

§ 8-5 带电粒子在电场和磁场中的运动

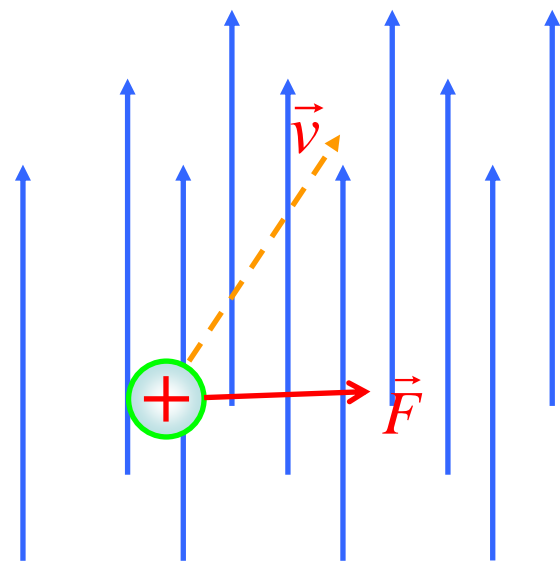
一、洛伦兹力

一般情况下，如果带电粒子在磁场中运动时，磁场对运动电荷产生力的作用，此一磁场力叫洛伦兹力。 \vec{v} 方向与磁场 \vec{B} 方向成夹角 θ 时。洛伦兹力为

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

大小： $F = qvB \sin \theta$

方向： $\vec{v} \times \vec{B}$ 的方向(右手螺旋定则)



一定要注意磁场的方向和带电粒子的电性，它们共同决定了带电粒子在磁场中的受力和偏转方向

带电粒子所受洛伦兹力总是和带电粒子运动方向垂直，故它只能改变带电粒子运动方向，不改变速度大小，即洛伦兹力不作功。

1. 带电粒子在均匀磁场中的运动

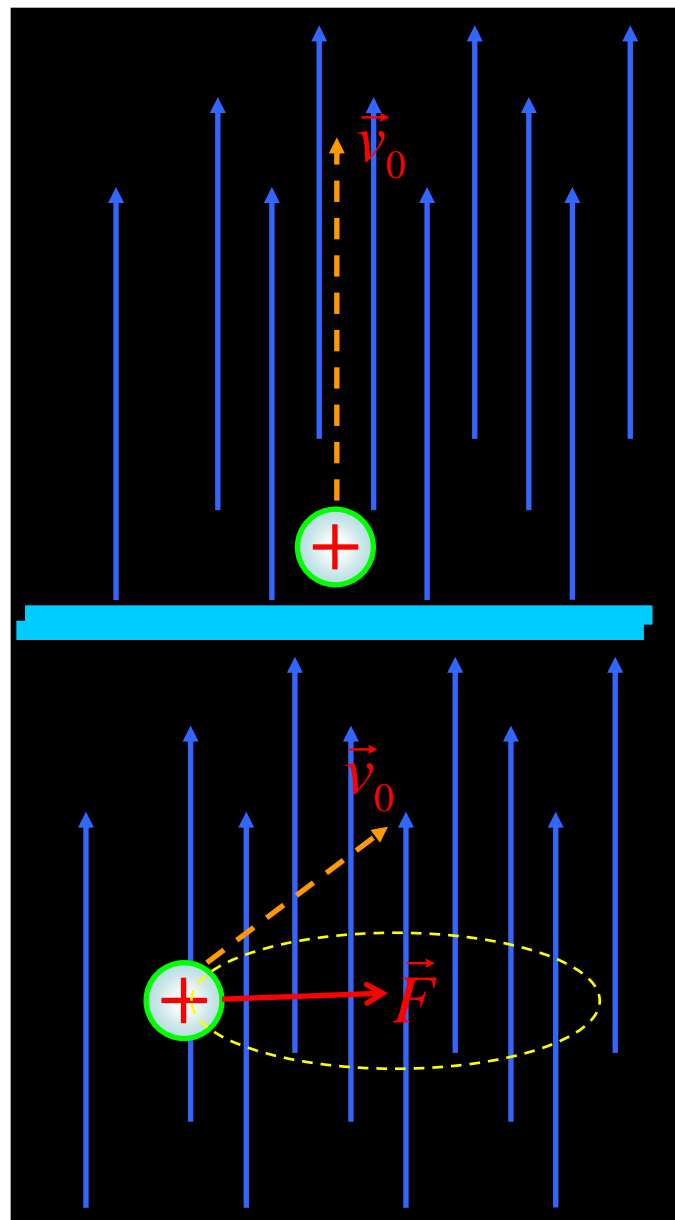
当带电粒子沿磁场方向运动时：

$$F = 0$$

粒子作匀速直线运动。

当带电粒子的运动方向与磁场方向**垂直**时：

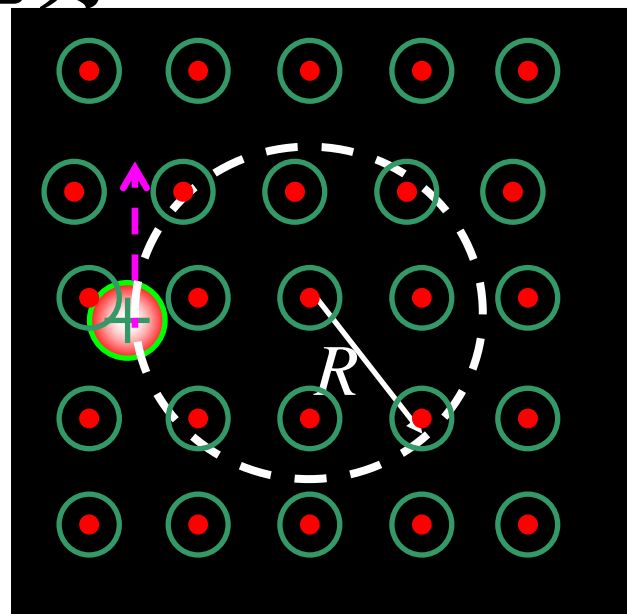
$$F = qv_0B$$



由于洛伦兹力与速度方向垂直，粒子在磁场中做匀速圆周运动。洛伦兹力为向心力

$$qv_0B = m \frac{v_0^2}{R}$$

轨道
半径



$$R = \frac{mv_0}{qB}$$

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

周期

角频率

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

(3) 如果 \vec{v}_0 与 \vec{B} 斜交成 θ 角

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv_0 \sin \theta}{qB}$$

粒子作螺旋运动，半径

周期

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

螺距

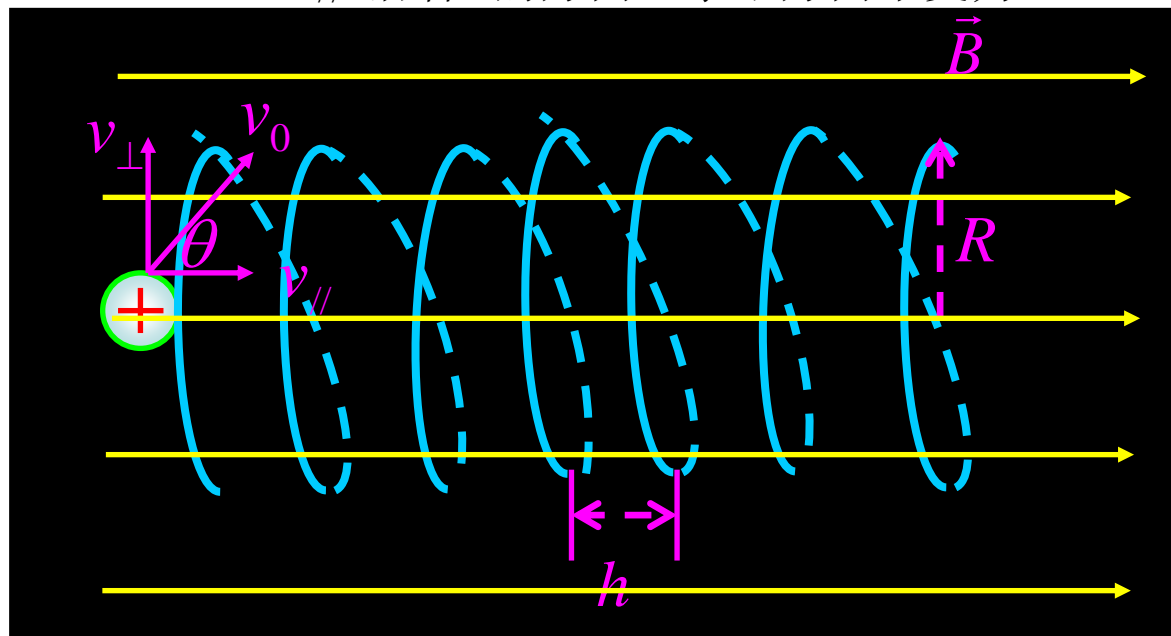
所以上图画的不标准

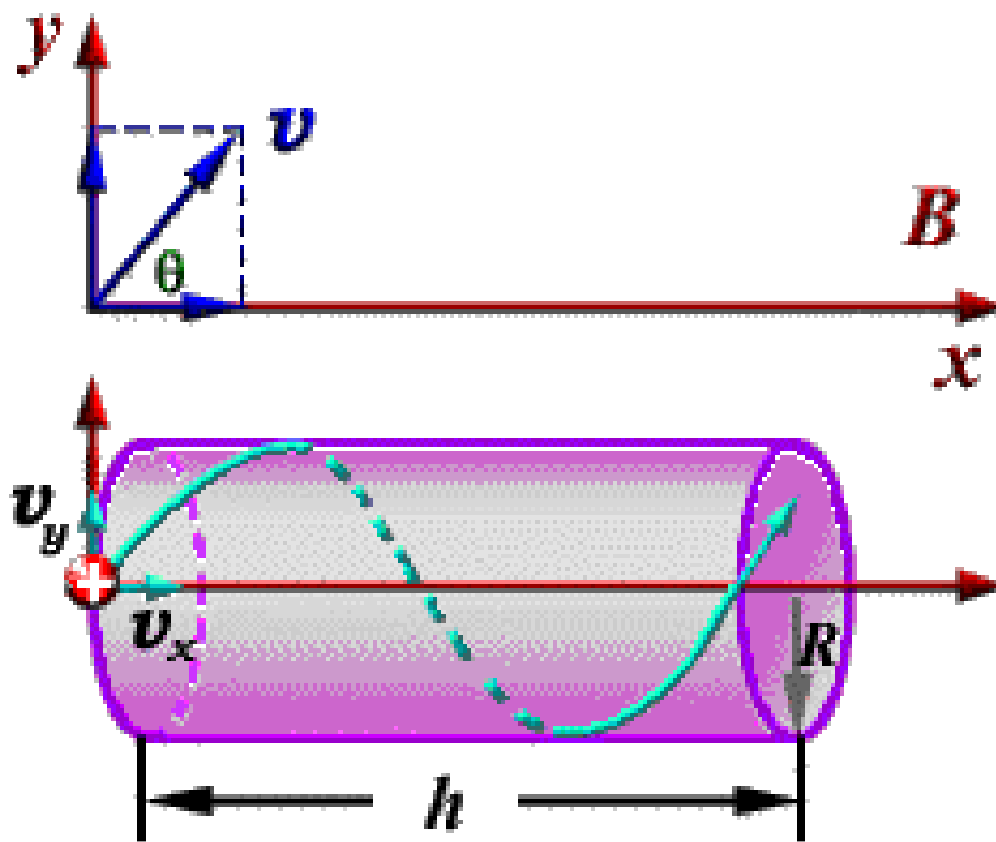
$$h = v_{\parallel} T = v_{\parallel} \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m v_0 \cos \theta}{qB}$$

注意：螺距仅与平行于磁场方向的初速度有关

垂直B的方向做圆周运动，水平方向匀速运动

v_{\parallel} 沿着B的方向，水平方向不受力

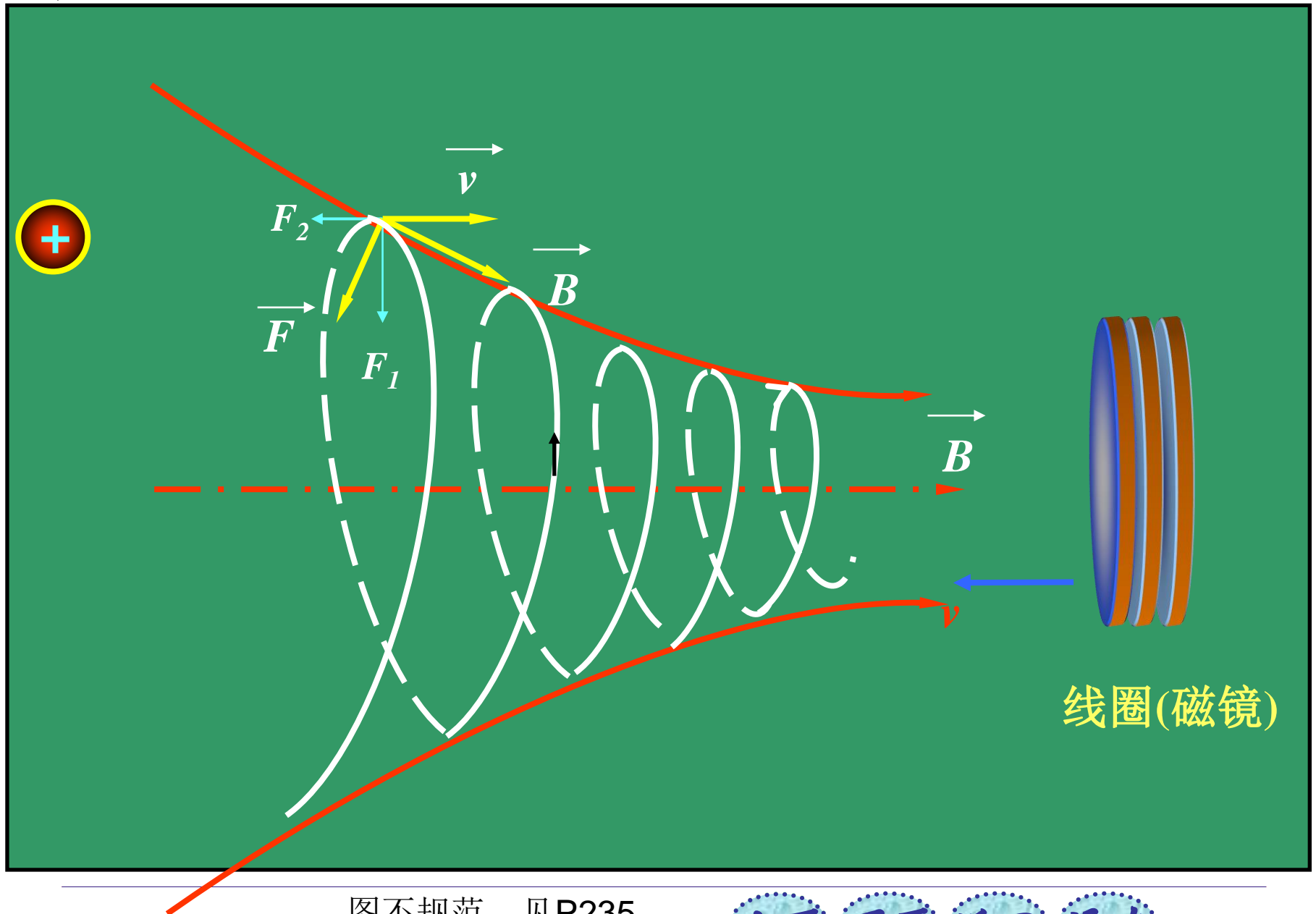




2. 带电粒子在非均匀磁场中运动

带电粒子在非均匀磁场中运动时，半径和螺距都将随磁场增大而减小，将作**变半径的螺旋线运动**；特别是当粒子向磁场增强的方向运动时，**粒子所受的磁场力，恒有一指向磁场较弱方向的分力**，这个分力阻止带电粒子向磁场较强的方向运动。这样有可能使粒子沿磁场增强方向的**速度逐渐减小到零**，从而迫使粒子**掉向反转运动**。粒子的这种返转运动就好象光线遇到镜面的反射一样，所以这种装置称为**磁镜**。

在通常情况下，粒子受到的重力远远小于洛伦兹力，所以，若在研究的问题中没有特别说明或暗示，粒子的重力是可以忽略不计的

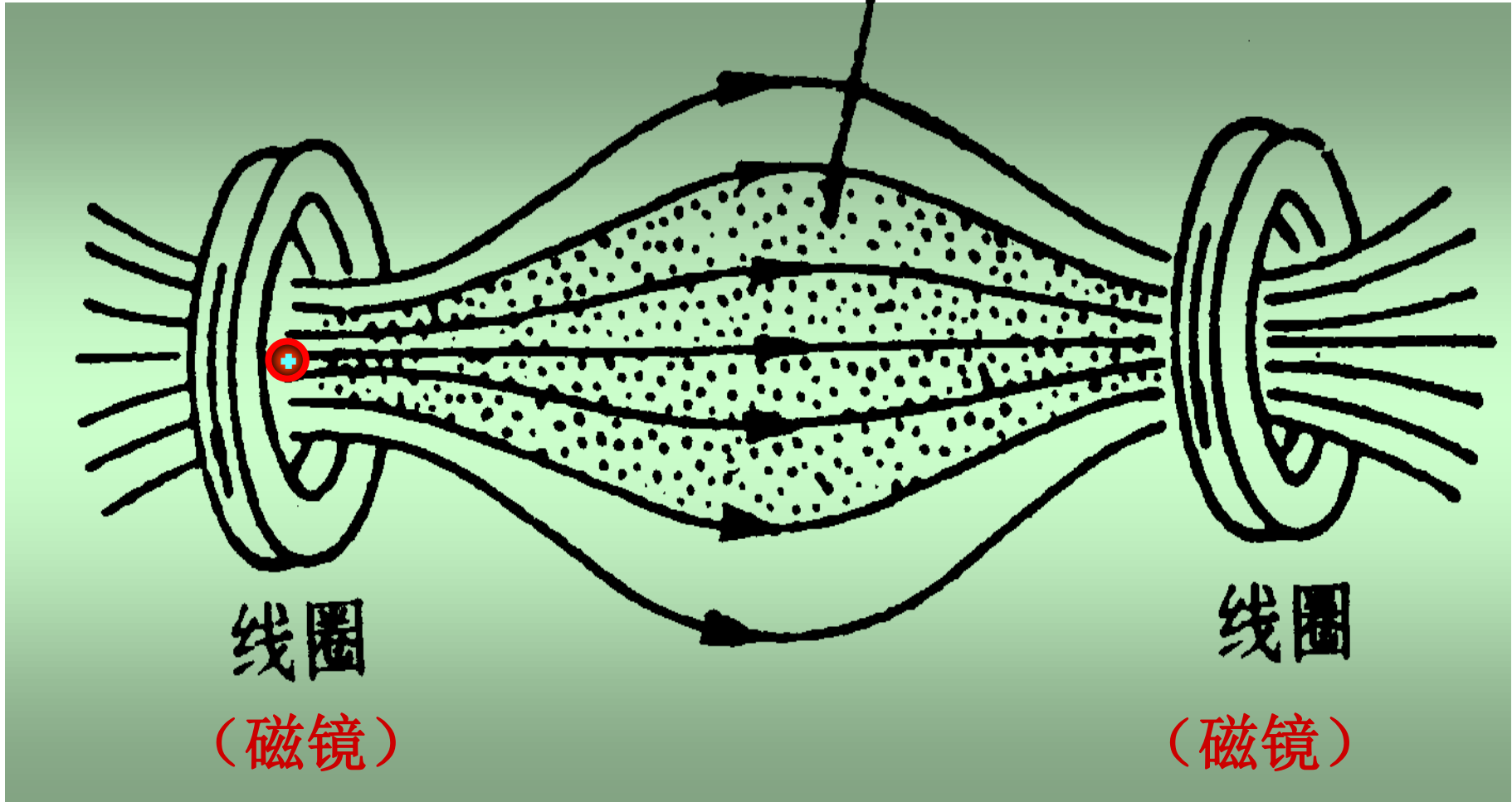


图不规范，见P235

(2) 磁约束装置（磁塞或磁镜）

等离子体

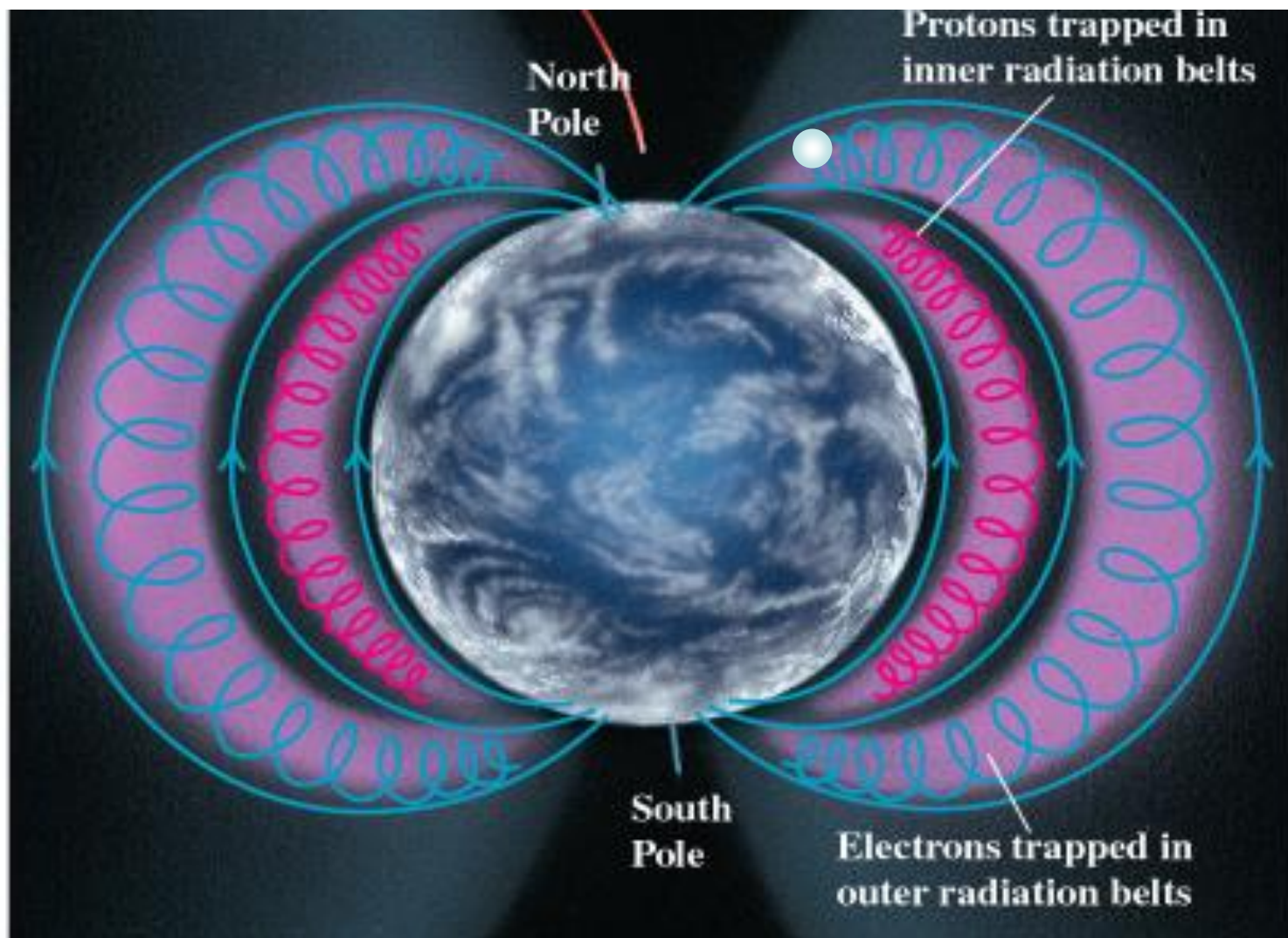
两端较强磁场对带电粒子运动起阻塞租用，迫使带电粒子局限在一定范围内往返运动



范艾伦辐射带：宇宙中的磁约束现象

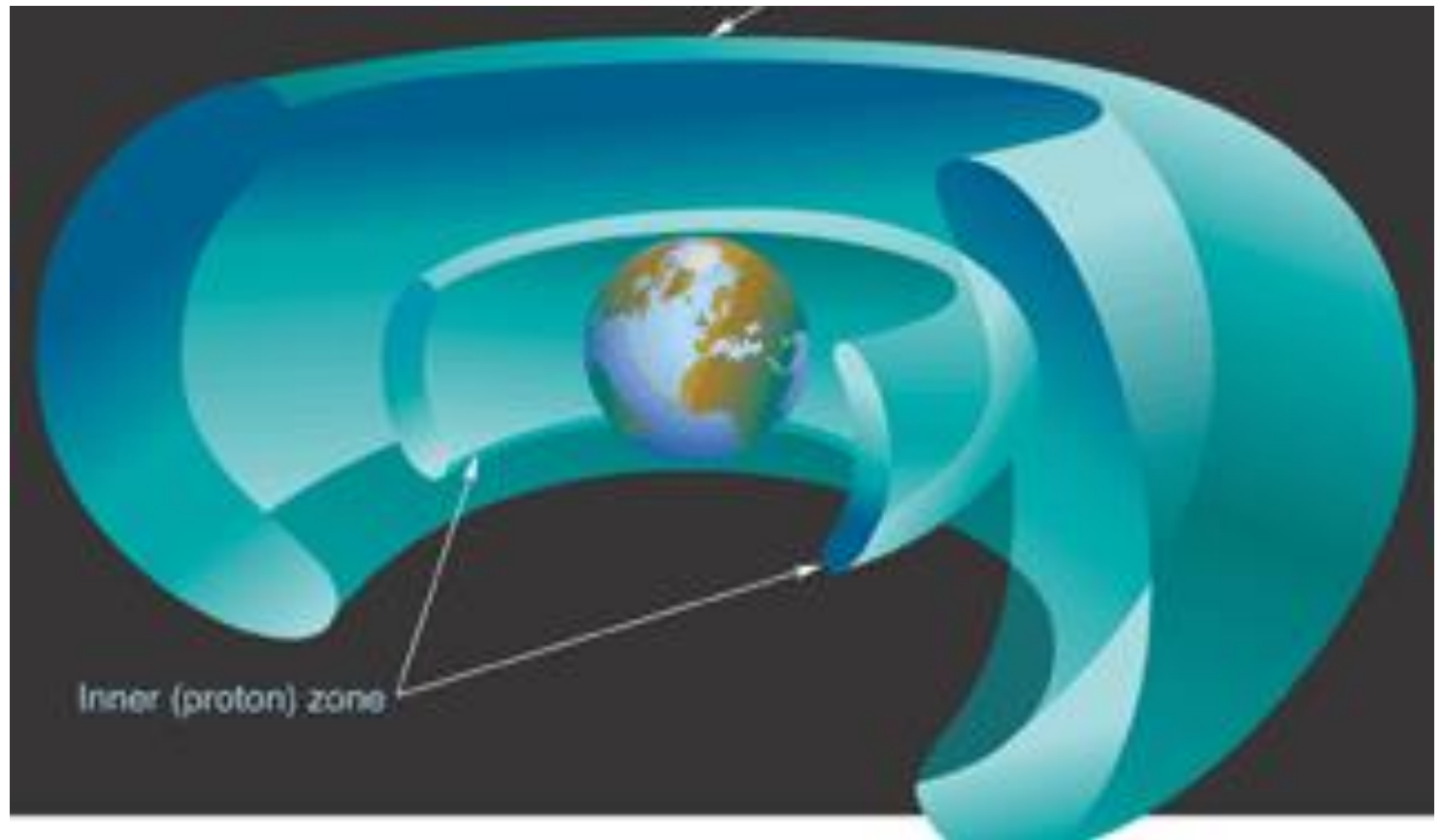
当来自外层空间的大量粒子(宇宙射线)进入地球磁场范围, 粒子将绕地磁感应线作螺旋运动, 因为在近两极处地磁场增强, 作螺旋运动的粒子将被折回, 结果粒子在沿磁感应线的区域内来回振荡, 形成一个带电粒子区域, 称范艾伦辐射带, 此带相对地球作对称分布。

范艾伦辐射带的形成示意图



1958年人造卫星的探测发现, 范艾伦辐射带有两层, 内层在距地面800-4000Km处, 外层在60000Km处。

包围地球
外围的范
艾伦辐射
带



在靠近两极的一些国家和地区,如美国的阿拉斯加,亚洲的西伯利亚,欧洲的挪威、瑞典和芬兰等国家,夜晚的天空会出现五颜六色绚丽多彩的发光现象,有的呈弧形,有的呈弥漫状的斑块,有的呈大而均匀的发光面等它们被统称做极光,发生在北极的称北极光,发生在南极的称南极光。

北极光的产生是由于有时太阳黑子活动,太阳喷射的**高能带电粒子流形成的太阳风**,在地磁感应线的引导下在地球北极附近进入大气层时将使大气激发,然后辐射发光,从而出现美丽的北极光。

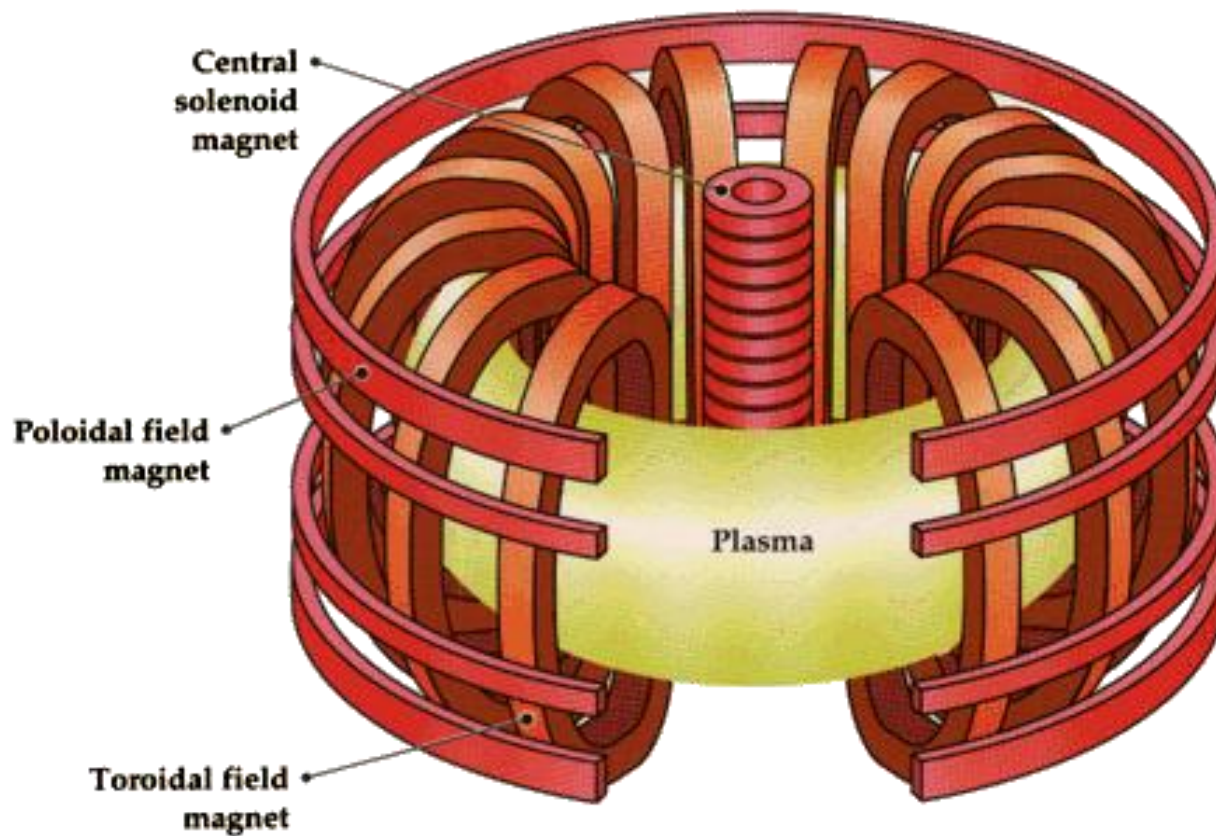
美丽的 极光



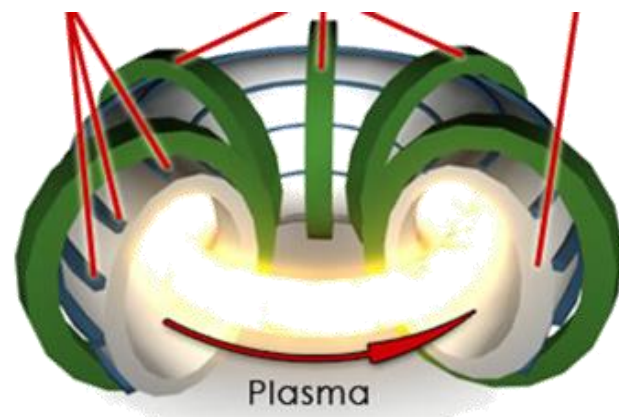
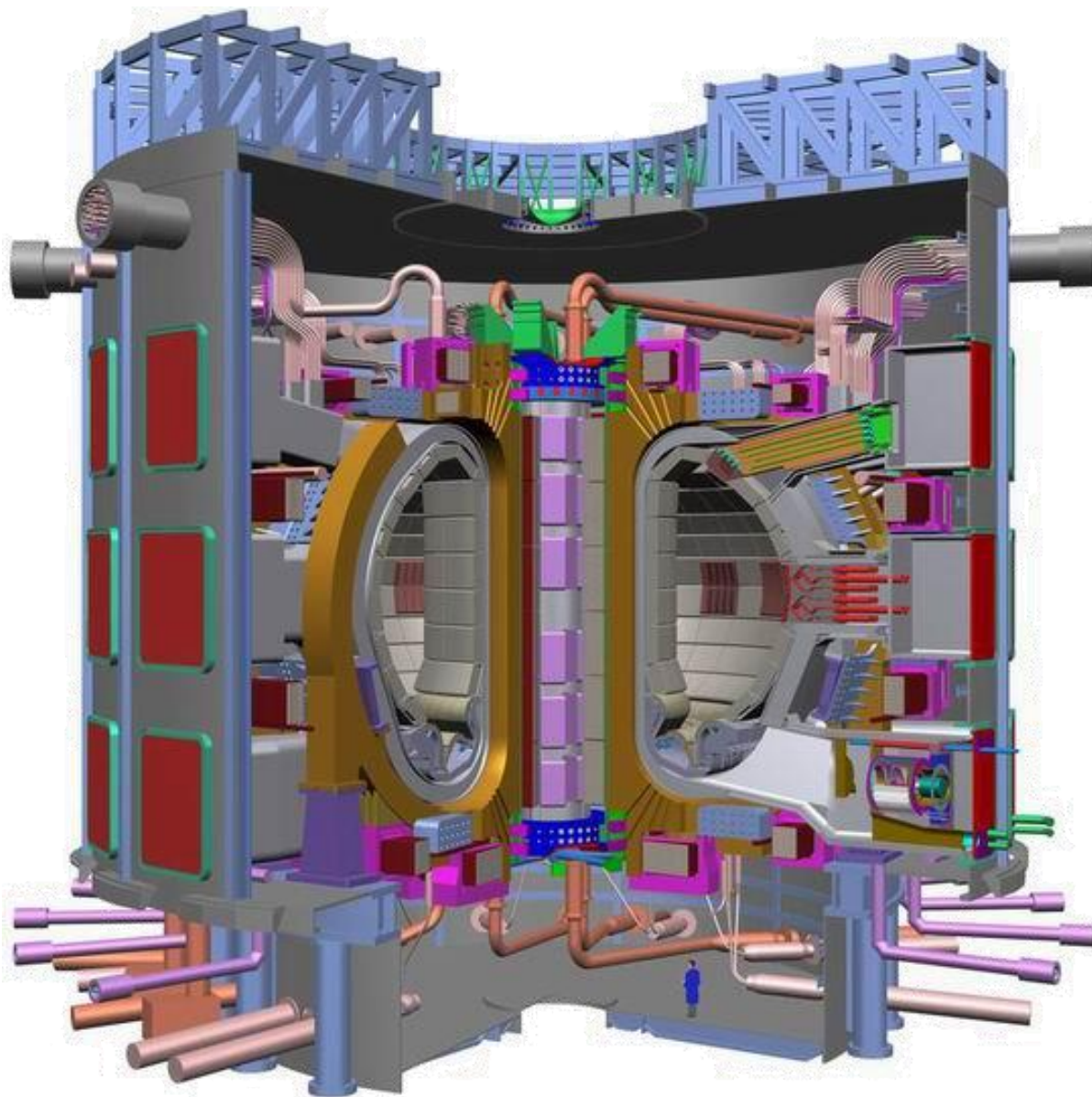
等离子体——物质的第四态

等离子是由大量的自由带电粒子以及部分中性粒子所组成的体系。宏观上一般呈电中性，导电率较高，其运动形式主要受电磁力支配。例如，在地球以外，围绕地球的电离层、太阳及其它恒星等是天然的等离子体，而日光灯管中发光的电离气体和实验室中高温电离气体都是人造等离子体。

在研究受控热核反应实验中，常常需要把等离子体约束在一定空间区域，等离子体温度高达几千万甚至几亿摄氏度，固体材料在这样的高温下都将被汽化，因此，可以利用上述带电粒子在非均匀磁场运动的特点，将等离子体约束在一定的空间。下面我们将介绍一种等离子体磁约束装置——托卡马克。

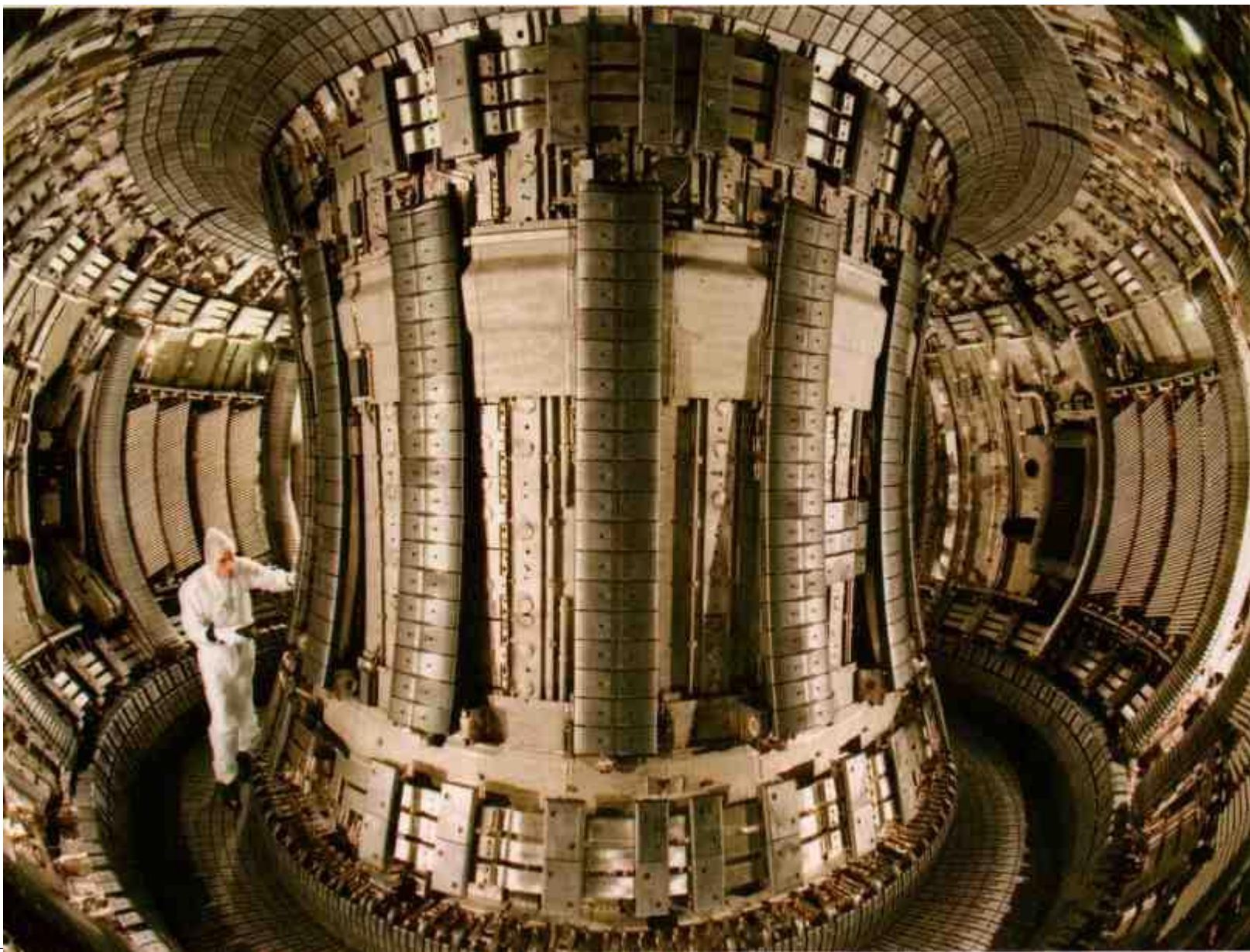


托卡马克装置原理示意图



托卡马克装置
剖面结构和工作
时内部状态
(上) 示意图

托卡马克装置环型容器内部实景



二、带电粒子在电磁场中的运动和应用

带有电荷量 q 的粒子在静电场 \vec{E} 和磁场 \vec{B} 中以速度 \vec{v} 运动时受到的作用力将是：

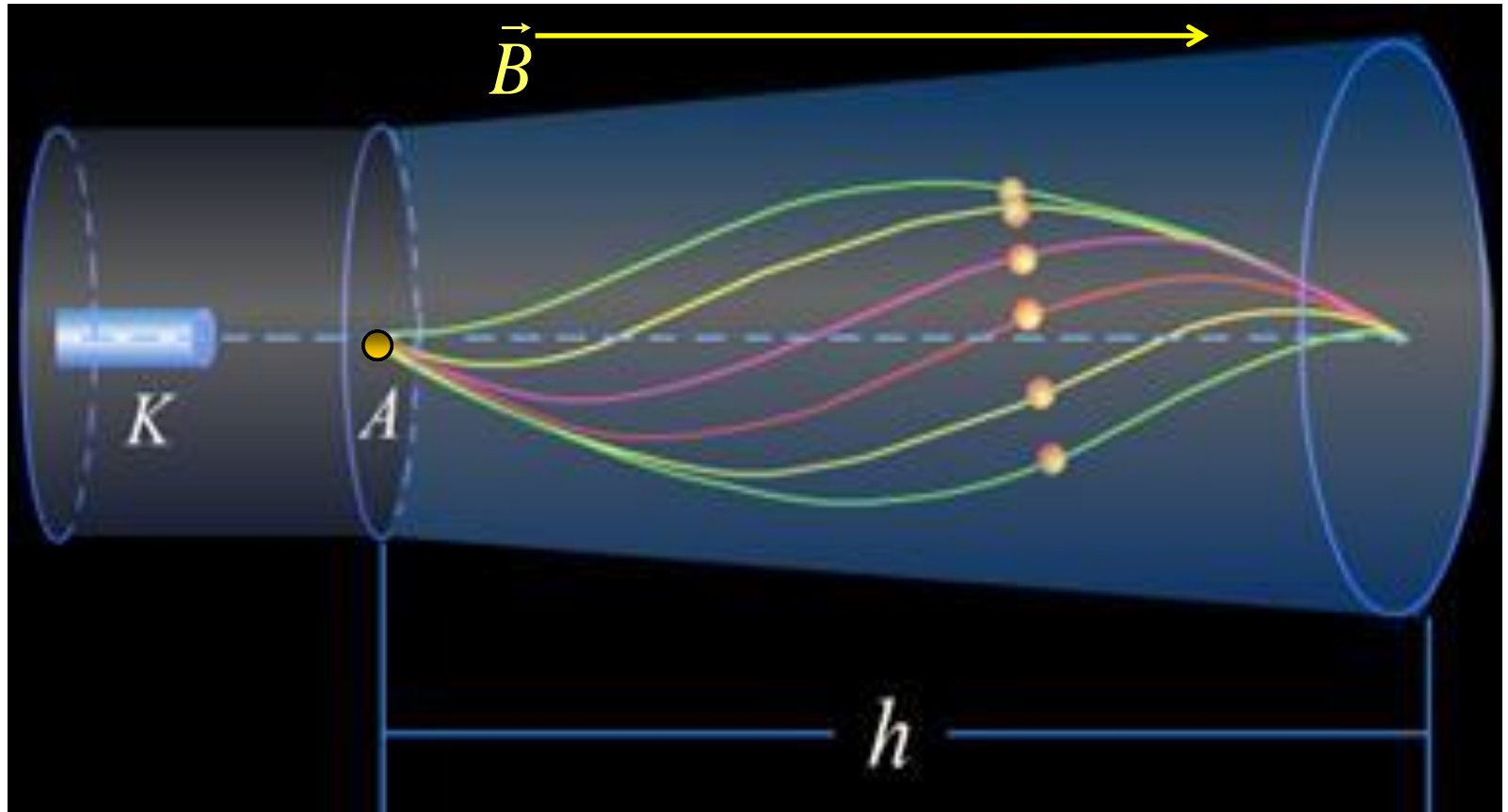
$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

洛伦兹
关系式

1. 磁聚焦

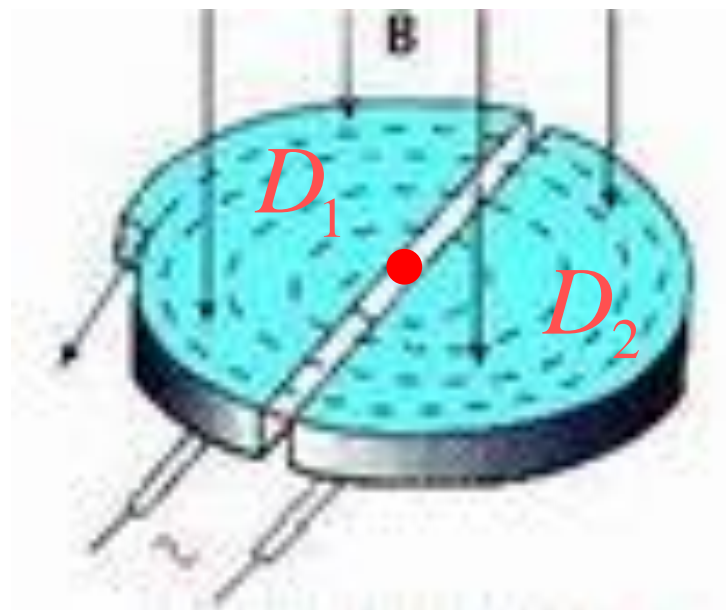
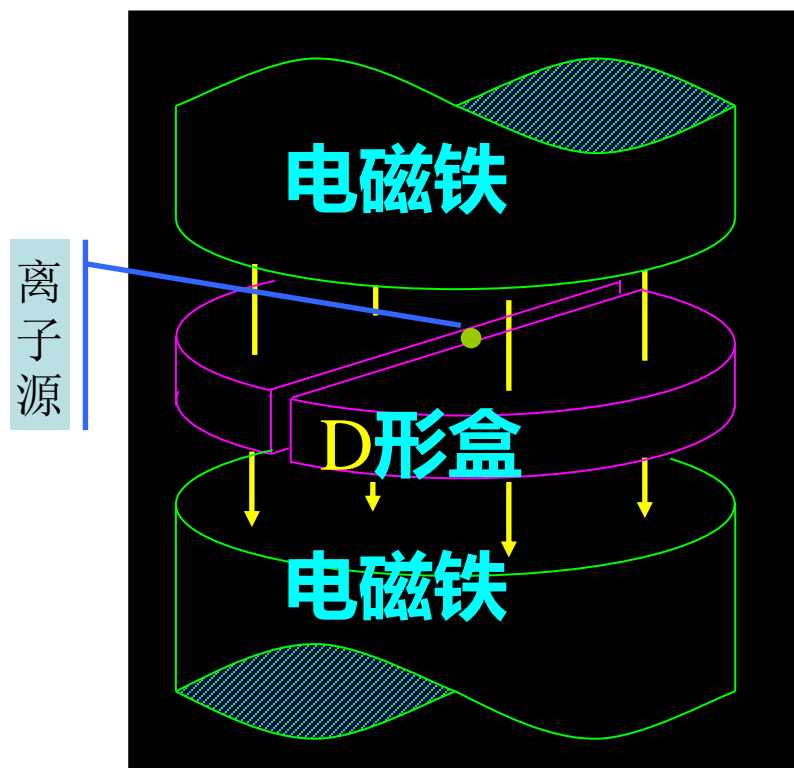
一束速度大小相近，方向与磁感应强度夹角很小的带电粒子流从同一点出发，由于平行磁场速度分量基本相等，因而螺距基本相等，这样，各带电粒子绕行一周后将汇聚于一点，类似于光学透镜的光聚焦现象，称**磁聚焦**。广泛应用于电真空器件中对电子的聚焦。

显象管中电子的磁聚焦装置示意图



2. 回旋加速器

回旋加速器是核物理、高能物理实验中用来获得高能带电粒子的设备，下图为其结构示意图。



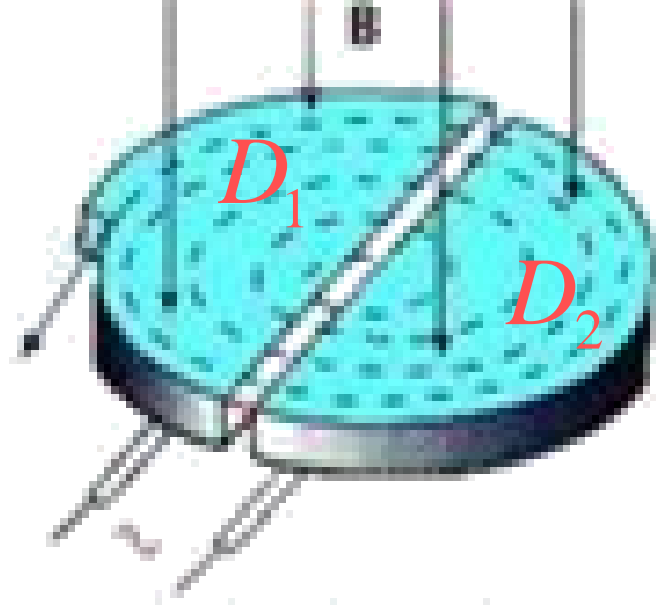
(1) 装置

电磁铁 产生强大磁场

D形真空盒

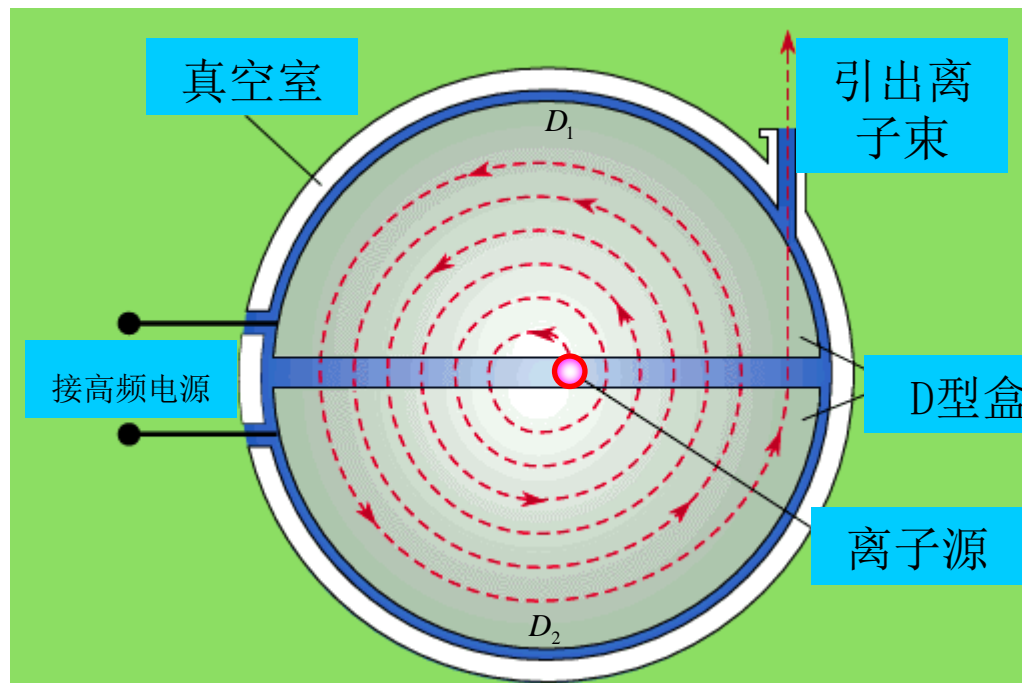
放在真空室内，接高频交变电压，使粒子旋转加速，

带电粒子源产生带电粒子



(2) 原理

离子源产生的带电粒子经电场加速进入 D_1 ，磁场使粒子在盒内做圆周运动，



高频交变电源使D型盒间缝隙处产生高频交变电场使带电粒子每经过缝隙处就被加速一次。带电粒子在盒内运动时只受磁场作用速率不变。在一半盒内运动时间为

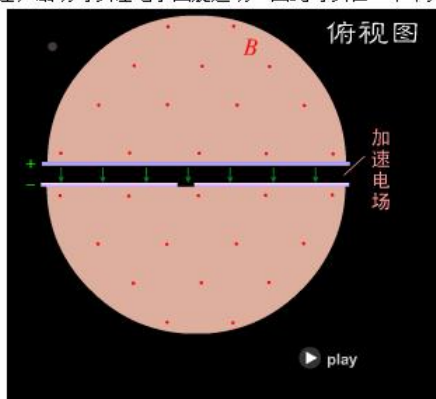
$$t = \frac{\pi R}{v} = \frac{m\pi}{qB} \quad v = \frac{q}{m} BR \quad E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2}{2m} B^2 R^2$$

该时间与运动半径无关，只要高频电源频率和带电粒子在盒内旋转频率一样，就可保证其每次经过缝隙处被加速。

在粒子被加速到近光速时，考虑相对论效应，粒子在盒内运动时间变长，旋转频率下降，此时使高频电场频率与带电粒子在盒内旋转频率同步变化，就仍可保证粒子被加速，这种回旋加速器叫同步回旋加速器。

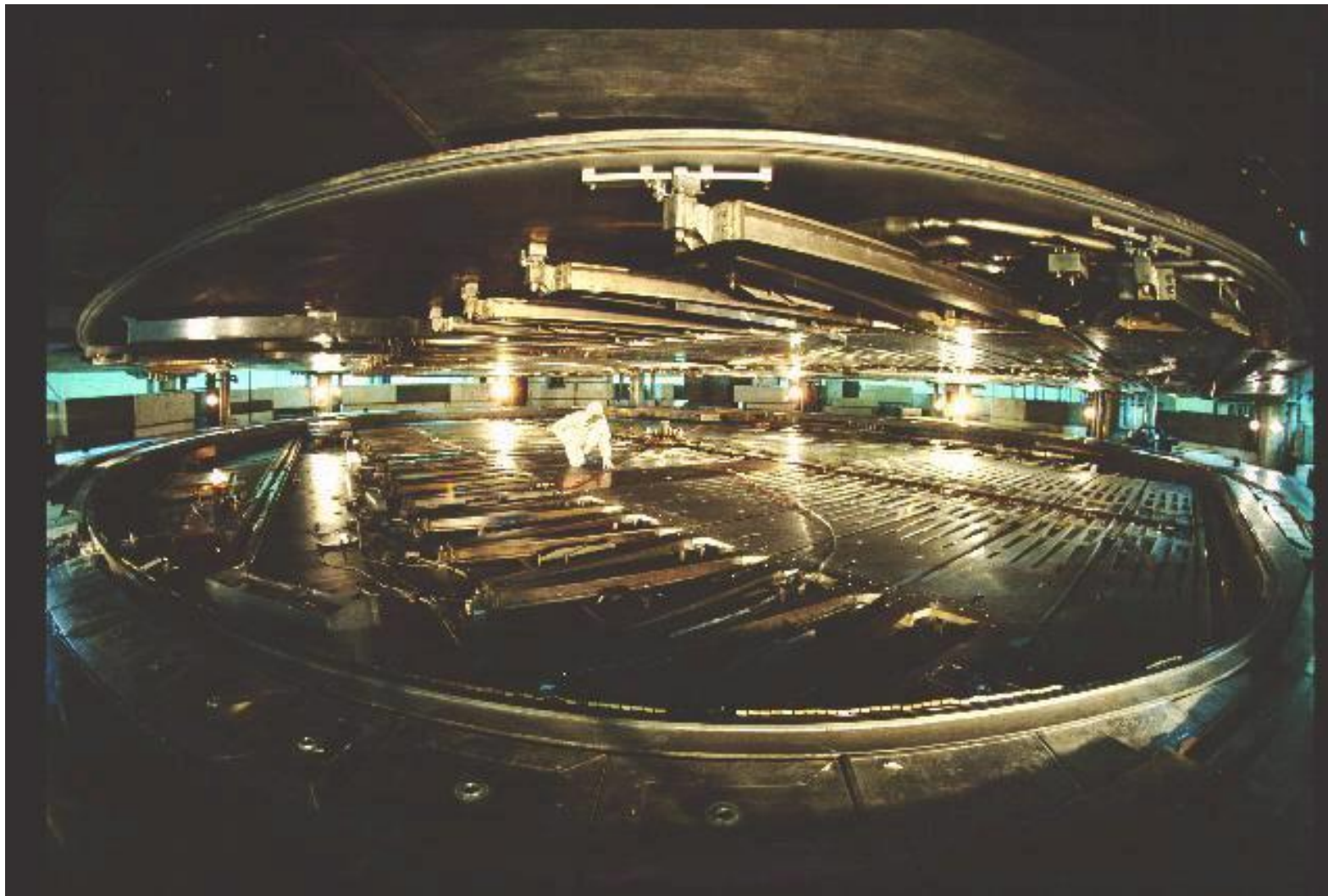
电子回旋加速器

- 电场可以将电子加速，磁场可以让电子回旋运动。因此可以在一个不大的空间内实现对电子的加速。这就是电子回旋加速器，它的结构和工作原理如下图所示。



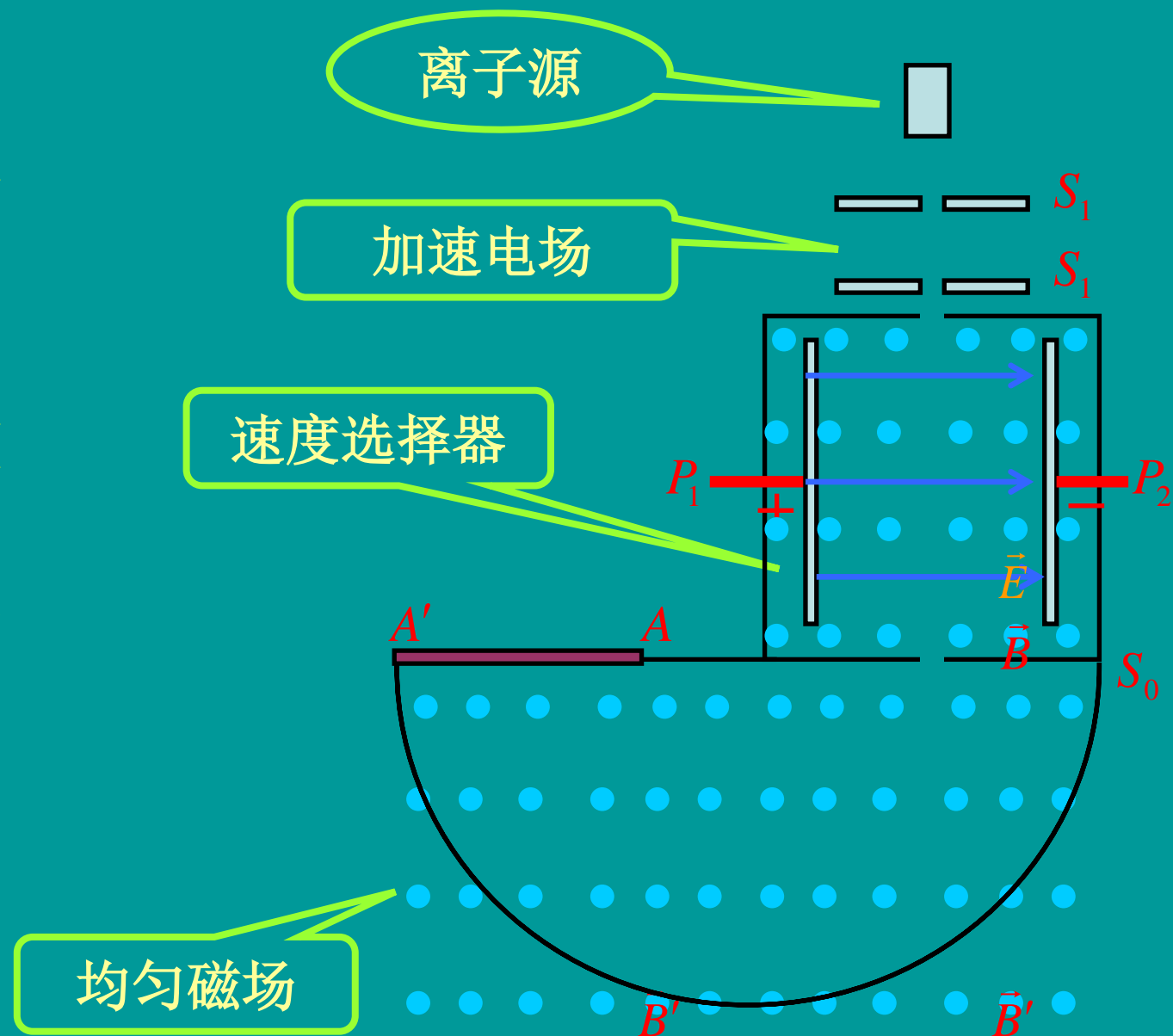
两个D型盒中是均匀磁场，在两个D型盒之间的两个电极上加有交变电压。由于电子在加速的过程中，在磁场中的回旋周期与速度无关，只要保持每经过半个周期电场改变一次方向，就可以将电子加速到很大的值。

回旋加速器一般用来加速质量较大的带电粒子。
下图为世界最大的回旋加速器内部情况。



3. 质谱仪

倍恩勃立奇质谱仪
结构示意图



质谱仪是利用电场和磁场的各种组合达到把电荷量相同而质量不同的带电粒子分开的目的，是分析同位素的重要仪器，也是测定离子比荷的重要仪器。

从离子源所产生的离子经过狭缝 S_1 与 S_2 之间的加速电场后，进入 P_1 与 P_2 两板之间的狭缝，在 P_1 和 P_2 两板之间有一均匀电场 E ，同时还有垂直向外的均匀磁场 B 。带电粒子同时受到方向相反的电场力和磁场力的作用，显然，只有所受的这两种力大小相等的粒子才能通过两板间狭缝，否则，就落在两板上而不能通过。这一装置叫速度选择器。

速度选择器原理

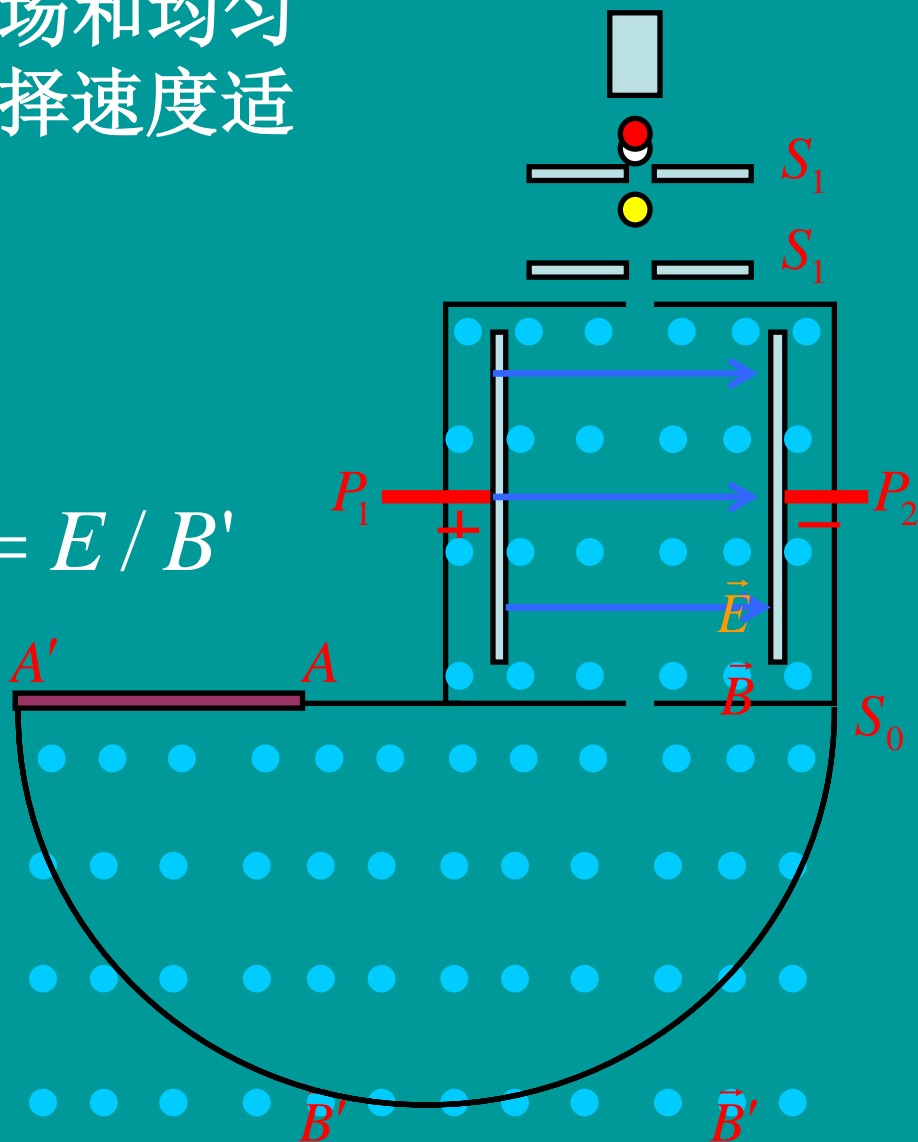
首先用互相垂直的均匀电场和均匀磁场对带电粒子联合作用, 选择速度适宜的带电粒子。

电场力 $\vec{F}_e = q\vec{E}$

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

$$F_e = F_m; qE = qvB' \Rightarrow v = E / B'$$

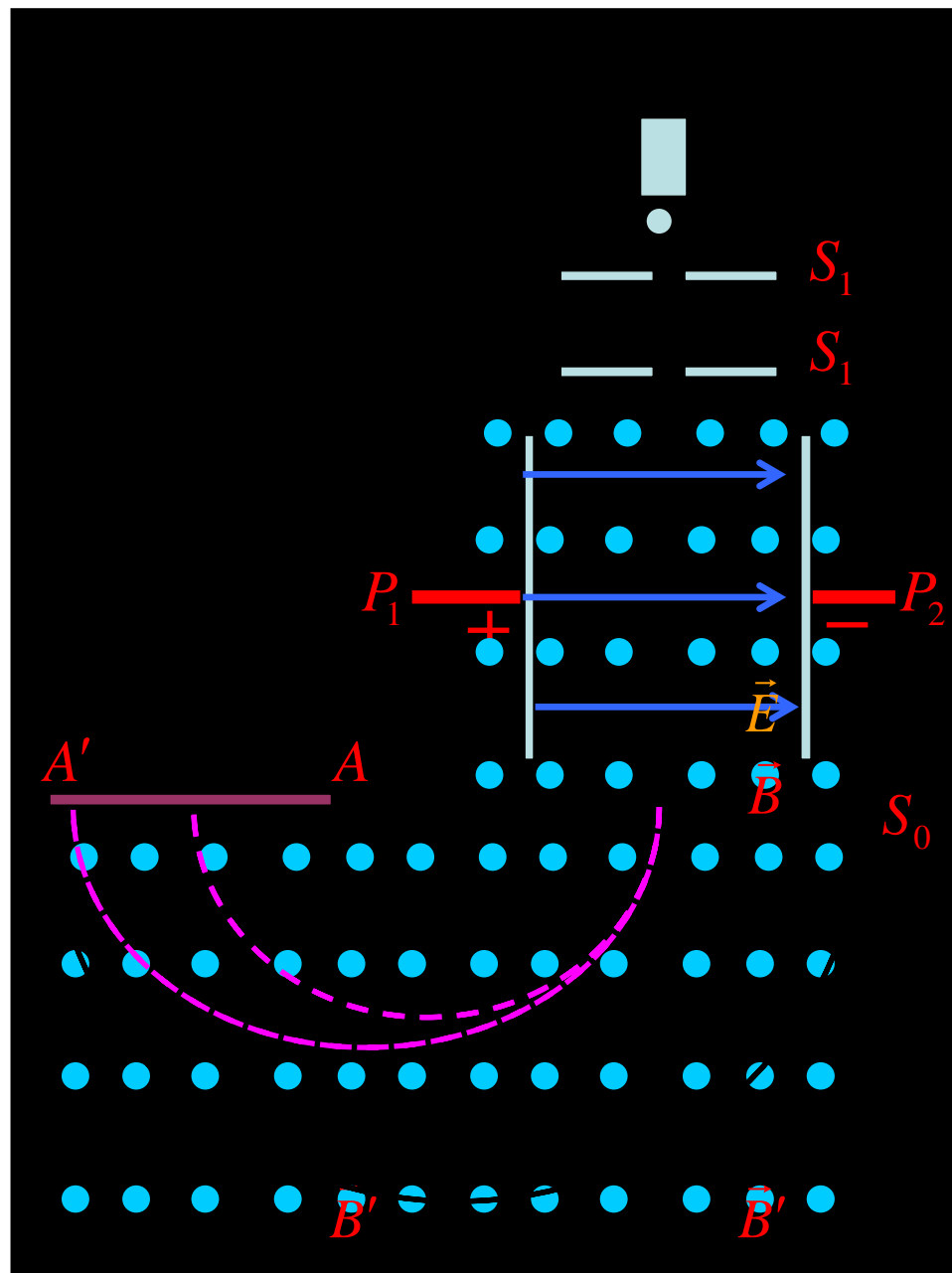
当离子进入两板之间, 它们将受到电场力和磁场力的作用, 两力的方向相反, 只有速率等于 E/B' 的离子, 才能无偏转地通过两板间的狭缝沿直线运动。



从 S_0 射出的离子进入磁感应强度为 B 的磁场后,受磁场力的作用将作圆周运动,半径为

$$R = \frac{mE}{QB'B}$$

上式中,除质量外 m ,其余均为定值,半径 R 与质量 m 成正比,即同位素离子在磁场中作半径不同的圆周运动,这些离子将按照质量的不同而分别射到照相底片 AA' 上的不同位置,形成若干线谱状的细条,每一细线条代表不同的质量。



依据离子在照相底片上的位置可算出这些离子的相应质量。所以这种仪器叫质谱仪。可精确测同位素相对原子量。

带电粒子电荷量与质量之比称做带电粒子的比荷，是反映基本粒子特征的重要物理量。质谱仪可测定不同速度下的比荷

$$\frac{q}{m} = \frac{E}{RB'B}$$

实验发现，高速情况下同一粒子比荷有所变化，这是由于带电粒子质量按相对论关系变化引起的，与电荷无关。这就验证了带电粒子的运动不改变其电荷量。

4. 霍耳 (E. C. Hall) 效应

在一个通有电流的导体板上，**垂直于**板面施加一磁场，则平行磁场的两面出现一个电势差，这一现象是1879年美国物理学家霍耳发现的，称为霍耳效应。该电势差称为**霍耳电势差**。

由于这种效应对一般材料来讲很不明显，因而长期未得到实际应用，**20世纪60年代**以来，人们先后发现或制成了**N型锗**，**锑化铟**，**磷砷化铟**等霍尔系数很高的半导体材料，因此制成了灵敏度很高的霍尔元件。

这种效应对金属导体并不明显，而对半导体却非常明显

来看看动画吧

霍尔效应本质：

是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力作用而引起的偏转。

当带电粒子被约束在固体材料中，这种偏转就导致在垂直电流和磁场的方向产生正负电荷的积聚，从而形成附加的电场（匀强）。

实验指出，在磁场不太强时，霍耳电势差 U 与电流强度 I 和磁感应强度 B 成正比，与板的宽 d 成反比。

$$U = V_1 - V_2 = R_H \frac{BI}{d}$$

图见P246

R_H 称为霍耳系数，仅与材料有关，正负决定于载流子的正负性质

原理

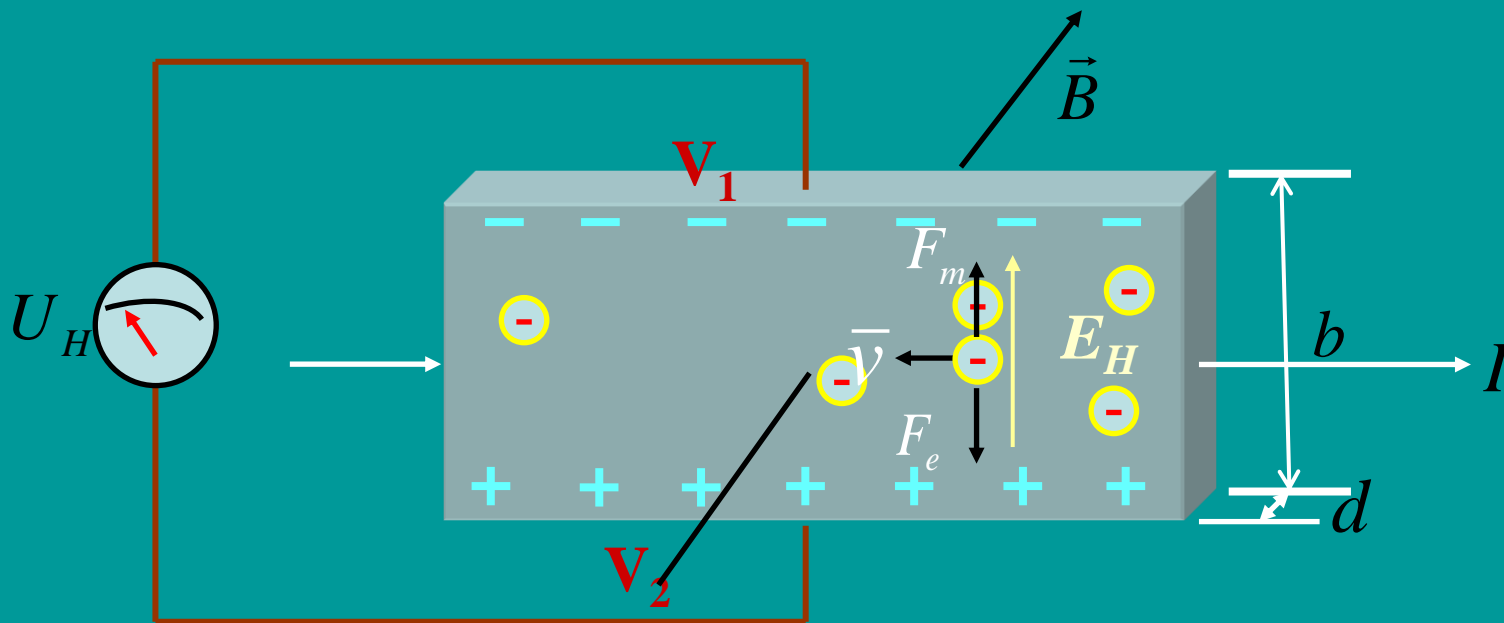
霍尔效应是由于导体中的载流子在磁场中受到洛伦兹力的作用发生横向漂移的结果。下面以金属导体为例，来说明其原理

其中载流子是电子，运动方向与电流流向相反，如果在垂直于电流方向加一均匀磁场，这些自由电子受洛仑兹力的作用，大小为

$$F_m = e\bar{v}B$$

\bar{v} 电子定向运动的平均速度

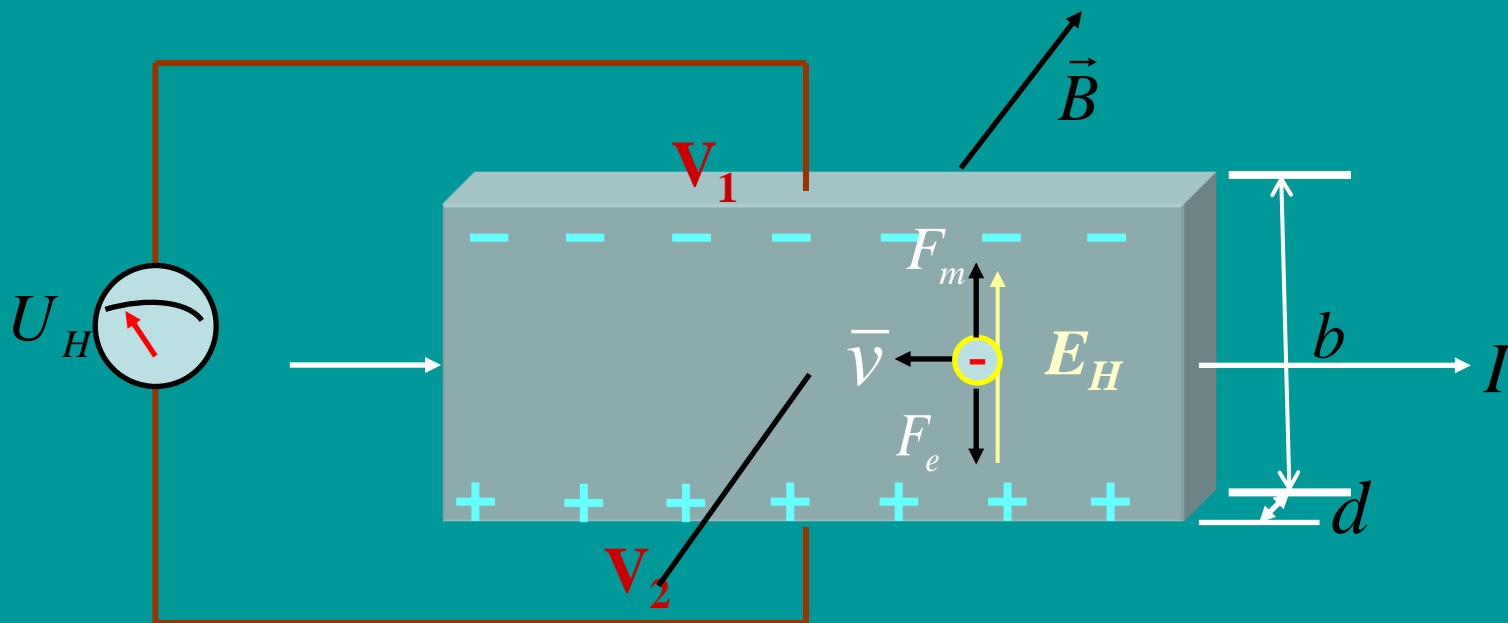
e 电子电荷量的绝对值



见书P246图11-35

洛伦兹力向上，使电子向上漂移，使得金属薄片上侧有多余负电荷积累，下侧缺少负电荷，有多余正电荷积累，结果在导体内形成**附加电场，称霍尔电场**。此电场给电子电场力与洛伦兹力反向，大小为 $F_e = eE_H$

当 $F_e = F_m$ 时不再有漂移，载流子正常移动。



当 $F_e = F_H$ 时 $eE_H = e\bar{v}B$

所以此时霍尔电场为 $E_H = \bar{v}B$

所以霍尔电势差为 $V_1 - V_2 = -E_H b = -\bar{v}Bb$

导体中单位体积内的带电粒子数为 n ，则通过导体电流

$I = nqbd\bar{v}$, $q = e$ 代入上式得

$$U = V_1 - V_2 = -\frac{IB}{ned}$$

又 $U = V_2 - V_1 = R_H \frac{BI}{d}$

霍尔系数为 $R_H = -\frac{1}{ne}$

若载流子为带正电的 q 则霍尔系数为 $R_H = \frac{1}{nq}$

霍尔效应的应用

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

1、确定半导体的类型

n 型半导体载流子为电子

p 型半导体载流子为带正电的空穴

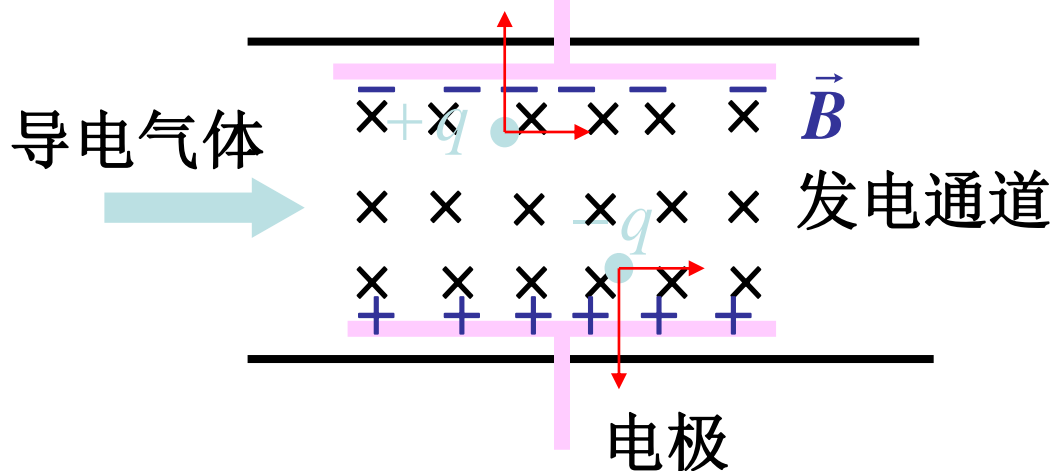
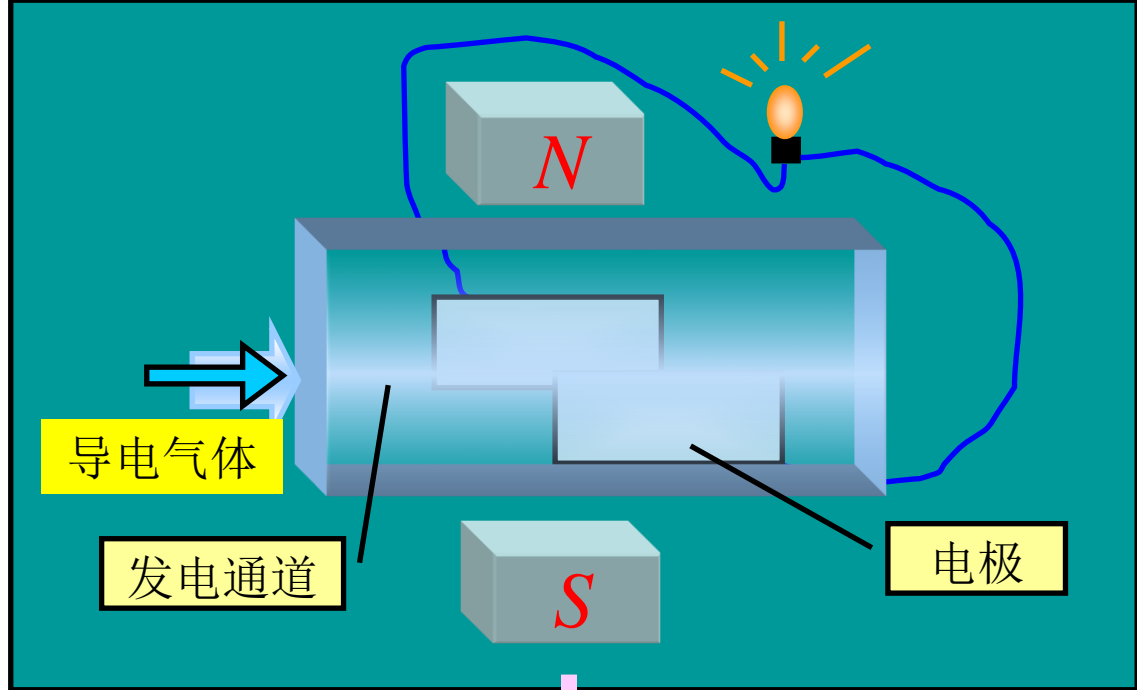
2、根据霍尔系数的大小的测定， 可以确定载流子的浓度

3、磁流体发电

霍尔效应已在测量技术、电子技术、计算技术等各个领域中得到越来越普遍的应用。

磁流体发电

使高温等离子体（导电流体）以 1000ms^{-1} 的高速进入发电通道（发电通道上下两面有磁极），由于洛仑兹力作用，结果在发电通道两侧的电极上产生电势差。不断提供高温高速的等离子体，便能在电极上连续输出电能。



磁流体发电原理图

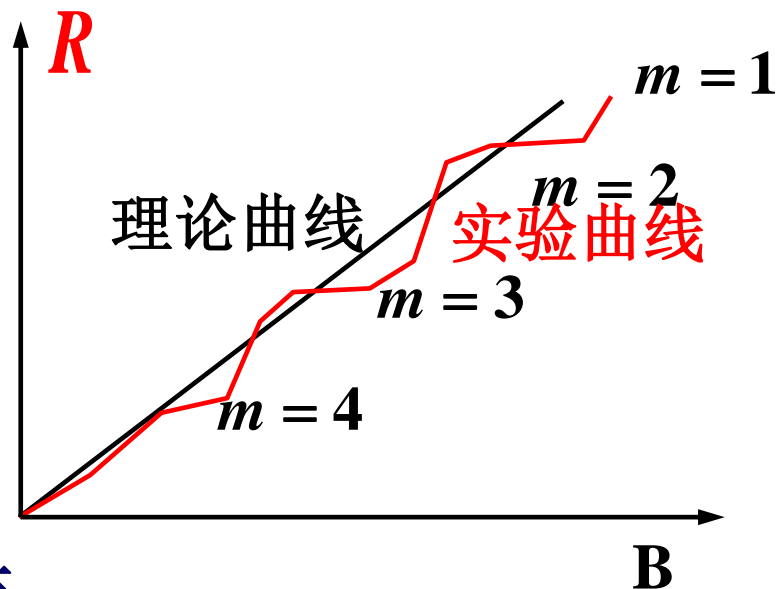
物理知识

量子霍尔效应

克里青：半导体在低温强磁场 $m=1、2、3、\dots$

崔琦、施特默：更强磁场下

$$m = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5} \dots$$



1985年
诺贝尔物理奖

1998年
诺贝尔物理奖

