
Commutator
+
I = 0
$\vec{\mu} = 0$
$\vec{\tau} = 0$

总结:

$$\boxed{\vec{B} = \int d\vec{B} = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}}$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = 0$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i$$

$$\vec{f} = q\vec{\upsilon} \times \vec{B} \qquad \vec{f} = \int_{(I)} I\mathrm{d}\vec{l} \times \vec{B} \qquad \vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$$

1.圆电流中心的场 $$B = N\frac{\mu_0 I}{2R}$$

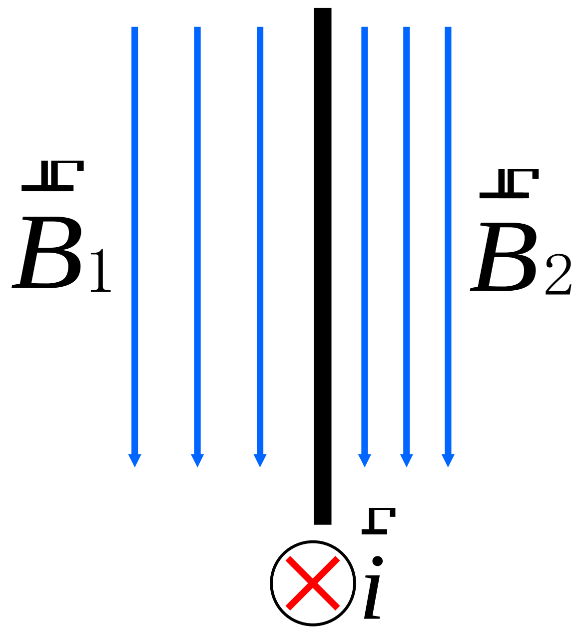
2.无限长载流直导线 $$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

3.密绕螺绕环 $$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

4.无限大均匀载流平面 $$B = \frac{\mu_0 i}{2}$$

5.密绕长直螺线管内部场 $$B = \mu_0 nI$$

例.如图所示，将一均匀分布着面电流的无限大平面放入均匀磁场中，已知平面两侧的磁感应强度分布为B1和B2，求该载流平面上单位面积所受到的力?



解：可推断出无限大载流平面电流流向里

令电流密度为i，其产生的磁感应强度为B′

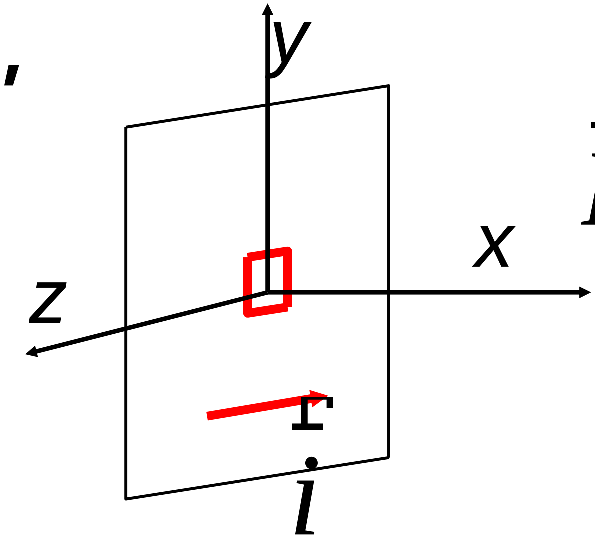
均匀磁场磁感应强度为B_0，

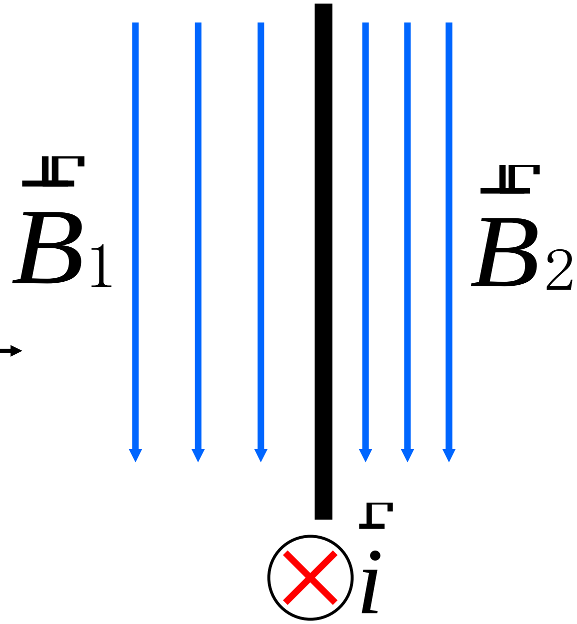
$$B_1 = B_0 - B' \qquad B_2 = B_0 + B'$$

而 $$B' = \frac{\mu_0}{2} i$$

三式联立，得

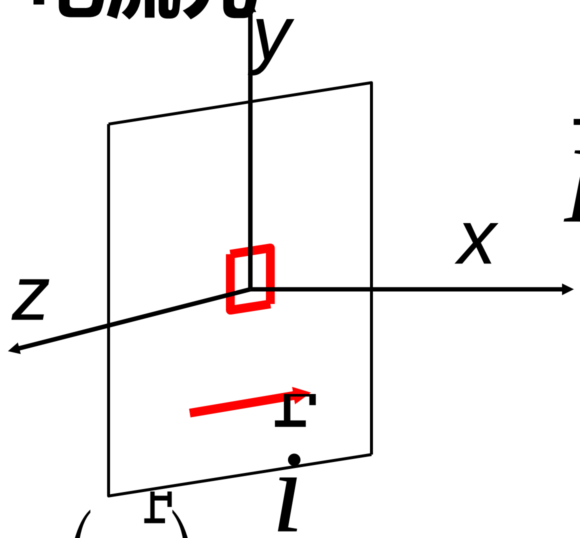
$$B_0 = \frac{B_1 + B_2}{2} \qquad i = \frac{B_2 - B_1}{\mu_0}$$

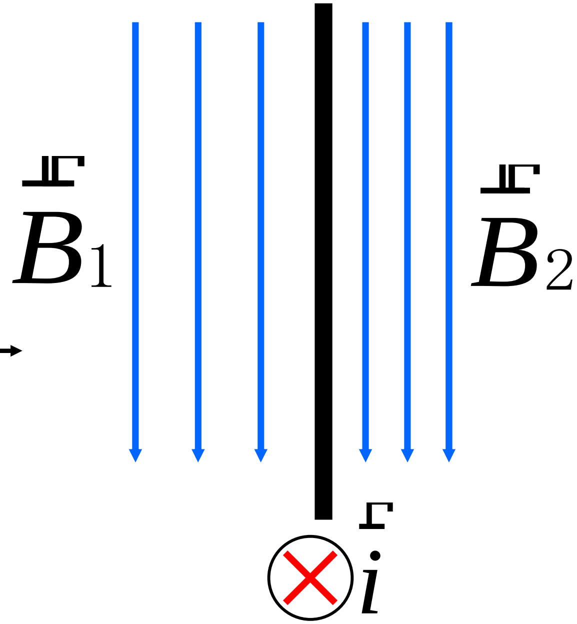




建立如图所示坐标系，选一电流元

$$I d\vec{l} = i\,dy\,dz\left(-\hat{k}\right)$$





则它所受到得磁场力为

$$d\vec{f} = I d\vec{l} \times \vec{B}_0$$

$$= i\,dy\,dz\left(-\hat{k}\right)\times B_0\left(-\vec{j}\right) = iB_0 dS\left(-\vec{i}\right)$$

则无限大载流平面单位面积受到得磁场力为

$$\vec{f} = \frac{d\vec{f}}{dS} == iB_0\left(-\vec{i}\right) = \frac{B^2{}_2 - B^2{}_1}{2\mu_0}\left(-\vec{i}\right)$$