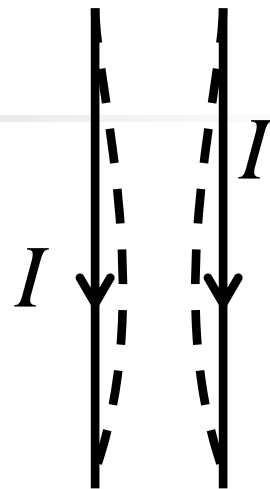
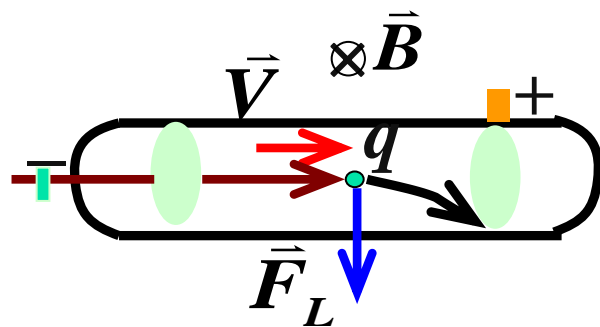


# 带电粒子在磁场中的运动

在磁场中运动的电荷受到磁力；



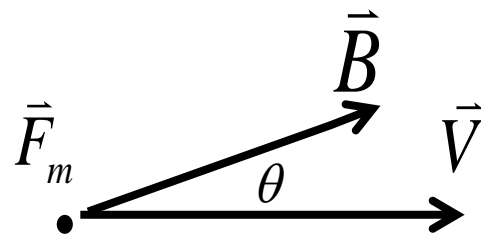
载流导线与载流导线的相互作用。

结论

**磁力与运动电荷对运动电荷的相互作用有关。**

**安培假说：**1822年**安培**提出关于物质磁性本质的假说，认为一切磁现象都起源于电流（运动电荷），物质的磁性起源于构成物质的分子电流（电子绕核运动、电子自旋、核自旋）。

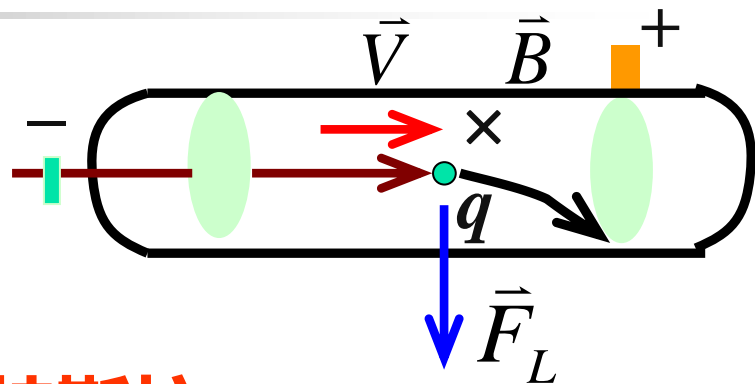
当带电粒子的速度在任意方向时，  
受力 $F_m$  大小与 $BV \sin \theta$ 成正比，  
 $\theta$  为  $\vec{V}$  和  $\vec{B}$  之间的夹角。所以：



$$\vec{F}_L = q\vec{V} \times \vec{B}$$

其合力为：

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



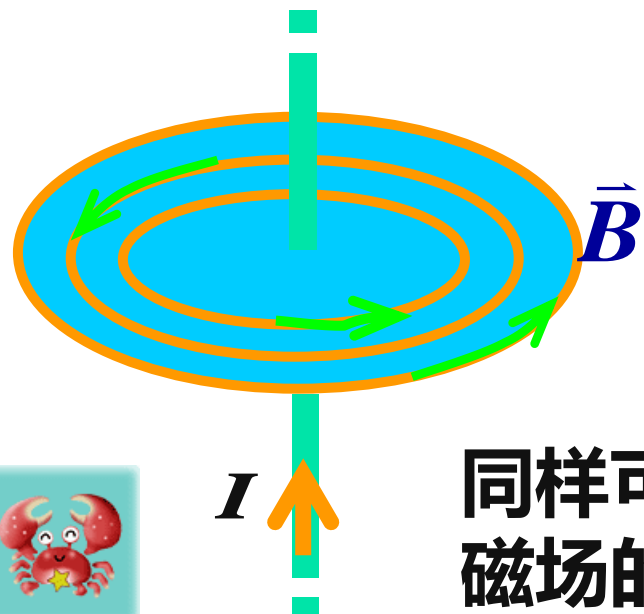
单位：在国际单位制中：1[T]=1特斯拉

磁感应强度B的量纲 $[MT^{-2}I^{-1}]$

1 特斯拉=  $10^4$  高斯

地球磁场约为0.6高斯

同样可用磁感应线（磁力线）形象地描绘磁场的分布。



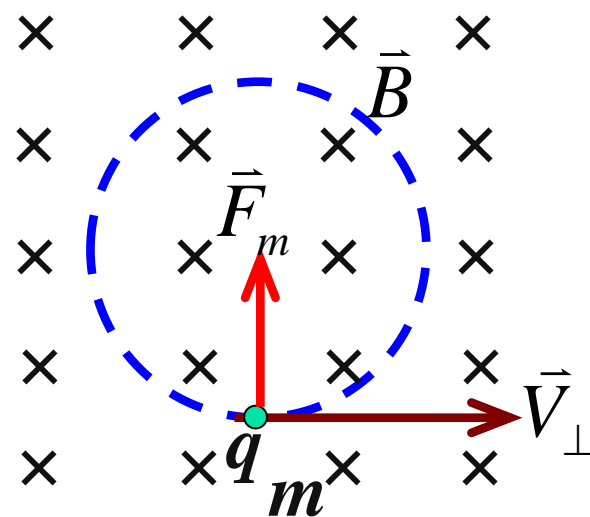
## 带电粒子在均匀磁场中的匀速圆周运动

将速度分解为平行于磁场和垂直于磁场的分量；  
当垂直于磁场分量为零时，所受洛伦兹力为零，  
粒子作匀速直线运动。

当平行于磁场分量为零时，垂直于磁场的速度分量提供做匀速圆周运动的向心力，运动方程

$$qV_{\perp}B = \frac{mV_{\perp}^2}{R}$$

$$\text{半径 } R = \frac{mV_{\perp}}{qB}$$

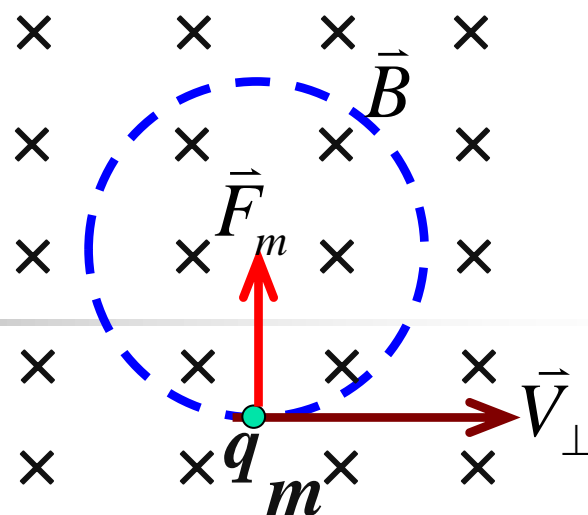


半径  $R = \frac{mV_{\perp}}{qB}$

角速度  $\omega = \frac{V_{\perp}}{R} = \frac{qB}{m}$

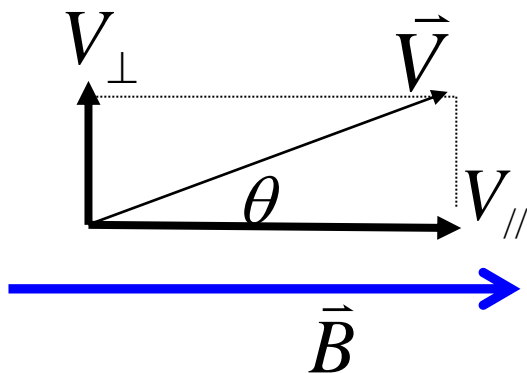
周期  $T = \frac{2\pi m}{qB}$

结论



圆周的半径与垂直于磁场的速度分量成正比。

匀速圆周运动的周期与速度无关。



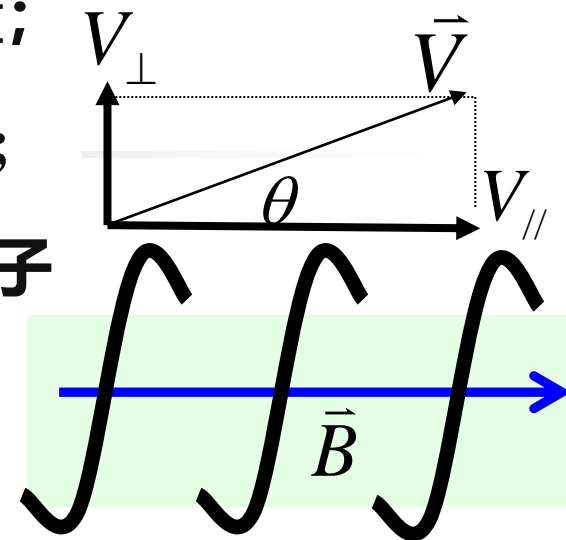
$\theta$  为速度与磁感应强度之间的夹角。

$$V_{\perp} = V \sin \theta$$

# 带电粒子在磁场中的螺旋线运动

- 将速度分解为**平行**于磁场和**垂直**于磁场的分量；
- **垂直**于磁场的速度分量使粒子做匀速圆周运动；
- 平行于磁场的速度分量不提供力的作用，使粒子沿磁场方向做匀速直线运动；

所以，其合运动为螺旋线运动。



**螺距**（在一个周期内沿磁场方向行进的距离）

$$h = V_{//}T = V \cos \theta \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

$V_{\perp}$  和  $V_{//}$  分别是速度在垂直于磁场方向的分量和平行于磁场的分量。

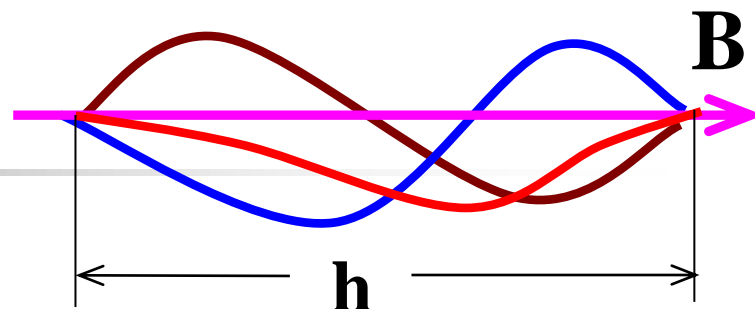
匀速圆周运动的半径仅与速度的垂直分量有关。

## \* 磁聚焦magnetic focusing (不要求)

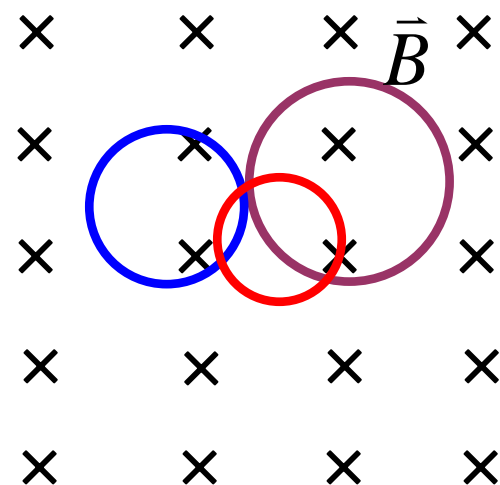
一束发散角不大的带电粒子束，若这些粒子沿磁场方向的分速度大小又一样，它们有相同的螺距，经过一个周期将重新会聚在另一点，这种发散粒子束会聚到一点的现象叫**磁聚焦**。

$$h = V_{//} T = V \cos \theta \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

它广泛应用于电真空器件中如电子显微镜electron microscope中。它起了光学仪器中的透镜的作用。



$$\text{半径 } R = \frac{mV_{\perp}}{qB}$$



# 带电粒子比荷的测定 质谱仪

• 滤速器

$$qE = qVB$$

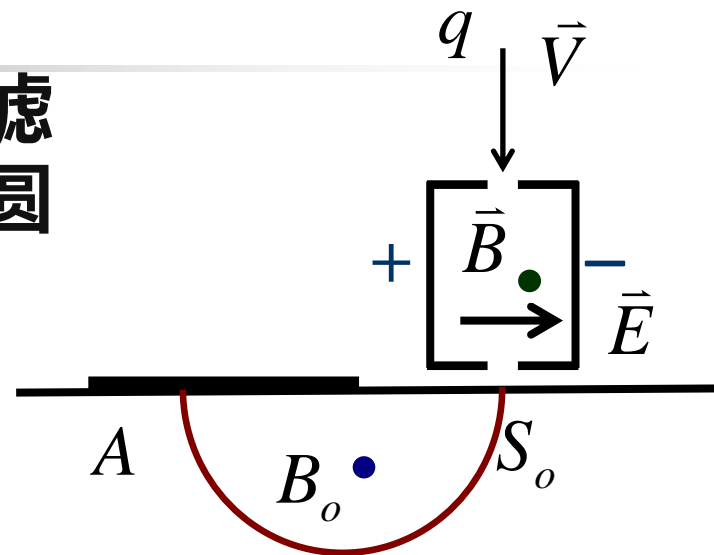
$$V = \frac{E}{B}$$

• 质谱分析仪 质量为  $m$  ,

电量为  $q$  的带电粒子 经过滤速器后, 飞入磁场  $B_0$  中做圆周运动, 落在感光片 A 处, 其半径  $R$  为:

$$\because R = mV / qB_0$$

$$\frac{q}{m} = \frac{V}{RB_0}$$



$$AS_0 = 2R = x$$

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

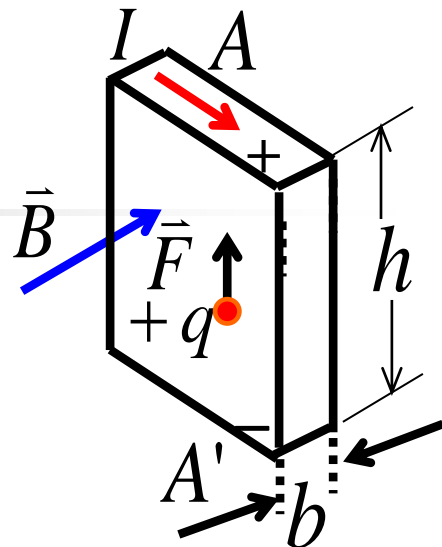
$$\frac{q}{m} = \frac{2E}{B_0 B x}$$

由谱线的位置 ( $x$  的大小) 可以确定同位素的**比荷** (**荷质比**)。由感光片上谱线的黑度, 可以确定同位素的相对含量。

# 霍耳效应

## ●现象

1879年霍耳发现把一载流导体放在磁场中，如果磁场方向与电流方向垂直，则在与磁场和电流二者垂直的方向上出现横向电势差，这一现象称之为**霍耳现象**。



## ●实验结果

$$V_{AA'} \propto \frac{IB}{b}$$

载流子的正负决定  $V_{AA'}$  的正负

$$V_{AA'} = k \frac{IB}{b}$$

$$V_{AA'} > 0 \quad q > 0$$

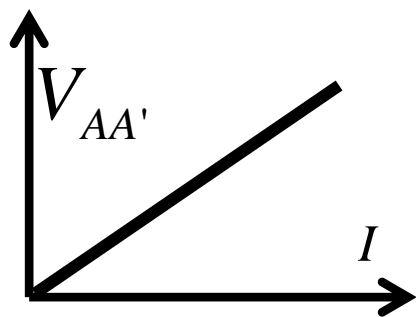
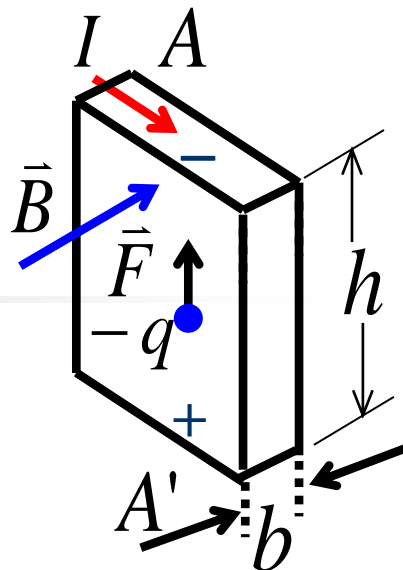
$$V_{AA'} < 0 \quad q < 0$$

实验上称  $k$  为霍耳系数，与材料有关。



## ●霍耳效应的经典解释

以载流子是负电荷为例,其定向漂移速度为 $u$ 与电流反向,在磁场中的洛伦兹力使载流子运动在 $AA'$ 方向上形成霍耳电场。



霍耳电场力与洛伦兹力平衡时  
电子的漂移达到动态平衡,从而  
形成横向电势差

$$eE_H = euB \quad \longrightarrow \quad V_{AA'} = E_H h = uBh$$

$$I = enubh \quad \longrightarrow \quad V_{AA'} = \frac{1}{ne} \frac{IB}{b} = k \frac{IB}{b}$$

## ●霍耳效应的应用

$$V_{AA'} = \frac{1}{ne} \frac{IB}{b} = k \frac{IB}{b}$$

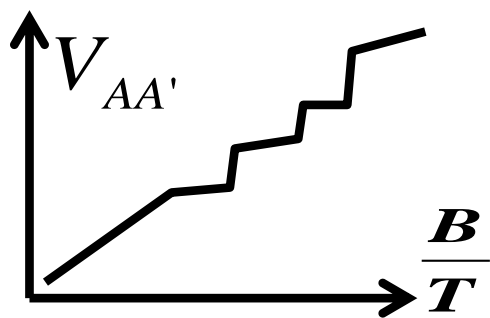
测量载流子**类型**

测量载流子**浓度**

测量**磁感应强度**

因为半导体的载流子浓度小于金属电子的浓度且容易受温度、杂质的影响，所以霍耳系数是研究半导体的重要方法之一。

优点是无机械损耗，可以提高效率，但目前尚存在技术问题有待解决。



**2013年3月** 薛其坤院士领导的科研小组观察到了反常量子霍尔效应

**2016** 首届未来科学大奖-物质科学奖

**2016** 诺贝尔物理学奖 — 拓扑相变

八十年代，发现**量子霍耳效应**，即曲线  $V_{AA'} \sim B$ ，当  $I, b$  不变时，仍出现台阶，而不为线性关系。为此Klaus von Klitzing 在85年获诺贝尔奖金；（极低温下）

九十年代发现有**分数量子霍耳效应**，与分数电荷的存在与否有关，理论上用量子力学解释尚不够。98年**崔琦**等获诺贝尔奖金。

# 回旋加速器 *Cyclotron*(不要求)

密封在真空中的两  
两极间的强大磁场  
间有一窄缝，中心  
盒间接有交流电源  
电场用以加速带电  
交变电场的周期恰  
即粒子绕过半圈恰  
加速。因为回旋周  
被反复加速，最后



$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

$R$ 为盒的最大半径。

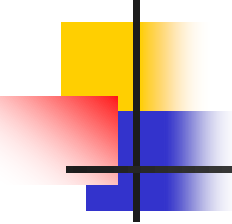


$$\therefore V_{\max} = \frac{2\pi R}{T}$$

$$\therefore V_{\max} = \frac{qBR}{m}$$

**2008**年启动大型强子对撞机（**LHC**）不仅是世界最大的粒子加速器，同时也是世界最大的机器。位于瑞士、法国边境地区的地下**100**米深的环形隧道中，隧道全长**26.659**公里，建设耗资超过**60**亿美元。





**加速的粒子能量，每十年提高一个数量级。能量范围在 $0.08\text{Mev}$  —  $5 \times 10^5\text{Mev}$ 。能量的每次提高都带来对粒子的新发现。如1983年发现 $W^-$ 、 $W^+$ 、 $Z^0$ 粒子。**

上帝粒子是**2012**年前物质理论中最后一个未被发现的粒子。它的发现将彻底改变现有的物理学理论体系，并进而揭开充斥在宇宙中的暗物质的神秘本质。**2012年7月4日**，欧洲核子研究中心(**CERN**)今天宣布发现新亚原子粒子，疑似上帝粒子-希格斯玻色子。

北京时间**10月8日**下午**6点45分**，**2013**年诺贝尔物理学奖揭晓，**Francois Englert**和**Peter W. Higgs**获奖。

获奖理由是“理论性发现了一种机制，有助于我们理解亚原子粒子质量的起源，最近欧洲大型强子对撞机**ATLAS**和**CMS**实验所发现的预测中的基本粒子对其进行了确认”。

年龄：**32/81**



# 磁场对载流导线的作用 磁矩

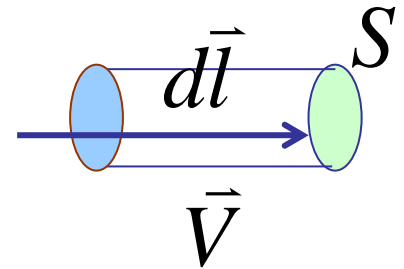
安培力 安培定律

带电粒子在磁场中受力  $\vec{F}_L = q\vec{V} \times \vec{B}$

一段载流导线  $dl$  中，有带电粒子数：  $nSdl$   
它们在磁场中受力为：

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

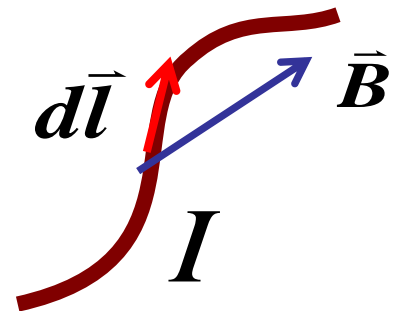
其中  $I = nqVS$ ；  $d\vec{l}$  的方向为电流  
流动的方向。 **电流元**  $Id\vec{l}$



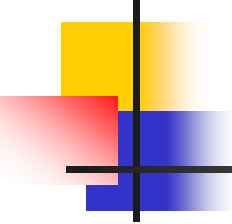
所以，一段载流导线在磁场中受力为：

$$\vec{F} = \int_L Id\vec{l} \times \vec{B}$$

称为安培力。

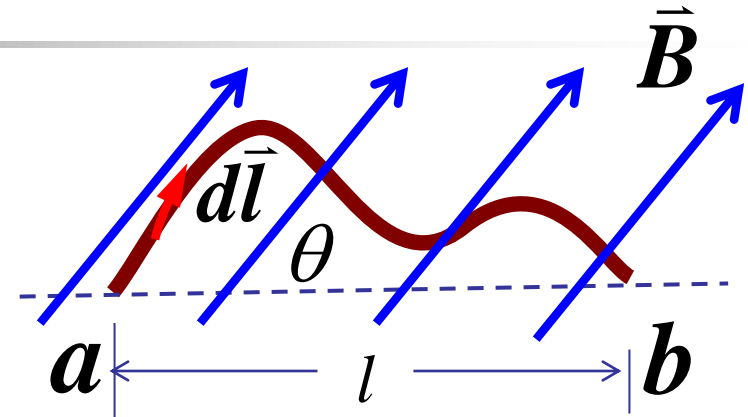


例题一：有一段弯曲导线  $ab$  通有电流  $I$ ，  
求此导线在如图所示均匀磁场中受的力？


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

矢量积满足乘法分配率

$$\vec{F} = I \left( \int_a^b d\vec{l} \right) \times \vec{B} = I \vec{l} \times \vec{B}$$



$$\therefore F = IlB \sin \theta$$

矢量和  $\int_a^b d\vec{l} = \vec{l}$

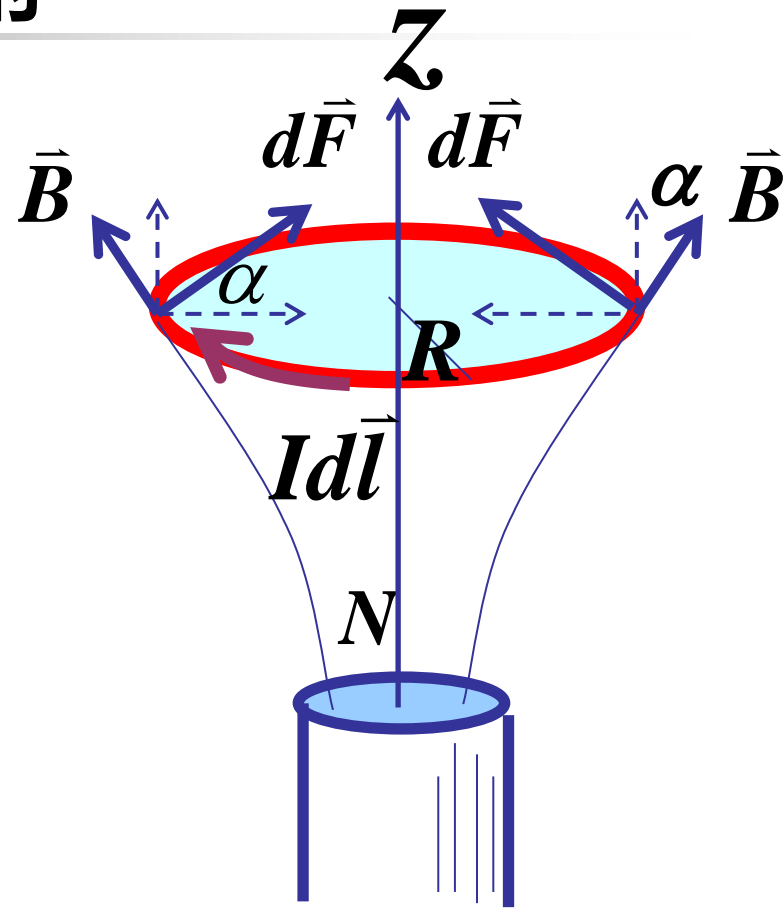
$\vec{l}$  与磁感应强度  $\vec{B}$  在同一平面内  
所以，该力方向垂直于纸面向外。

**例题二： 圆柱形磁铁 N 极上方水平放置一个载流导线环， 求其受力。**

**已知在导线所在处磁场B的方向与竖直方向成 $\alpha$ 角**

**由图可知： 圆环受的总磁力的方向在铅直方向， 其大小为：**

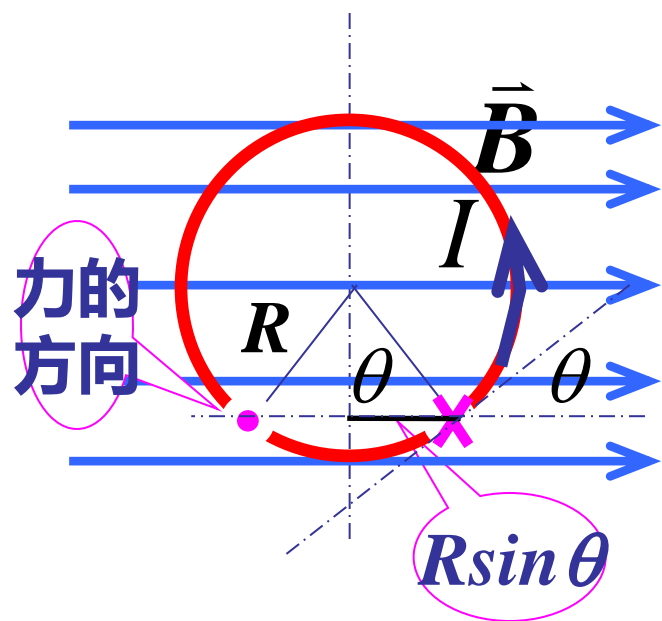
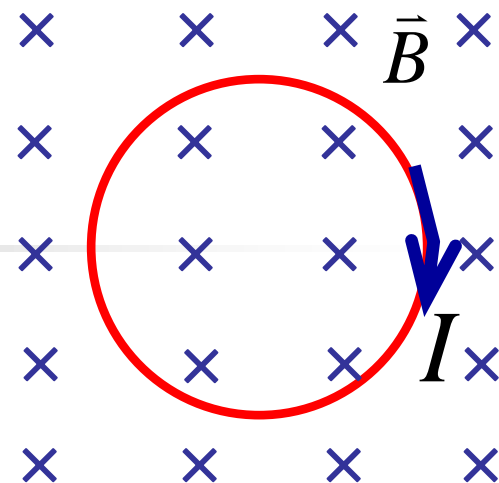
$$\begin{aligned} F &= F_z = \int dF \sin \alpha \\ &= \int_0^{2\pi R} IB \sin \alpha \cdot dl \\ &= 2\pi RIB \sin \alpha \end{aligned}$$





# 平面载流线圈在磁场中的受力和力矩

\* 当平面载流线圈的法线方向与磁感应强度  $\vec{B}$  的方向平行时，称该磁场为  $B_{//}$ ；电流元受力沿径向向外，合力为零。该力系为共点力系，合力矩为零。



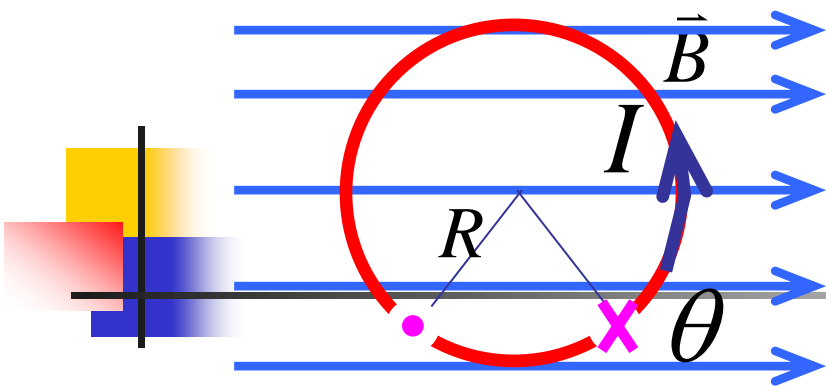
\* 当平面载流线圈的法线方向与磁感应强度  $\vec{B}$  的方向垂直时，称该磁场为  $B_{\perp}$ ；该线圈受合力为零。但力矩不为零。

$$dF = IdlB_{\perp} \sin \theta$$

$$dl = R \cdot d\theta$$

$$dM = IR^2 B_{\perp} \sin^2 \theta \cdot d\theta$$





$$dF = IdlB_{\perp} \sin \theta$$

$$dM = IR^2 B_{\perp} \sin^2 \theta \cdot d\theta$$

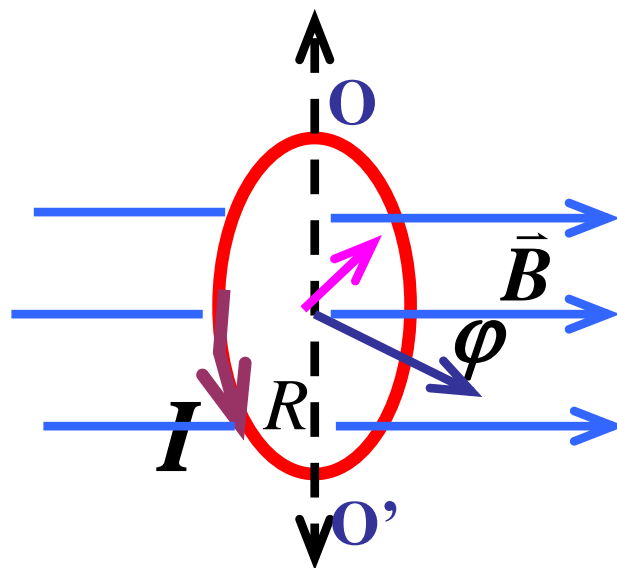
$$\therefore M = I\pi R^2 B_{\perp} = ISB_{\perp}$$

**\* 当平面载流线圈的法线方向与磁感应强度  $\vec{B}$  的方向有夹角  $\varphi$  时，该磁场的  $B_{//}$  分量对线圈无任何影响；该磁场的分量  $B_{\perp}$  对线圈作用有力矩**

$$M = I\pi R^2 B_{\perp}$$

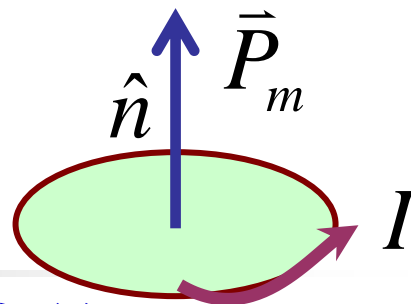
$$= ISB \sin \varphi = |IS\hat{n} \times \vec{B}|$$

**该力矩方向  
O'O 垂直于  $\vec{B}$**



## 载流线圈的磁矩

$$\vec{P}_m = \vec{m} \stackrel{def}{=} IS\hat{n}$$



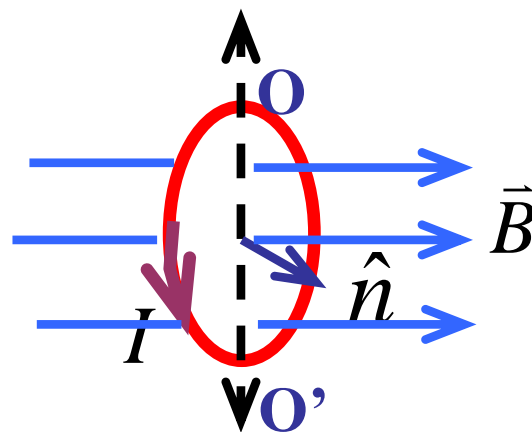
**磁矩的方向与电流的方向成右手螺旋关系**

综上所述：平面载流线圈在均匀磁场中受的力矩：

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

**上述结论具有普遍意义。**

(也适用于带电粒子沿任意闭合回路的运动或自旋磁矩在磁场中受的力矩)



\* 在均匀磁场中，载流线圈不会平动，只会转动。用于电动机、电器、仪表。

\* 在非均匀磁场中，载流线圈除受到磁力矩外，还受到磁力的作用。