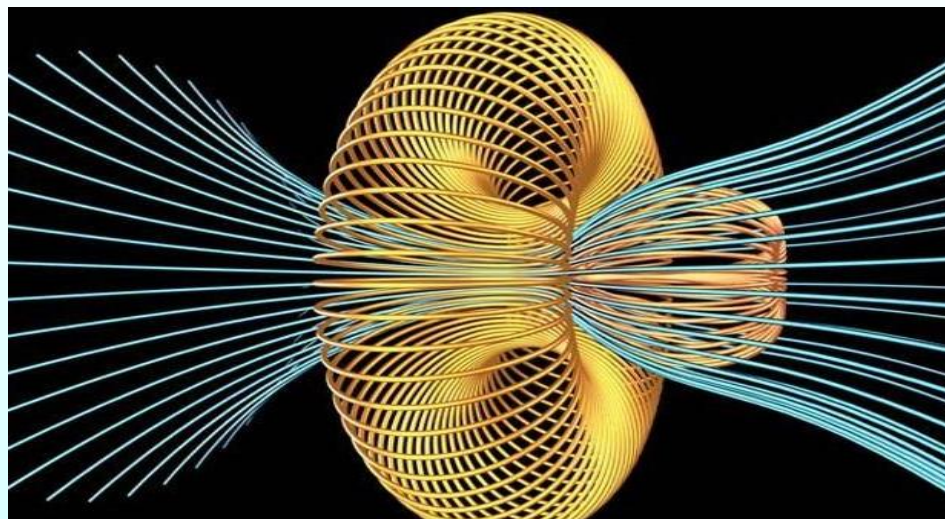
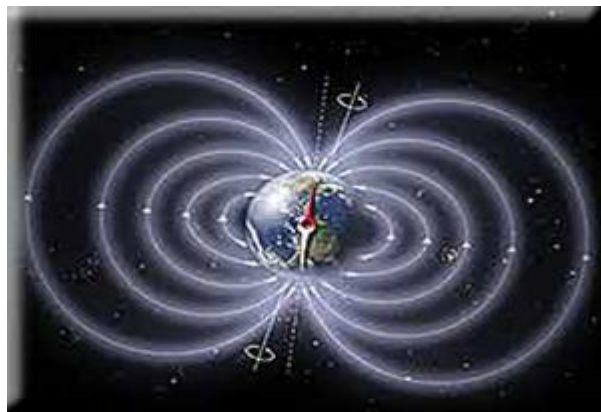


# 第八章

## 恒定电流的磁场



# 引入新课



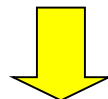
## 回顾

静止电荷



静电场

运动电荷



稳恒电流



稳恒电场

稳恒磁场

# 主要内容

- 恒定电流
- 磁感应强度
- 毕奥—萨伐尔定律
- 真空中磁场的高斯定理
- 安培环路定理
- 电流或运动电荷在外磁场中的受力  
——安培力和洛仑兹力

## § 8-1 恒定电流

### 一、电流 电流密度

**电流：** 电荷的定向运动。

**电流形成条件** (导体内)：

导体内有可以自由运动的电荷；

导体内要维持一个电场。

**载流子：** 电荷的携带者，

如：自由电子（金属导体）、空穴（半导体）；

正负离子（电解液）

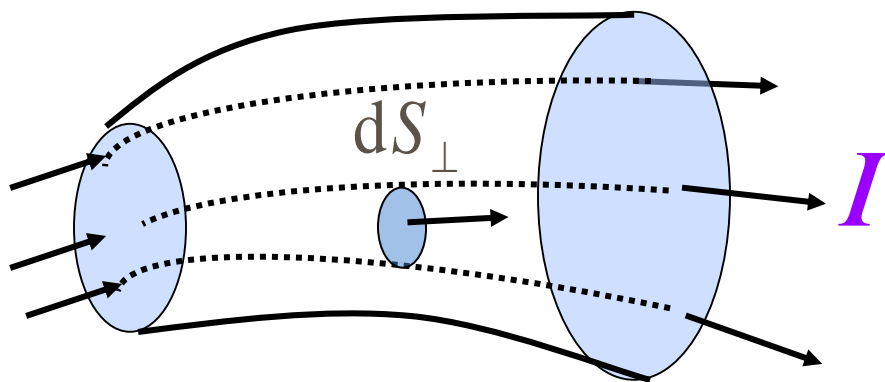
**电流强度：**单位时间通过导体某一横截面的电量。

$$I = \frac{dq}{dt}$$

单位： A (安培)

方向：正电荷运动的方向，有方向的标量。

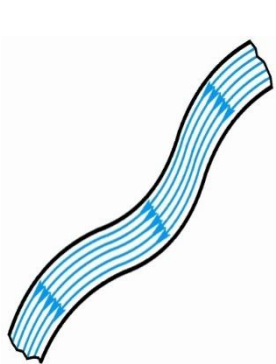
大小：从垂直于电荷运动方向的单位截面上流过的电荷量。



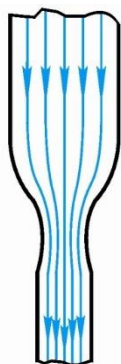
**恒定电流：**电流的大小和方向不随时间而变化。



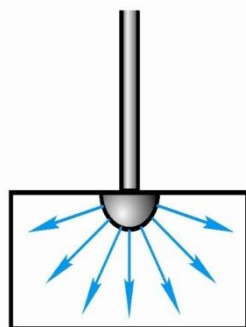
# 几种典型的电流分布



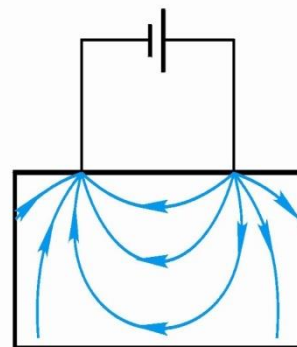
粗细均匀的  
金属导体



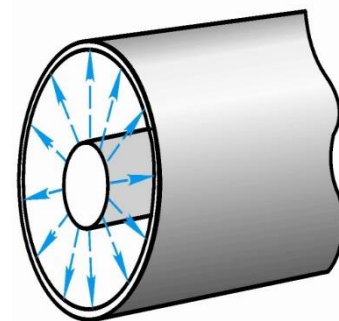
粗细不均匀  
的金属导线



半球形接地电  
极附近的电流



电阻法勘探矿  
藏时的电流



同轴电缆中的  
漏电流

可见，导体中不同部分电流分布不同，

电流强度  $I$  不能细致反映导体中各点电流分布。

**电流密度** —— 精确描述导体中电流分布情况，  
是空间位置的矢量函数。

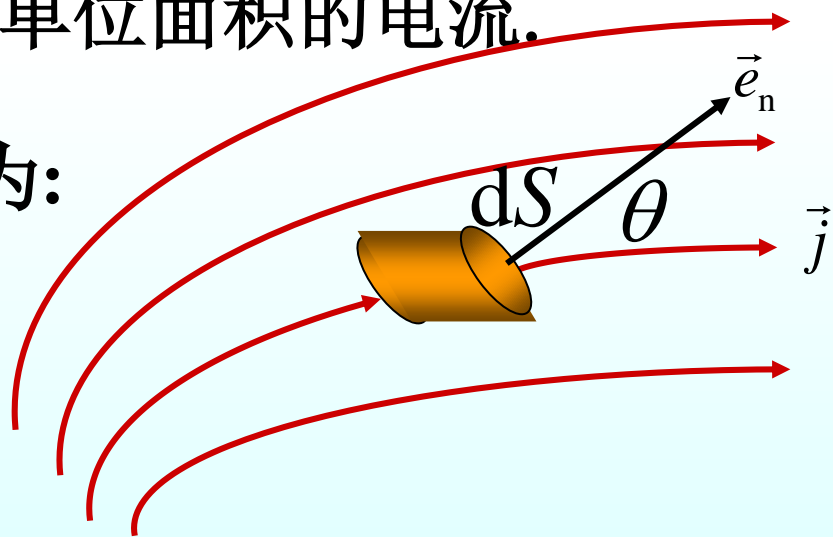
电流密度矢量定义： $j = \frac{dI}{dS}$  单位：A / m<sup>2</sup>

**方向**：与该点正电荷运动方向一致。

**大小**：等于垂直于电流方向的单位面积的电流。

- 电流强度与电流密度的关系为：

$$I = \iint_S \vec{j} \cdot \vec{e}_n dS = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$



闭合电路中电流如何形成的呢？



## 二、电源的电动势

**电源**：提供非静电力的装置，或称电泵。

**电源外部：**

提供恒定电场，静电力使正电荷从高电势端移向低电势端。

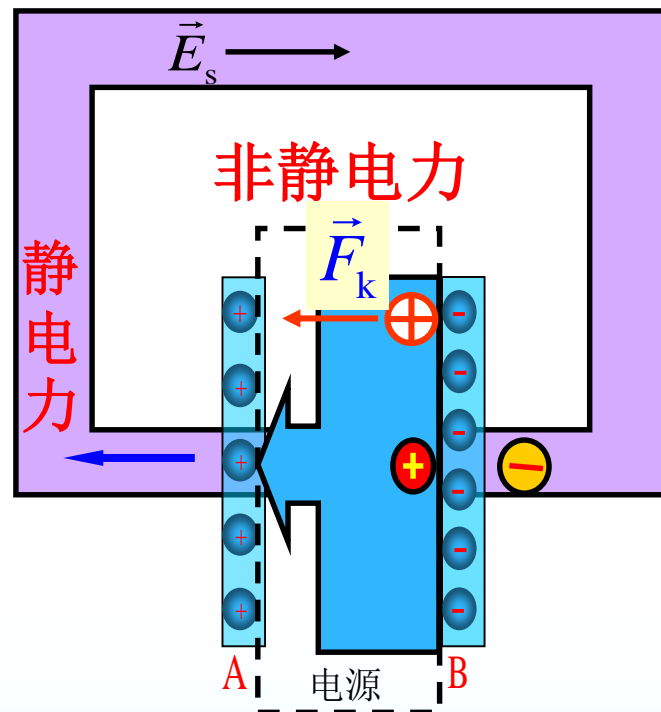
**电源内部：**

“非静电力”使正电荷从低电势端（电源负极）再回到高电势端（电源正极），形成恒定电流。

**电动势**： $\mathcal{E}$  等于将单位正电荷从电源负极沿内电路移到正极过程中非静电场力做的功

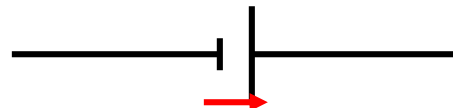
$$\mathcal{E} = \frac{dA}{dq}$$

单位：J / C，即V



# 说明:

- 电动势反映电源做功能力，与外电路无关，是标量，方向：电源内部负极指向正极。



- 从场的观点来看:

非静电场的场强:  $\vec{E}_k = \frac{\vec{F}_k}{q}$

非静电场做功为:  $\varepsilon = \int_{-}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$  (内电路)

电源外部回路  $\vec{E}_k = 0$

- 非静电场场强沿整个闭合回路的环流等于电源电动势

$$\varepsilon = \oint \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

# 电 源



交流变频电源



干电池



蓄电池

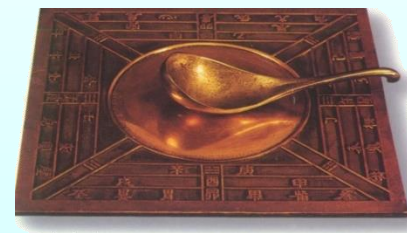
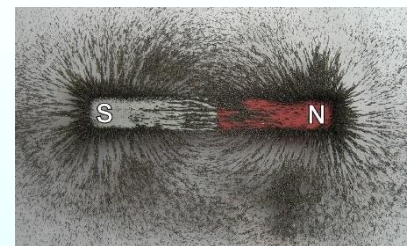


# § 8-2 磁感应强度 磁场的高斯定理

## 一、基本磁现象

### 中国在磁学方面的贡献：

- 最早发现磁现象：《管子》记载：“上有慈石者，其下有铜金。”
- 春秋战国《吕氏春秋》记载：“慈石召铁，或引之也”
- 东汉王充《论衡》记载：“司南之杓，投之于地，其柢指南”
- 十一世纪沈括《梦溪笔谈》记载：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也”  
证明了磁偏角的存在。
- 十二世纪已有关于指南针用于航海的记载



# 永磁体的性质：



- 永磁体具有**磁性**，能吸引铁,钴,镍等物质.
- 永磁体具有**磁极**，分磁北极**N**和磁南极**S**.
- 磁极间存在相互作用的磁力.

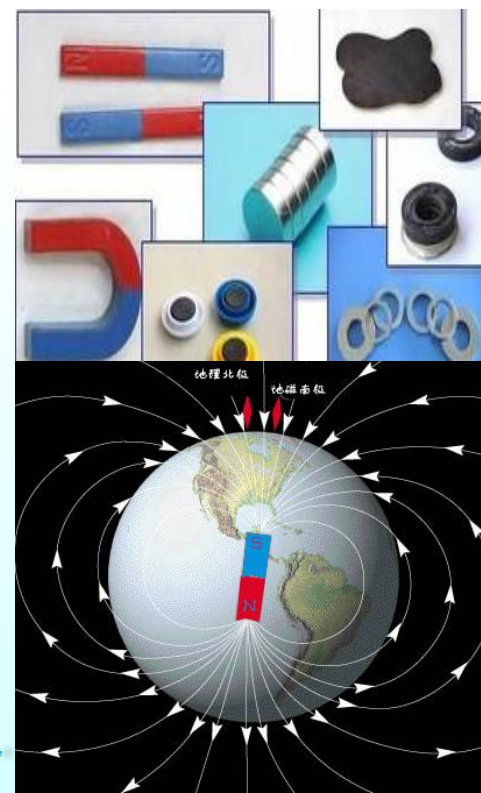


天然磁铁矿

同号磁极相排斥、异号磁极相吸引

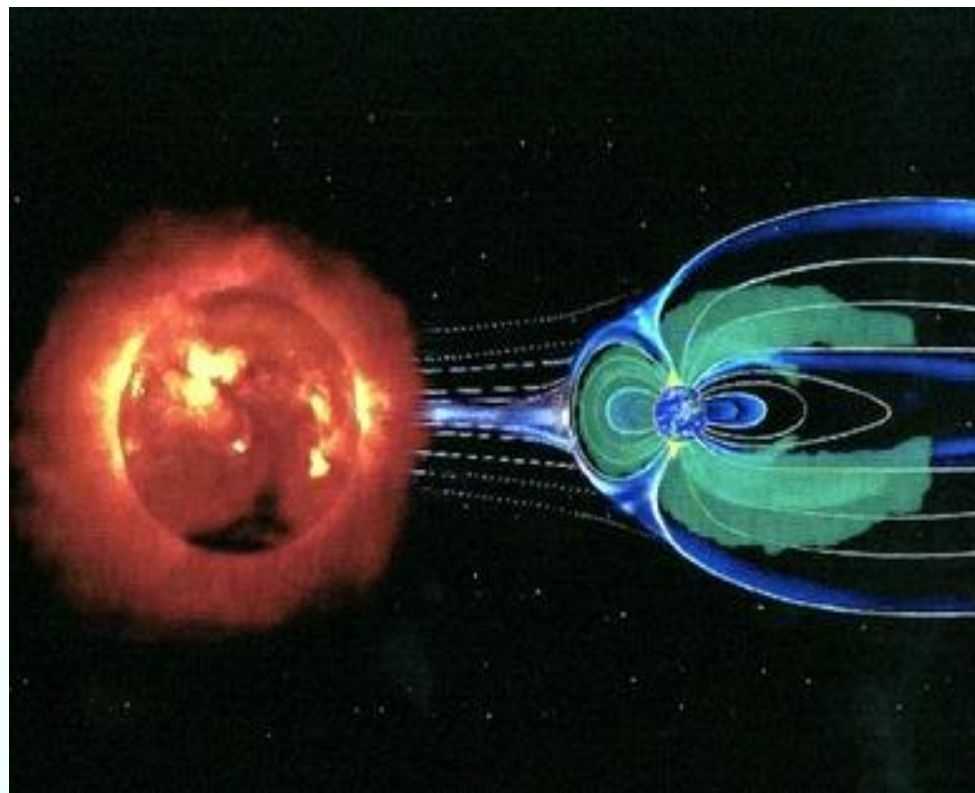
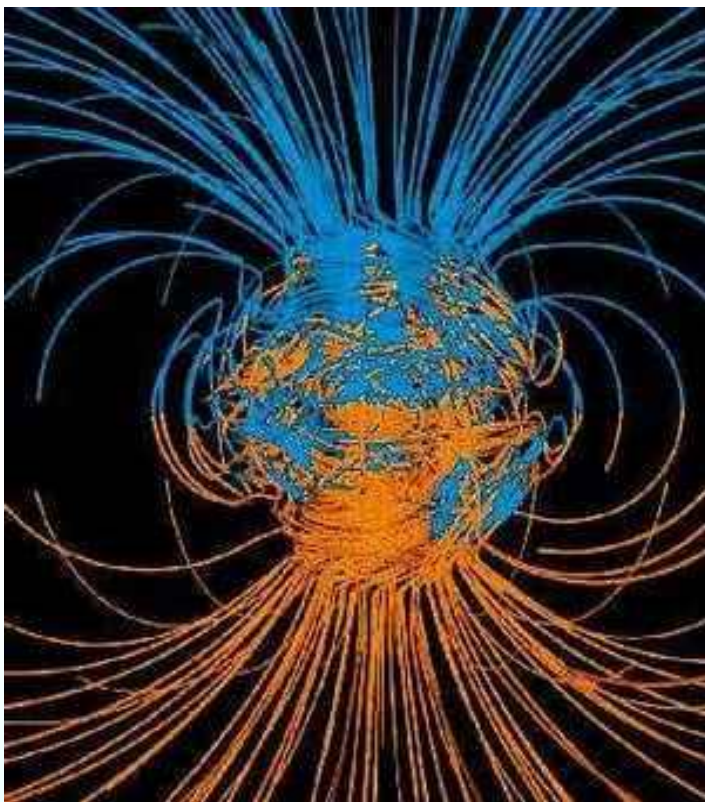
磁单极不存在

- 地球本身是个大磁体，地球磁体N、S极与地理南北极不是同一点，存在磁偏角。





# 地磁场

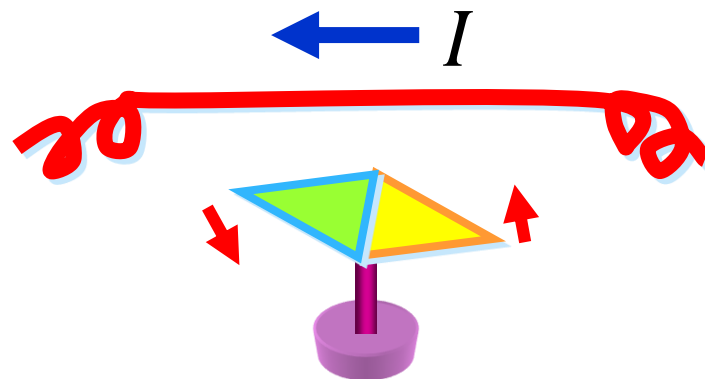


磁现象与电现象有没有联系？

静止的电荷  $\longrightarrow$  静电场

运动的电荷  $\longrightarrow$  ?

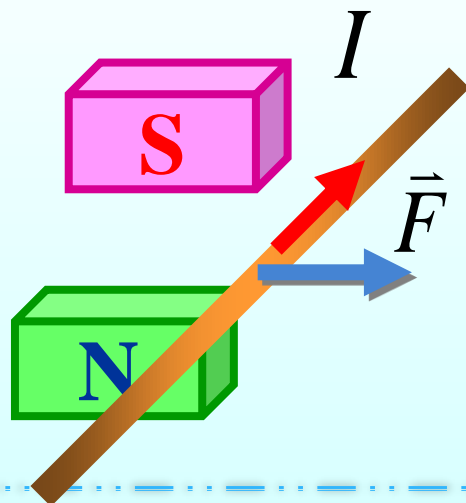
(1) 1819—1820年奥斯特  
(H.C.Oersted丹麦物理学家)  
发现载流导线附近的小磁针受  
磁力作用会发生偏转



1820年7月21日，奥斯特以拉丁文报导了60次实验的结果。

(2) 1820年后安培 (A.M.Ampere法国科学家)  
发现放在磁体附近的载流导线或线圈会受到力的  
作用而发生运动

(a) 载流导线受  
磁力作用而运动



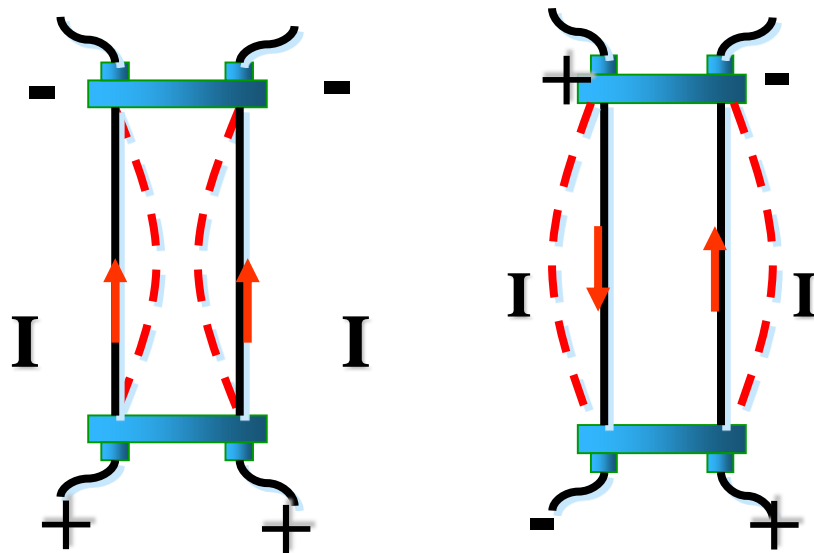
(1770–1851) 奥斯特



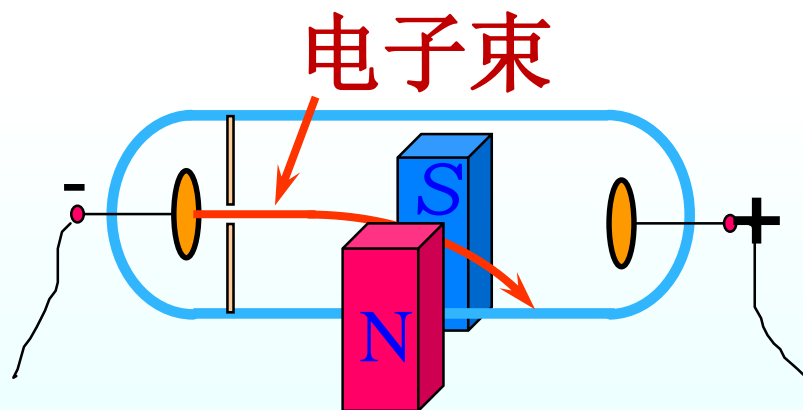
安培



(b) 两平行载流导线间存在相互作用力



(c) 电子射线在磁铁及载流线圈作用下改变方向



结论：

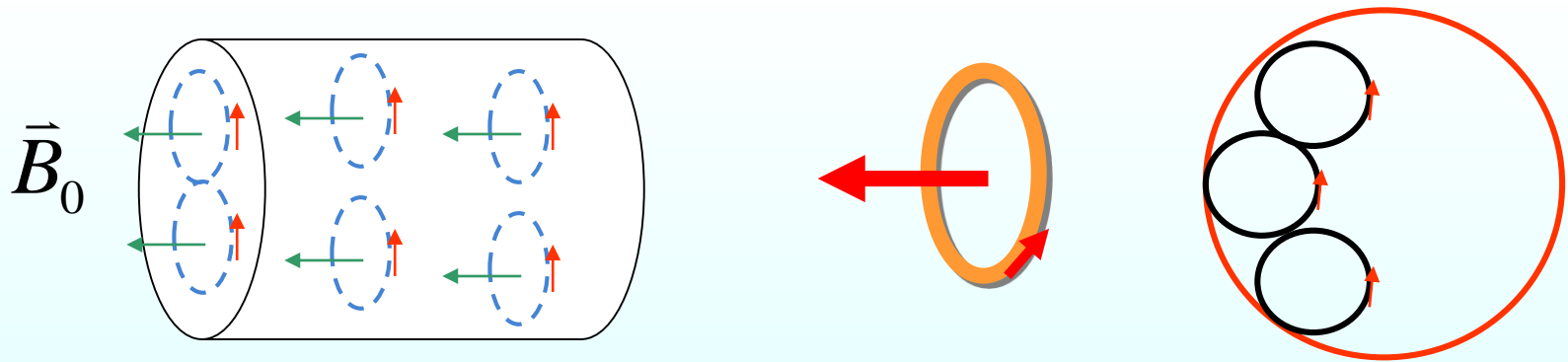
磁现象与电荷的运动有密切关系。

运动电荷既能产生磁效应，也能受磁力作用。

## 1822年，安培提出了分子电流假说：

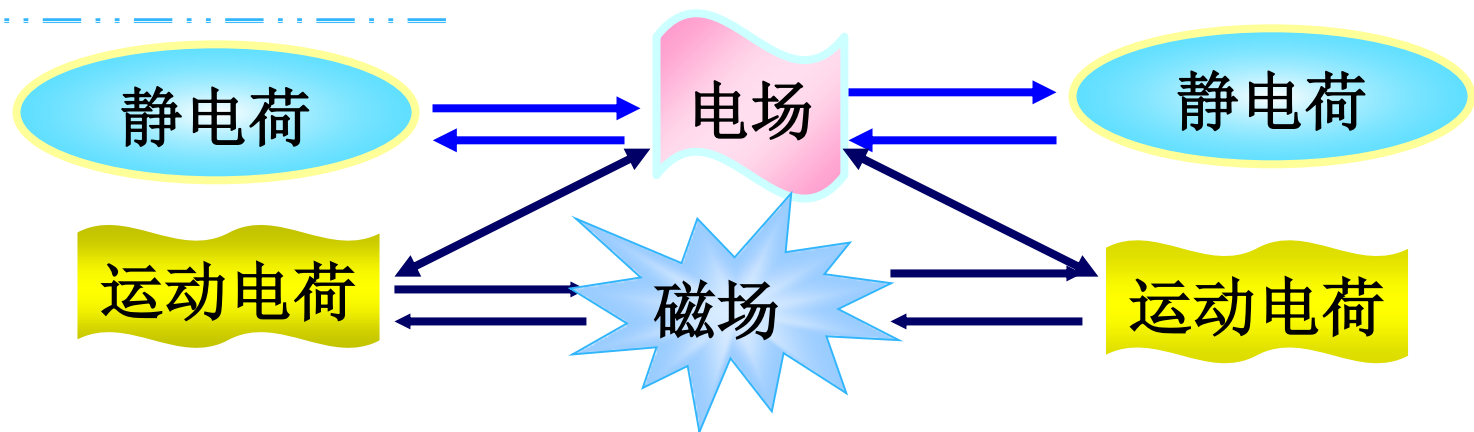
一切磁现象的根源是电流的存在，磁性物质的分子中存在着回路电流（称为“分子电流”），每个分子电流相当于一个小磁针（称为“基元磁铁”）。

物质的磁性取决于物质中分子电流对外界磁效应的总和



**结论：** 一切磁现象都起源于电荷的运动

磁现象的电本质——运动的电荷产生磁场



电流或运动电荷之间相互作用的磁力是**通过磁场**作用的，故磁力称为**磁场力**。

## 二. 磁感应强度矢量

$\vec{B}$  ——反映磁场性质的物理量

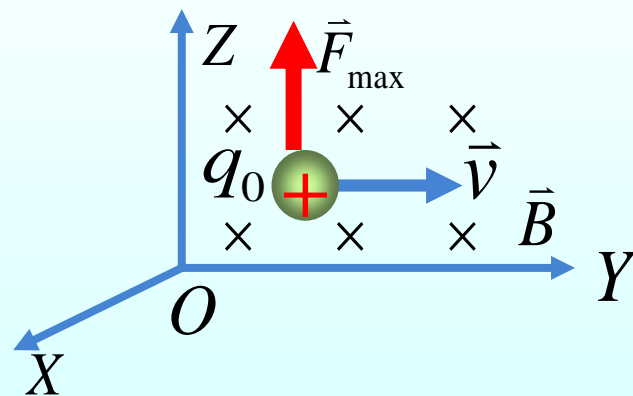
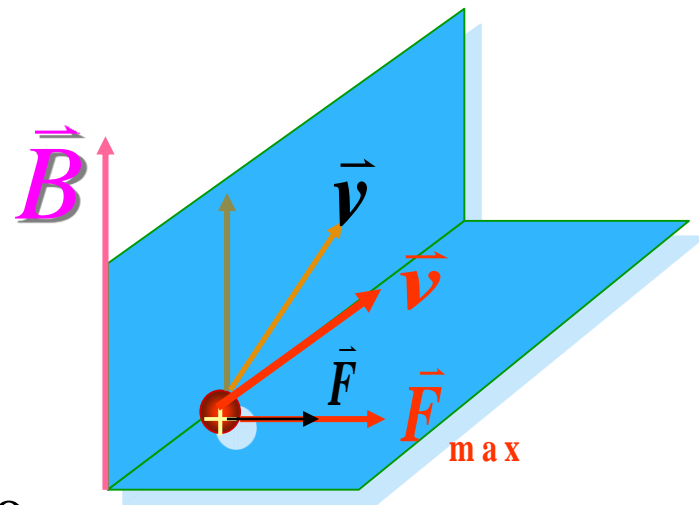
小磁针N极在某场点的指向即为该处  $\vec{B}$  的方向  
设带电量为  $q$ 、速度为  $\vec{v}$  的运动电荷处于磁场中

# (1) 试探电荷 $q$ 以同一速率 $v$ 沿不同方向运动

实验发现:

- 1、 $\vec{F}$ 的大小随 $\vec{v}$ 变化
- 2、 $\vec{F} \perp (\vec{v}, \vec{B})$
- 3、电荷 $q$ 沿磁场方向运动时,  $\vec{F}=0$
- 4、电荷 $q$ 垂直磁场方向运动时,  $\vec{F} = \vec{F}_{\max}$

$$\left\{ \begin{array}{l} |\vec{F}| = 0, \quad \text{此时 } \vec{v} \parallel \vec{B}; \\ |\vec{F}| = |\vec{F}_{\max}|, \quad \text{此时 } \vec{v} \perp \vec{B}; \\ 0 < |\vec{F}| < |\vec{F}_{\max}|, \quad \text{此时 } 0 < \theta(\vec{v} \cdot \vec{B}) < \frac{\pi}{2}. \end{array} \right.$$



## (2) 在垂直磁场方向改变速率 $v$ 或改变电量 $q$

结论：在磁场中同一点， $F_{\max}/qv$  为一恒量，

而在不同的点上， $F_{\max}/qv$  的量值不同。

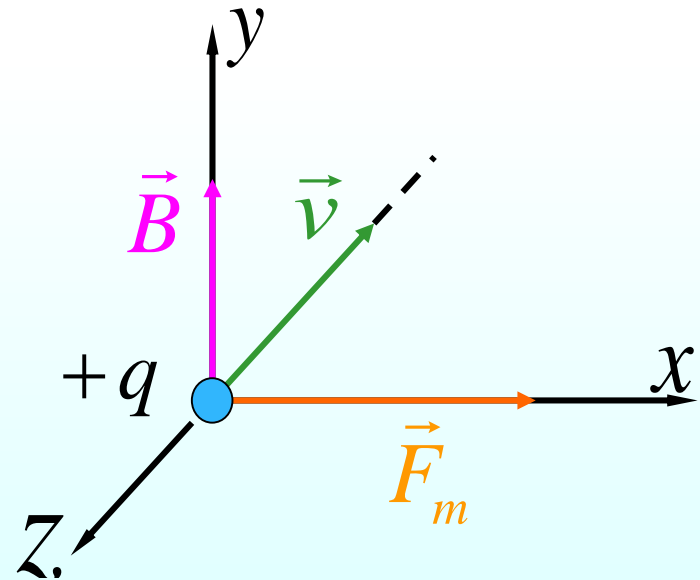
$\left(\frac{F_{\max}}{qv}\right)$  在某点有确定值，即反映该点磁场强弱的性质。

磁感应强度： $B = \frac{F_{\max}}{qv}$

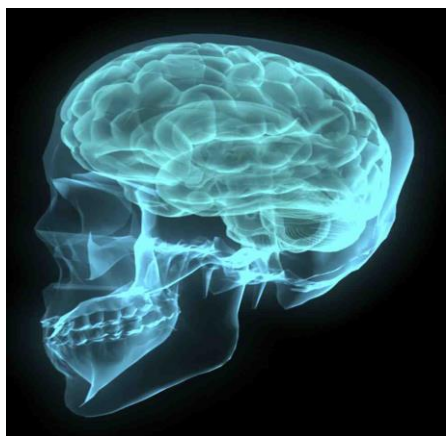
方向： $\vec{F} \times \vec{v}$  的方向

单位：特斯拉 (T) 高斯 (Gs)

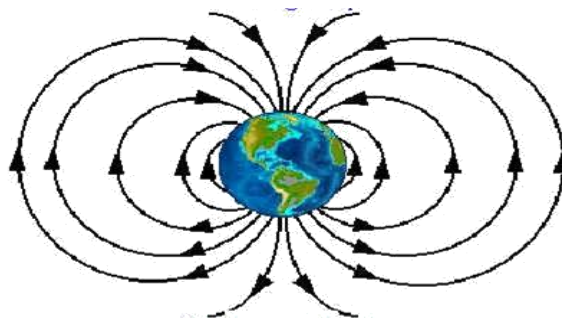
$$1(T) = 10^4(Gs) \text{ 高斯}$$



## 一些磁场的大小:



人体磁场极弱，  
如心电激发磁场  
约 $3 \times 10^{-10} \text{T}$ 。测  
人体内磁场分布  
可诊断疾病，图  
示磁共振图像。



地球磁场约  
 $5 \times 10^{-5} \text{T}$

超导磁体激发高达25T磁场；  
原子核附近可达 $10^4 \text{T}$ ；  
脉冲星表面高达  $10^8 \text{T}$ 。



巨大的电磁铁能够  
吸引成吨的钢铁

大型电磁铁磁场  
可大于2T

# 三、磁场中的高斯定理

## 1、磁感应线

磁感应线（ $\vec{B}$ 线）是为形象描绘磁场空间分布而人为描绘出的一系列有向曲线。

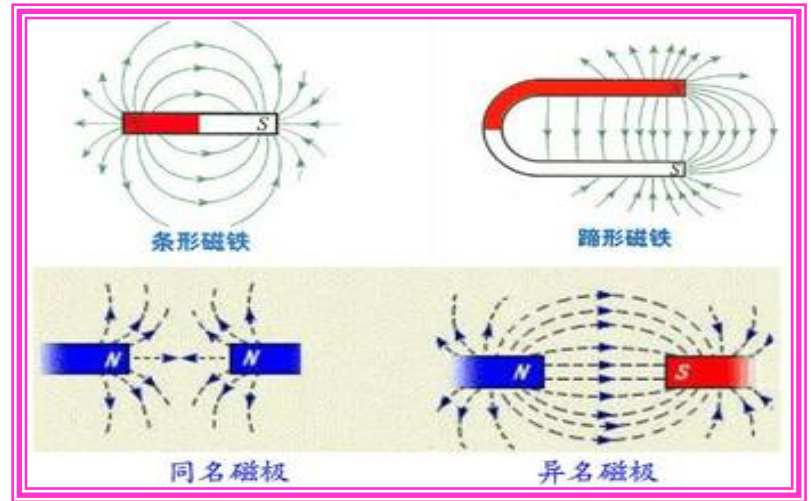
**方向：**磁感应线上任一点的切线方向，就是该点处磁感应强度  $\vec{B}$  的方向。

**大小：**通过磁场中某点处垂直于磁感应强度  $\vec{B}$  的单位面积上的磁感应线根数等于该处  $\vec{B}$  的大小。

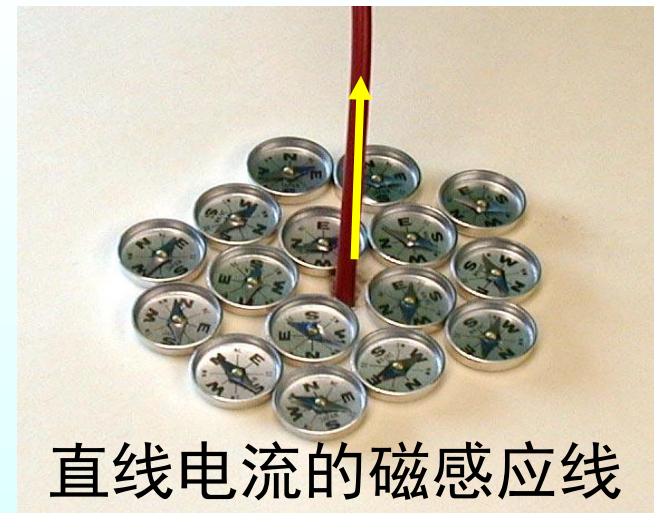
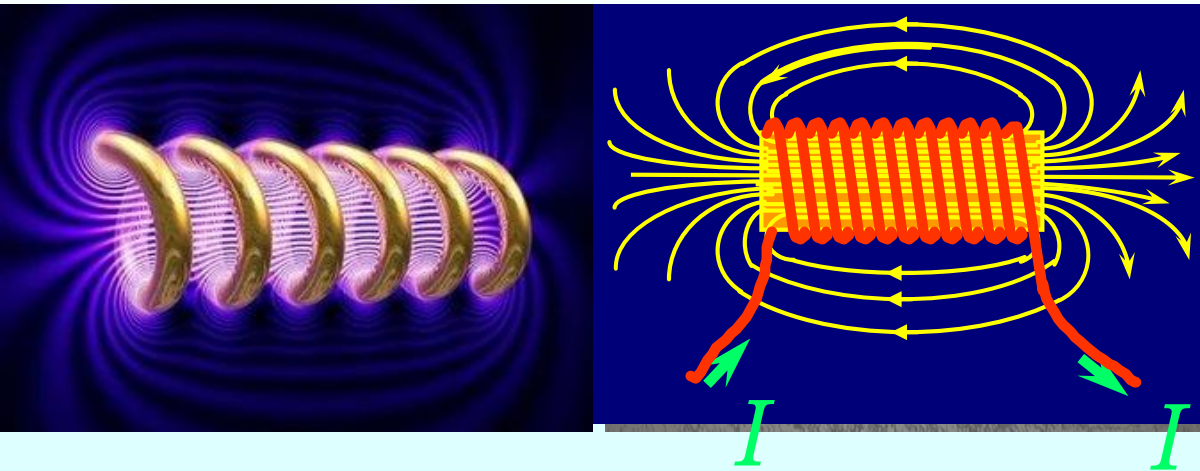
磁感应线的疏密程度反映了磁场的强弱



## 磁铁周围的磁感应线

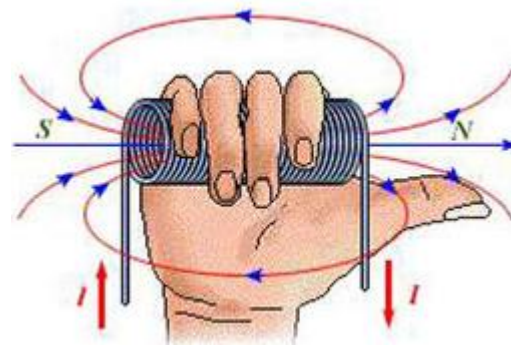
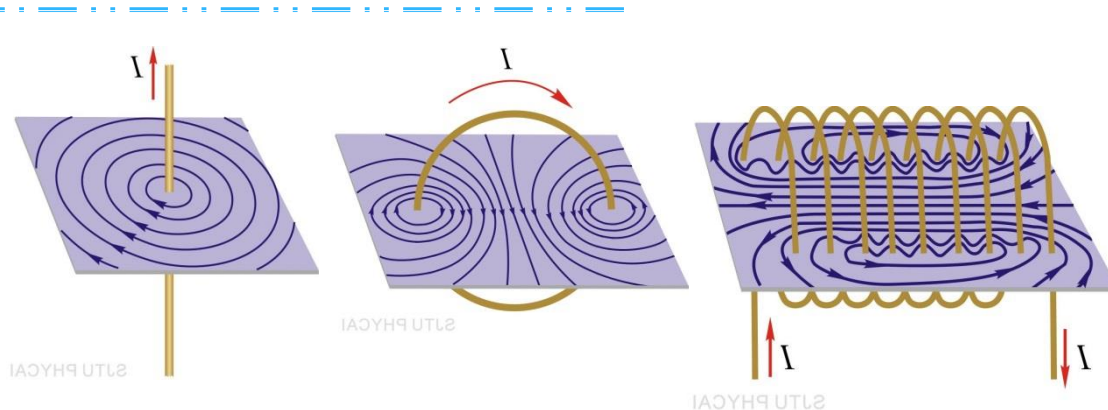


## 通电螺线管的磁感应线



直线电流的磁感应线

# 几种不同形状电流磁场的磁感应线



## 磁感应线的性质：

- 磁感应线与电流  $I$  成右手螺旋关系
- 磁感应线是与电流套链的闭合曲线且永不相交



磁场是无源有旋场

## 2、磁通量 $\Phi$

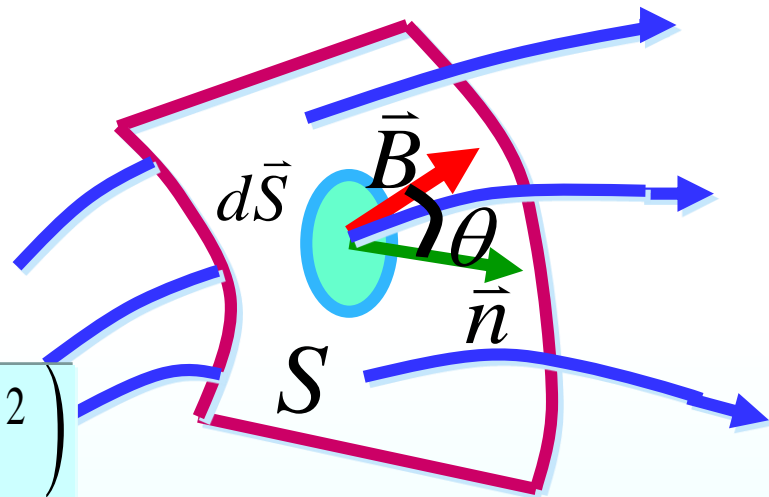
磁通量：穿过磁场中任一给定曲面的磁力线条数

由规定得：

$$B = \frac{d\Phi}{dS_{\perp}}$$

单位 (SI) :

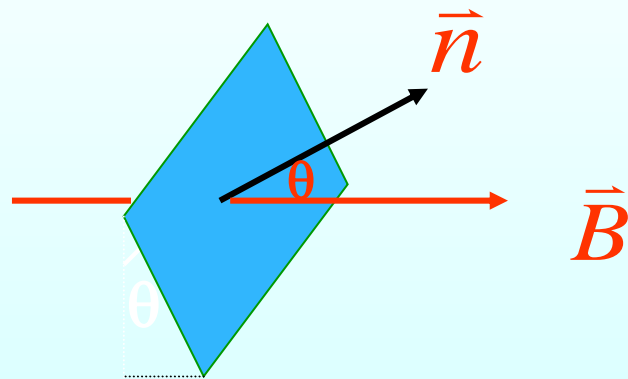
$$\text{韦伯 (Wb)} \quad 1(\text{Wb}) = 1(\text{T} \cdot \text{m}^2)$$



➤ 均匀磁场的通量计算

$$\Phi = B \cdot S_{\perp} = B \cdot S \cos \theta$$

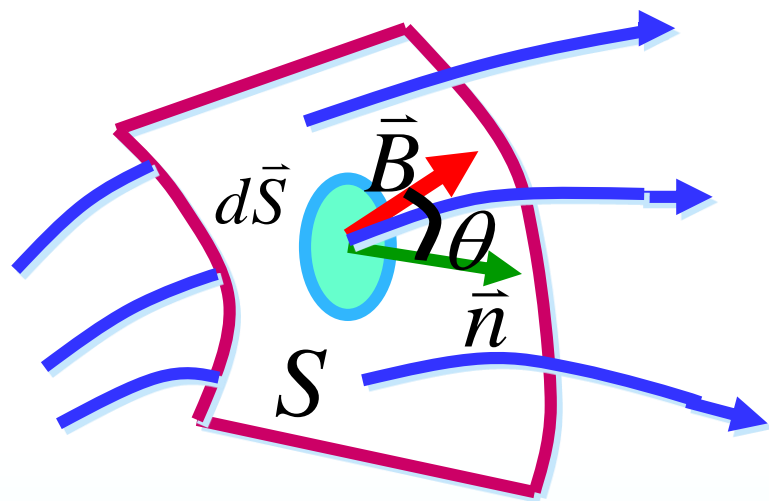
$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$



$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

## ➤ 非均匀磁场的通量计算

通过面积元 $dS$ 的磁通量为



$$d\Phi_m = B dS_{\perp} = B dS \cos \theta = \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint_S B \cos \theta dS$$

### 3、磁场中的高斯定理

对于闭合曲面 $S$ ，规定：面元 $d\vec{S}$ 的法线正方向由内指向曲面外侧，所以有

当  $\theta < \frac{\pi}{2}$  ，  $\vec{B}$ 线穿出曲面  $\phi > 0$

当  $\theta > \frac{\pi}{2}$  ，  $\vec{B}$ 线穿入曲面  $\phi < 0$

磁感应线是无头无尾的闭合曲线，故总磁通量为零，即

$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oiint_S B \cos \theta ds = 0 \text{ —— 磁场的高斯定理}$$

在磁场中通过任意闭合曲面的磁感应强度通量等于零说明磁场是“无源场”

思过去：

点电荷  $\longrightarrow$  点电荷系(带电体)  $\longrightarrow \vec{E} = \int d\vec{E}$

想现在：

元电流  $\longrightarrow$  电流(载流体)  $\longrightarrow \vec{B} = \int d\vec{B}$

- 电流产生的磁场的大小与哪些因素有关？
- 常见直导线、圆环电流等的磁场，能否通过理论进行计算？
- 计算磁场的基本方法是什么？

毕奥-萨伐尔定律

