

# Review Section

## 温故知新

# 电流的连续方程 恒定条件

通过闭合曲面向外流出的电荷(电流量)应等于该体积内电荷减少的速率.

## 电流的连续性方程

$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \frac{dQ}{dt} = -\frac{dQ_i}{dt}$$

如果是稳恒电流，则闭合曲面  $S$  内的电荷不随时间而变化，有

$$\frac{d Q_i}{d t} = 0$$



# 欧姆定律 焦耳定律

欧姆定律 (积分形式)

$$U = IR$$

电导  $G = 1/R$

电阻率

电阻定律

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

电阻率

$$R = \frac{l}{\sigma S}$$

电导率

欧姆定律的  
微分形式

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E}$$

## 焦耳定律（描述电流的热效应的定律）

在平衡状态下，电场力作功与导体释放的热量相等。

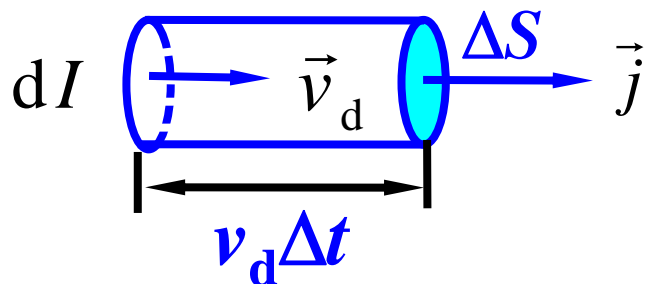
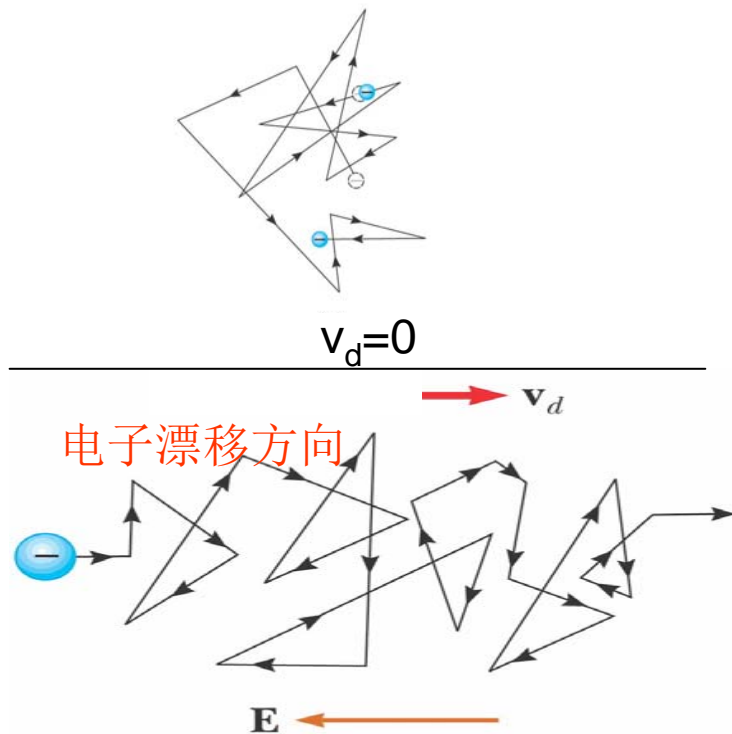
则热功率密

$$p = P / \Delta V = \sigma E^2 \text{ — 焦耳定律的微分形式}$$

# 金属导电的经典微观解释

在导体两端加上电压时，会在导体内部形成**稳恒电场**。

受晶格离子和电场的影响，自由电子将有**定向漂移**。



$$dI = \frac{q[n(v_d \Delta t \Delta S)]}{\Delta t} = qn v_d \Delta S$$

设每个载流子电量为： $q$

载流子数密度为： $n$

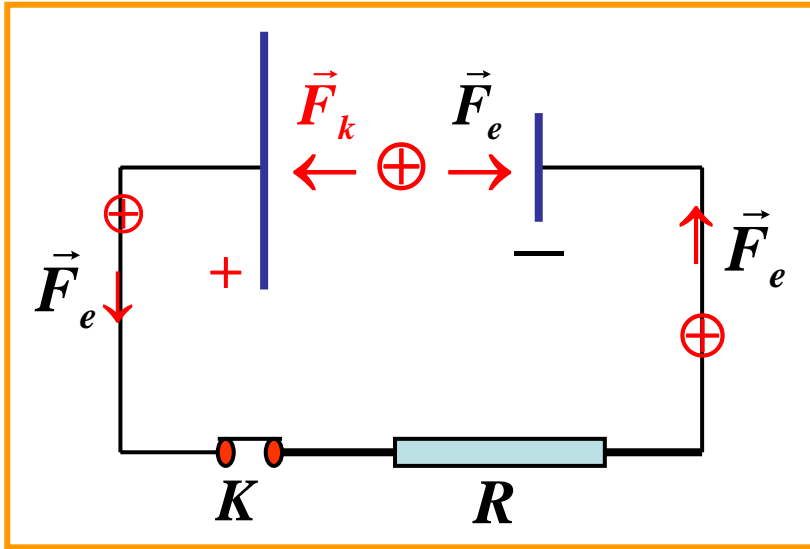
平均漂移速度的大小： $v_d$

$$\vec{j} = \frac{dI}{\Delta S} = nq v_d$$

矢量式

$$\vec{j} = nq \vec{v}_d$$

# 电源电动势 (稳恒电场的能量来源)



能够形成持续电流

**电源作用:**

提供非静电力  $\vec{F}_k$ , 将  $+q$  由负极移向正极, 保持极板间电势差, 以形成持续的电流.

$$\vec{F}_e \begin{cases} \text{外电路: } \int_{+}^{-} \vec{F}_e \cdot d\vec{l} > 0 \\ \text{内电路: } \int_{-}^{+} \vec{F}_e \cdot d\vec{l} < 0 \end{cases}$$

静电力为保守力  $\oint_L \vec{F}_e \cdot d\vec{l} = 0$

非静电力搬运单位正电荷绕闭合回路一周做功:

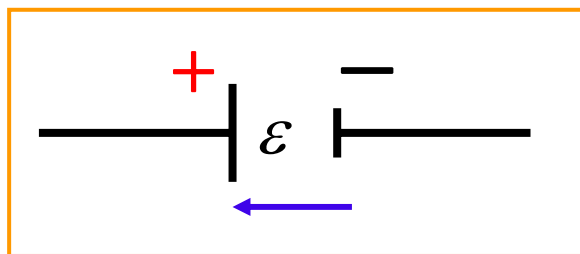
$$A = \oint_L \vec{F}_k \cdot d\vec{l} > 0$$

# 定义：电源电动势

$$\varepsilon = \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = \int_{-}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

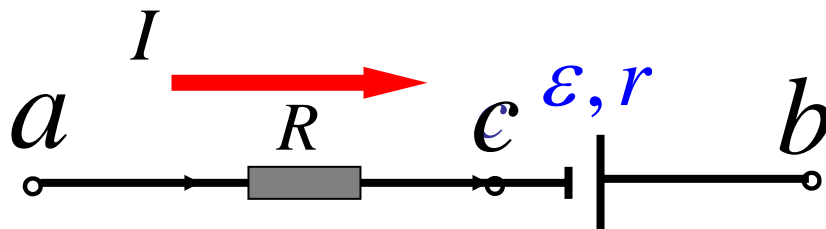
(经内电路)

规定指向：



	电源路端电压	电源电动势
比较	$\Delta U = \int_{+}^{-} \vec{E}_e \cdot d\vec{l}$ <p>(经外电路)</p>	$\varepsilon = \int_{-}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$ <p>(经内电路)</p>

## 一段含源电路的欧姆定律



$$\begin{aligned} U_b - U_a &= -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_a^c \vec{E} \cdot d\vec{l} - \int_c^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ &= -IR - Ir + \varepsilon \end{aligned}$$

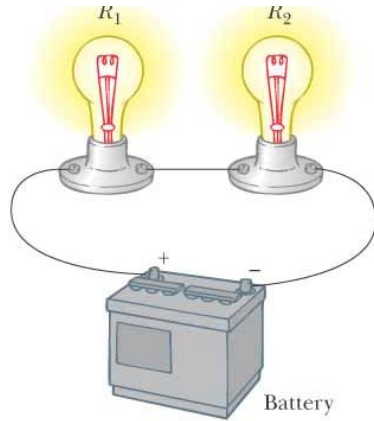
闭合电路的欧姆定律：

$$-\sum_i IR_i - \sum_i Ir_i + \sum_i \pm \varepsilon_i = 0$$

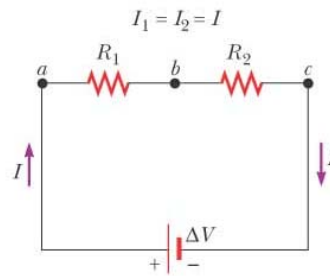
# 简单电路

直流电源与电阻连接构成的闭合电路叫直流电路

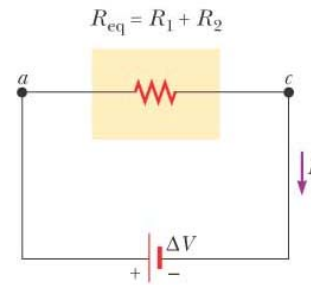
直流电路有两类：(1) 串联：等流、分压



(a)

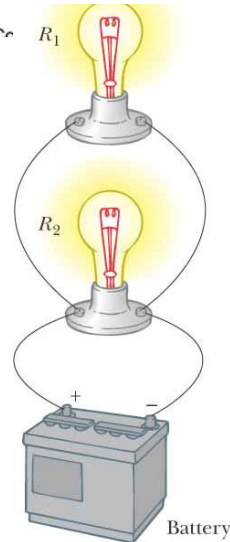


(b)



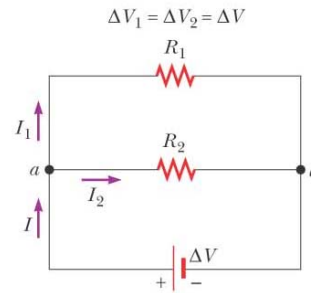
(c)

©2004 Thomson - Brooks/Cole

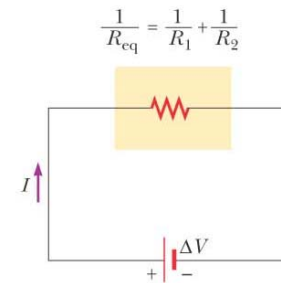


(a)

(2) 并联：等压、分



(b)



(c)

# § 3.4 直流电路

复杂电路

基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第二定律



基尔霍夫 (Kirchhoff)

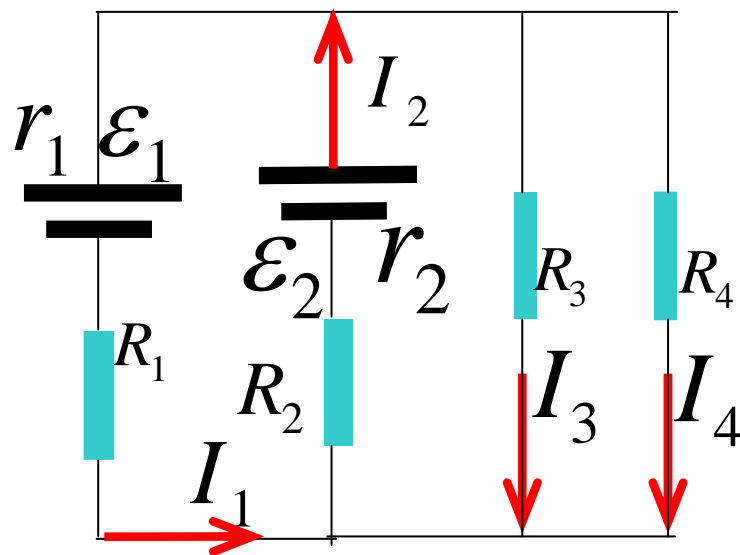


复杂电路: 电阻有除串并联外的连接方式  
(如三角形连接、星形连接)

支路 *branch* 把任意一条电源和电阻串联的电路叫做支路

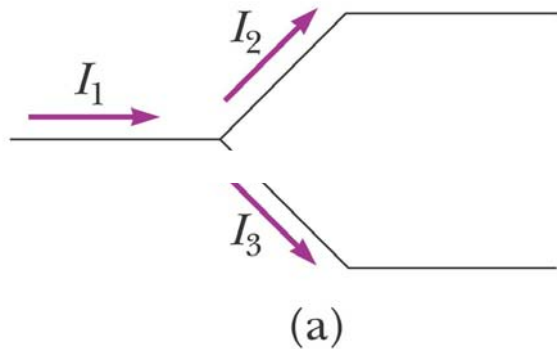
回路 *loop* 把  $n$  条支路构成的通路叫做回路

节点 *node* 三条或更多条支路的汇集点叫做节点



# 基尔霍夫第一方程组（节点电流定律）

通过每一个节点的电流的代数和为零

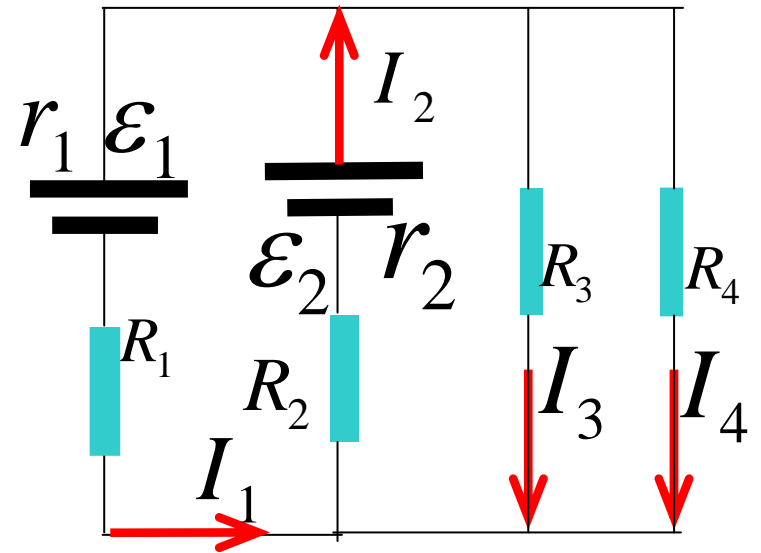


规定：“进”— ‘+’  
“出”— ‘-’

电流恒定条件

$$\oiint_{(S)} \vec{j} \cdot d\vec{s} = 0 \Rightarrow \sum_i (\pm I_i) = 0$$

若有  $n$  个节点，则有  $(n-1)$  个电流方程。



# 基尔霍夫第二方程组（回路电压定律）

对于每一个回路，各电源和电阻上电势降落的代数和为零。

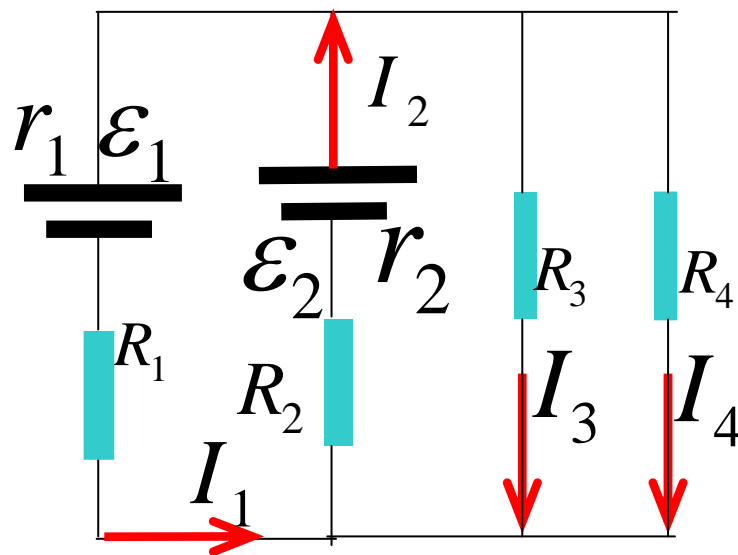
恒定电场环路定理

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \Rightarrow \sum_j (\pm \varepsilon_j) + \sum_i (\pm I_i R_i) = 0$$

若有  $p$  条支路，则有  
( $p - n + 1$ ) 个回路电压方程。

电阻：绕行方向与电流方向一致，电势降落  $IR$  为正，反之，为负。

电动势：绕行方向从正极跨过电源内部到负极，电势降落  $\varepsilon$  为正，反之，为负。



## 应用基尔霍夫定律解题时注意：

- 1) 先假设每条支路电流的方向并标出。最后解得结果为正，则表明电流方向与所设一致；结果为负，则反之。
- 2) 列出**独立**的节点电流方程。
- 3) 对每一个**独立**的闭合回路，先规定回路的绕行方向，然后列出回路电压方程。

## 例：双电源供电电路

第一方程组： $I_1 - I_2 + I = 0$

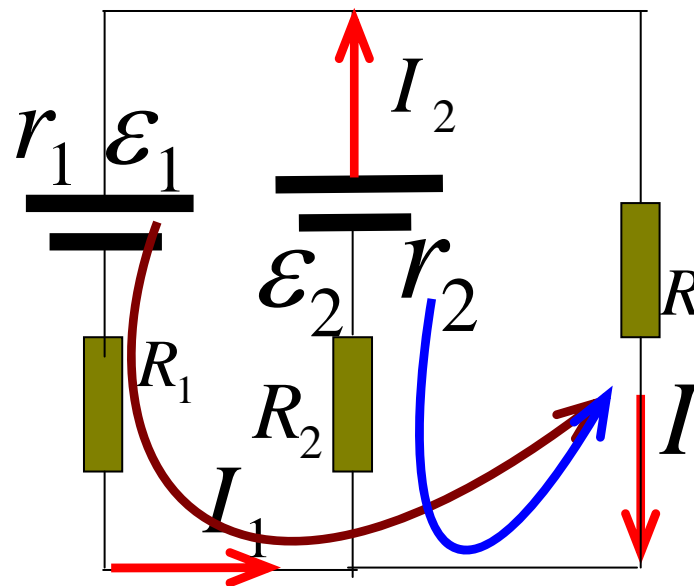
基尔霍夫第二方程组

$$-\varepsilon_1 - I_1 r_1 - I_1 R_1 + IR = 0$$

$$-\varepsilon_2 + I_2 r_2 + I_2 R_2 + IR = 0$$

常系数线  
方程组可

计算结果电流为正值，说明实际电流方向与图中所设相同。若电流为负值，表明实际电流方向与图中所设相反。



# 例：电桥(*electric bridge*)

\*桥路平衡  $I_g = 0$

所以：  $I_1 = I_2$        $I_3 = I_4$

$I_1 R_1 = I_3 R_3$      $I_2 R_2 = I_4 R_4$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

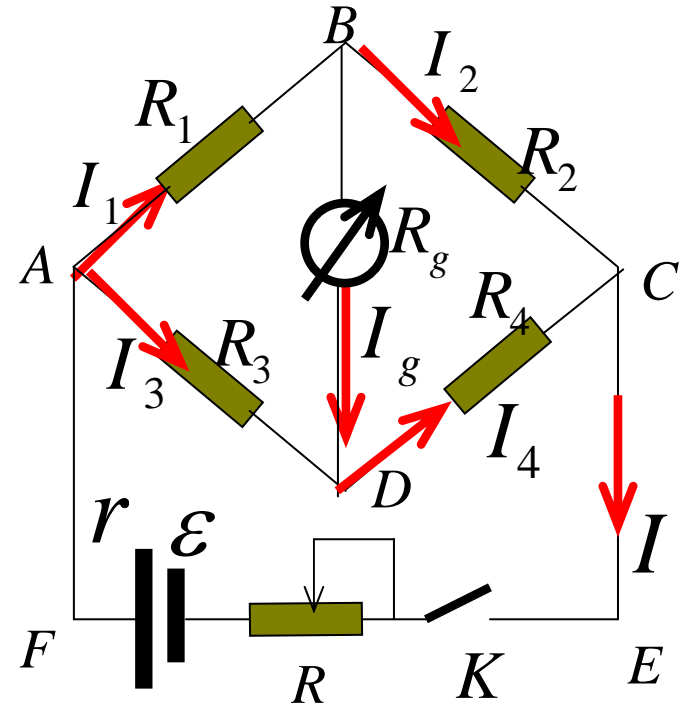
一般情况：

$$-I_1 R_1 - I_g R_g + I_3 R_3 = 0$$

$$-(I_1 - I_g) R_2 + (I_3 + I_g) R_4 + I_g R_g = 0$$

$$-I_1 R_1 - (I_1 - I_g) R_2 + (I_3 + I_g) R_4 + I_3 R_3 = 0 \quad \text{ABCD回路是不独立}$$

$$-I_1 R_1 - (I_1 - I_g) R_2 - (I_1 + I_3)(R + r) + \varepsilon = 0 \quad \text{ABCFEFA回路}$$



**ABDA回路**

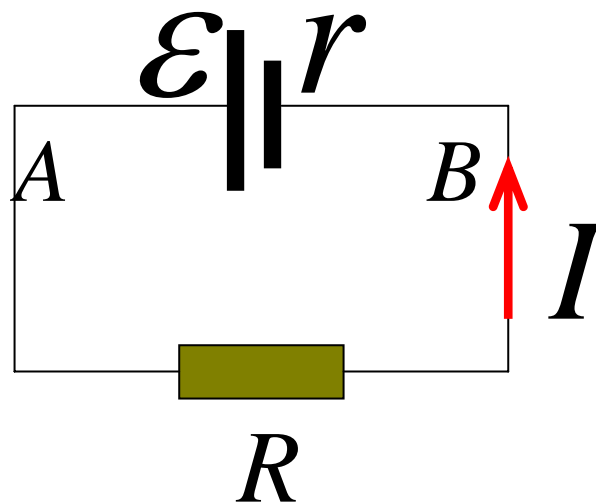
**BCDB回路**

● 闭合电路的欧姆定律

$$\because U_A - U_B = IR$$

$$\because U_A - U_B = \varepsilon - I \cdot r$$

$$\varepsilon = I(R + r)$$



由能量守恒及转换定律得： $\varepsilon \cdot dq = I^2(R + r)dt$

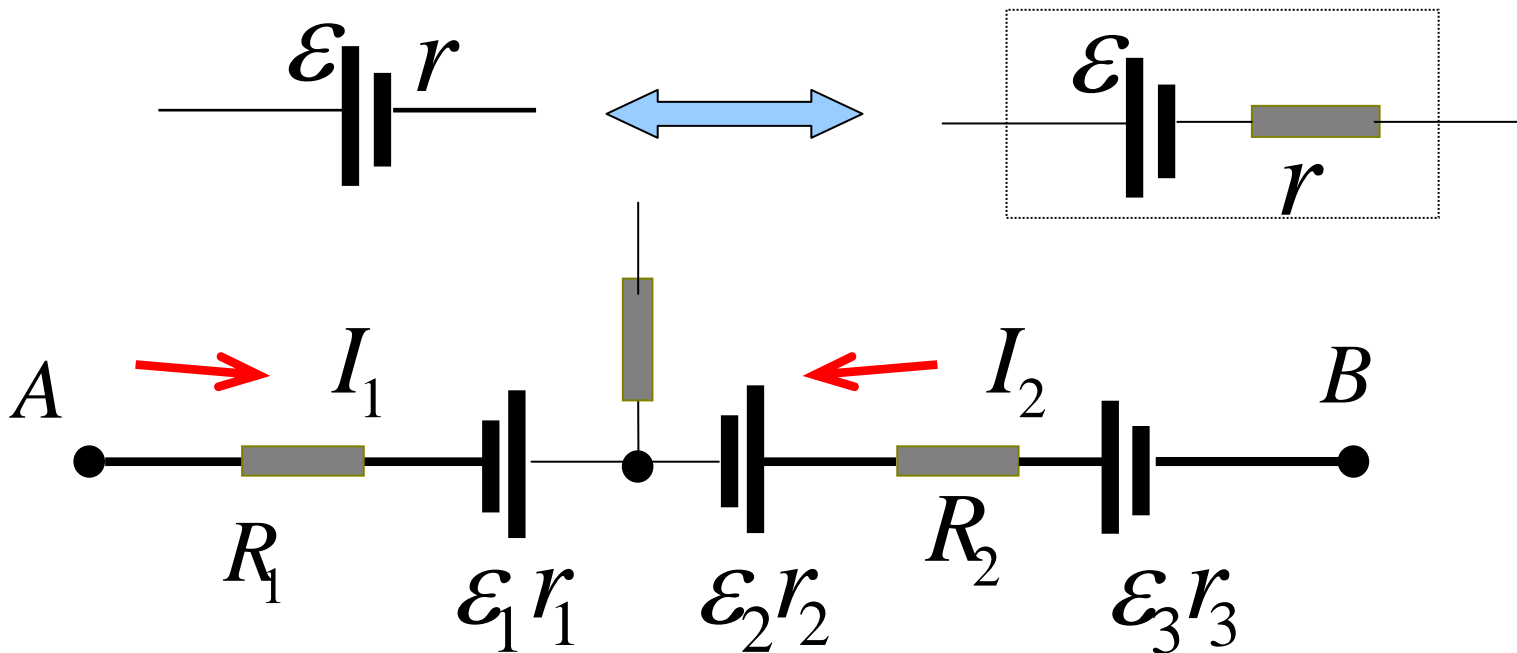
$I^2 r$  为电池消耗于内电阻上的功率。

$I^2 R$  为电池的输出功率。

$\varepsilon \cdot I$  为电池的化学能功率。

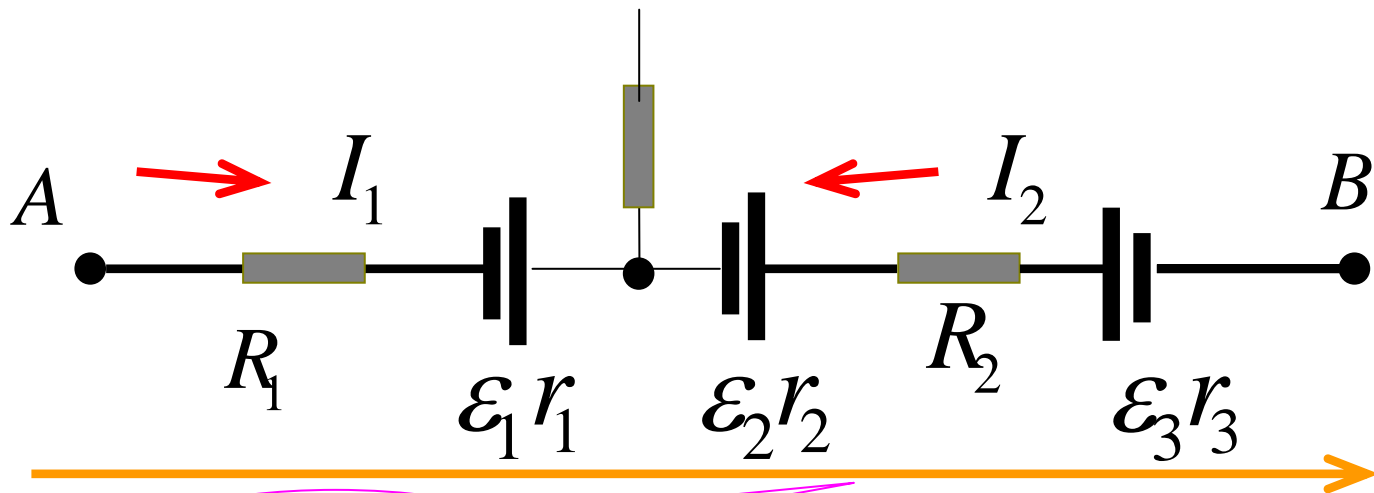
- 电路中任意两点之间的电势差

当不能忽略电源内阻时，可把电源等效成一个电动势为  $\mathcal{E}$ ，内电阻为零和一个电阻为  $r$  的串联。



$$U_A - I_1 R_1 - I_1 r_1 + \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + I_2 (r_2 + R_2) - \mathcal{E}_3 + I_2 r_3 = U_B$$





巡视方向

$$U_A - U_B = I_1 R_1 + I_1 r_1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - I_2 (r_2 + R_2) + \varepsilon_3 - I_2 r_3$$

末端

$$U_B - U_A = -I_1 R_1 - I_1 r_1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + I_2 (r_2 + R_2) - \varepsilon_3 + I_2 r_3$$

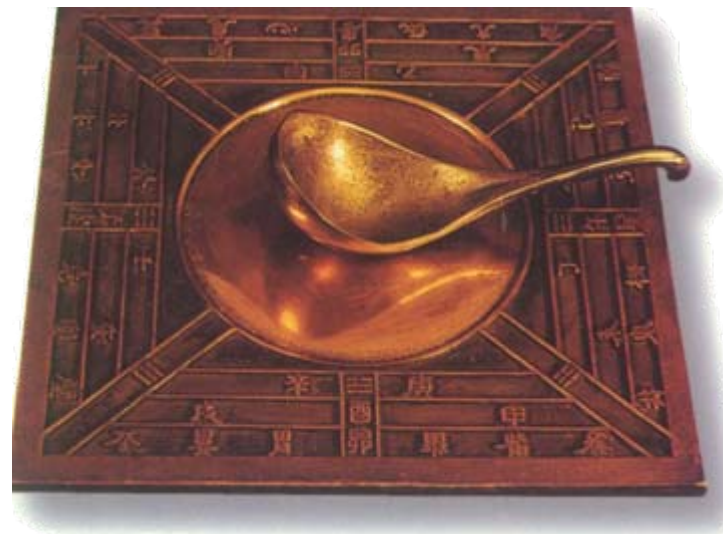
- # 电流与巡视方向相同时，电阻上压降前为负，反之为正
- # 当电动势方向与巡视方向相同时，其前为正，反之为负

# 第四章 磁场

## Magnetic Field

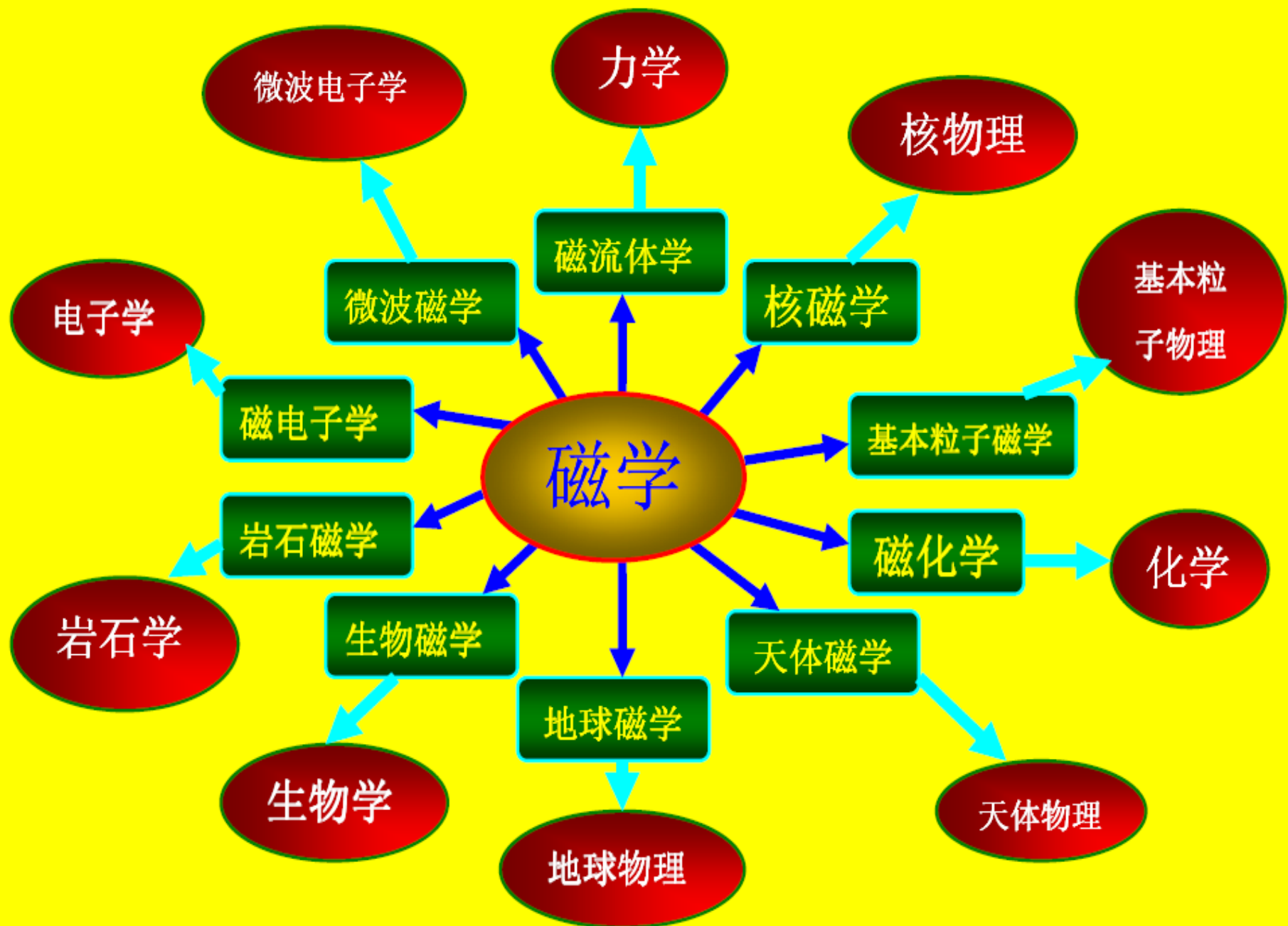


安培



司南勺

### § 4.1 基本磁现象 电流的磁效应



## § 4.1.1 基本磁现象

### 历史 (History)

最早发现磁现象：磁石吸引铁屑  
中国公元前约六世纪春秋战国时期

——磁石 (磁铁)

中国古代东汉时期王充 “司南”指南  
中国十一世纪指南针

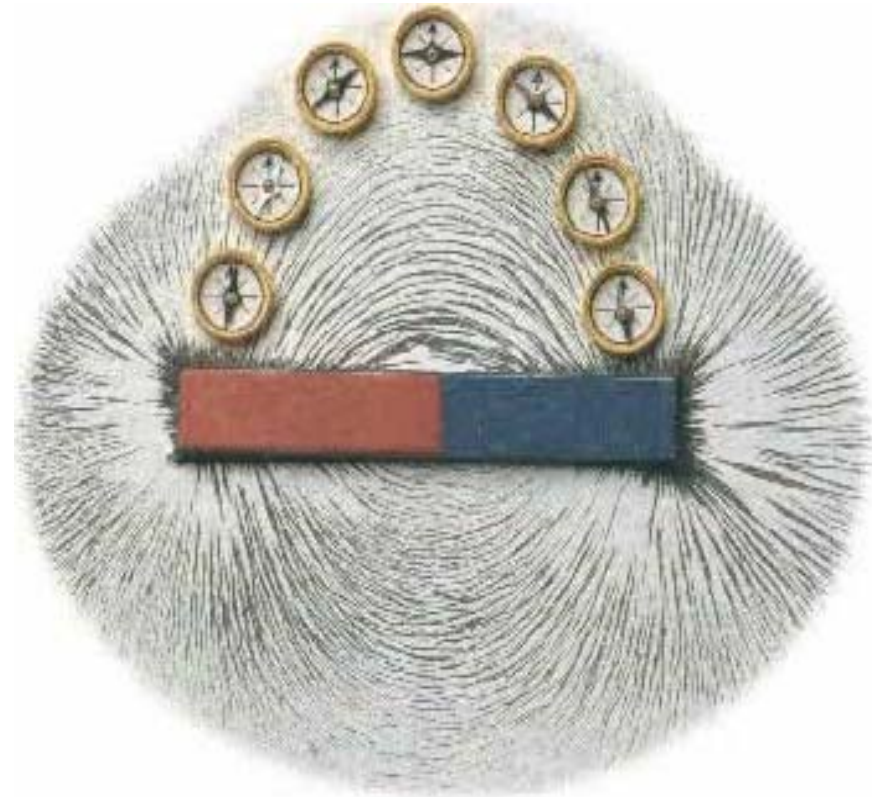


**Magnetism** Term comes from the ancient Greek city of Magnesia, at which many natural magnets were found. A natural magnetic material  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

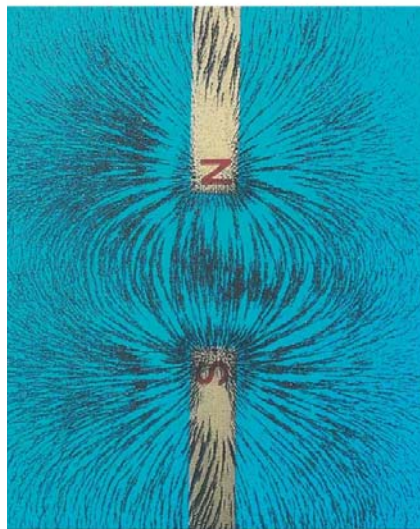
# 对基本磁现象的认识可以分成三个阶段：

## 1. 早期阶段（磁铁 $\Leftrightarrow$ 磁铁）

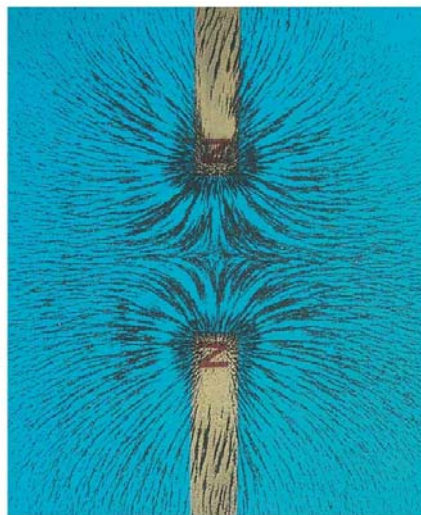
- 天然磁铁（吸铁石）能吸引铁、镍、钴等物质。条形磁铁的两端称作**磁极**，中部称作**中性区**，将条形磁铁的中心支撑或悬挂起来使它能够水平面内运动，则两极总是指向南北方向分别称作**S极**和**N极**。







(b)



(c)

M Thomson - Brooks/Cole

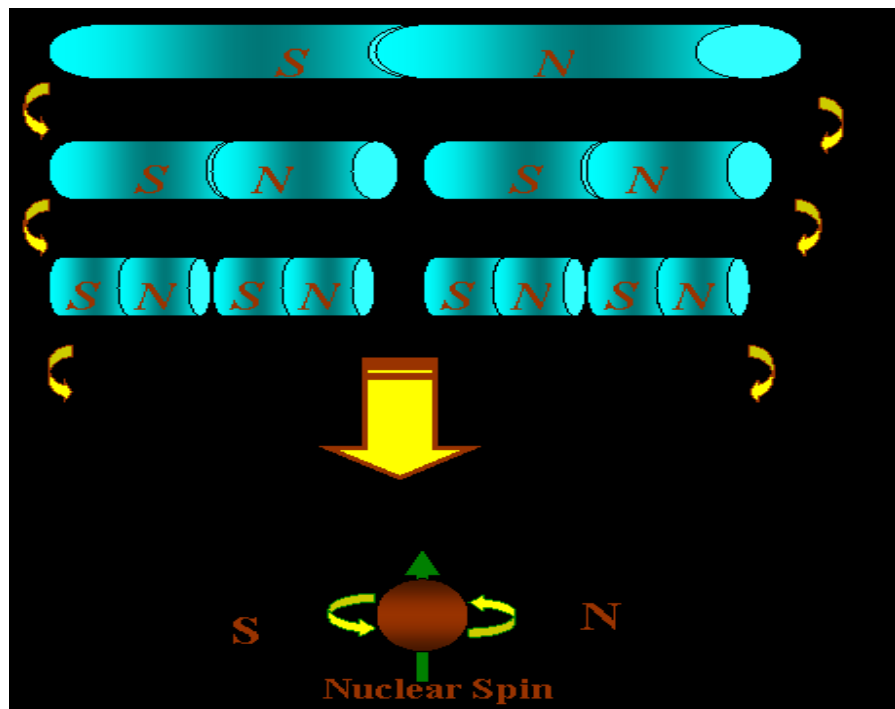
M Thomson - Brooks/Cole



条形磁铁与地球磁场之间以及条形磁铁之间的相互作用说明**同号磁极相互排斥，异号磁极相互吸引。**

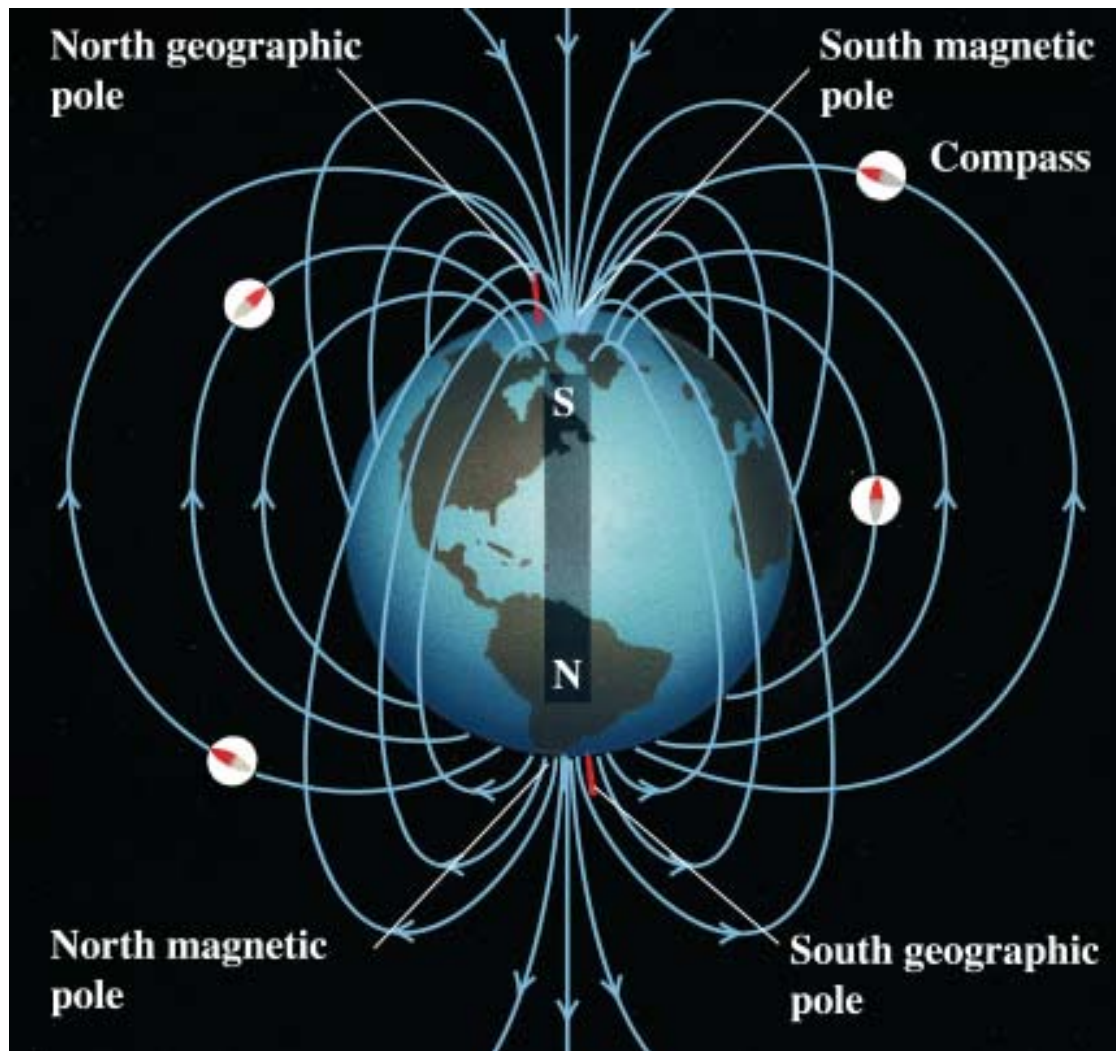


进一步分析发现，将一磁铁可以一直细分成很小很小的磁铁，而每一个小磁铁都具有N、S极。自然界中有独立存在的正电荷或负电荷，但迄今却未发现独立的N、S极。



# 磁铁磁力线

复旦大学物理教学实验中心



## The Earth's magnetic field



# 自然磁现象

## 极光



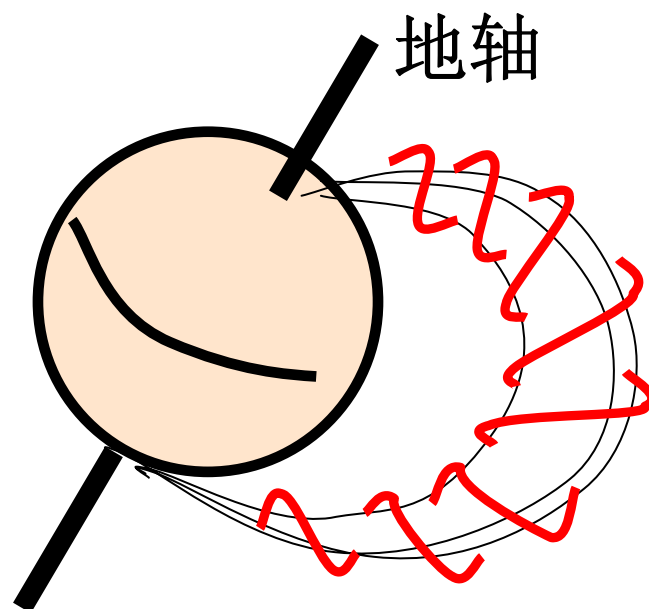
Basically, we knew the phenomenon existed and we learned useful applications for it.

We did not understand it.

## 范阿仑辐射带 *Van Allen*

宇宙射线的带电粒子被地磁场捕获，绕地磁感应线作螺旋线运动，在近两极处地磁场增强，作螺旋运动的粒子被“反射”，结果沿磁力线来回振荡形成范阿仑辐射带。

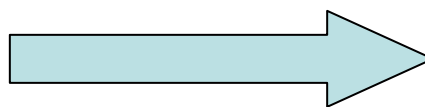
当太阳黑子活动引起空间磁场/电场的变化，使粒子在两极处的电场引导下，在两极附近进入大气层，能引起美妙的北极光。



因为它具有较高的能量，曾在人造卫星的发射等空间科学中发现了它，并给予了必要的考虑。

# 磁现象与电现象有没有联系？

静止的电荷



静电场

运动的电荷



?

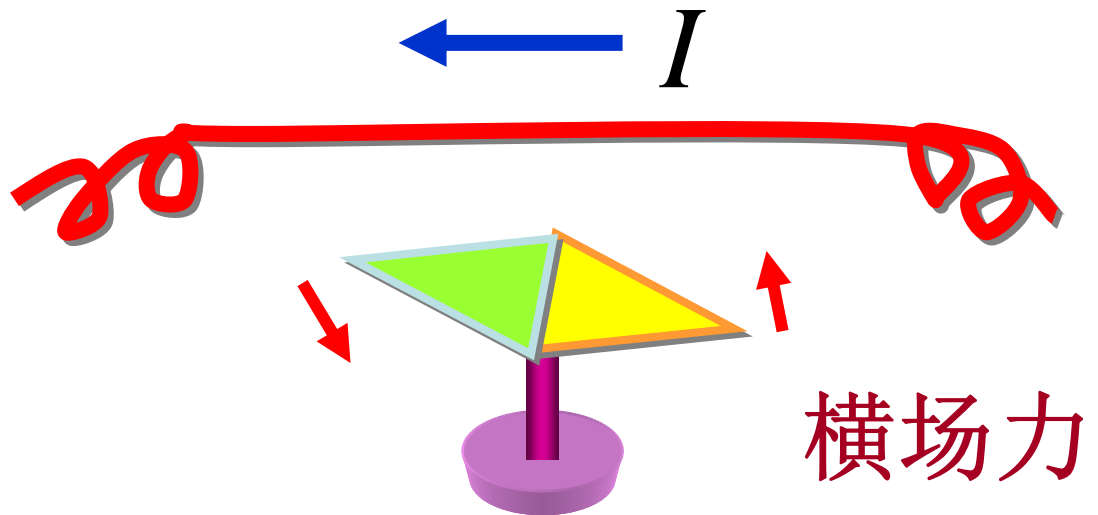
# 电流的磁效应

电流 $\leftrightarrow$ 磁铁， 电流 $\leftrightarrow$ 电流

奥斯特实验 (1820.7)  
——小磁针在通电导线  
周围受磁力作用发生偏转



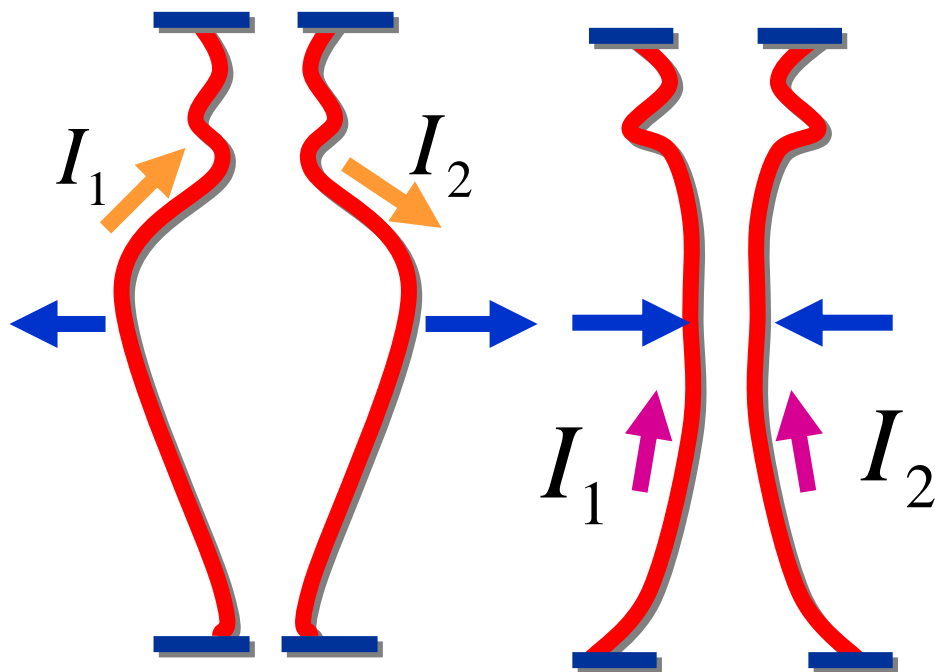
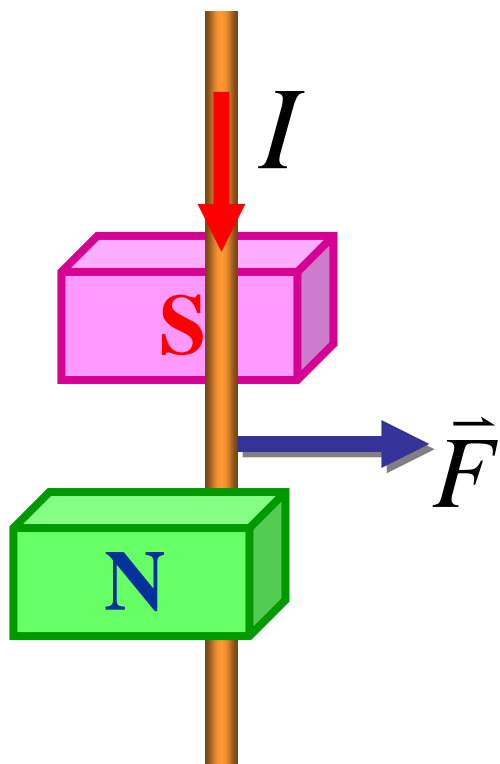
H.C.Oersted  
丹麦物理学家



磁性起源于电荷的运动

# 安培实验（1820年及以后）

## (a) 载流导线受磁力作用而运动



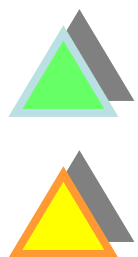
## (b) 两平行载流导线间有相互作用力

# 电磁铁

复旦大学物理教学实验中心

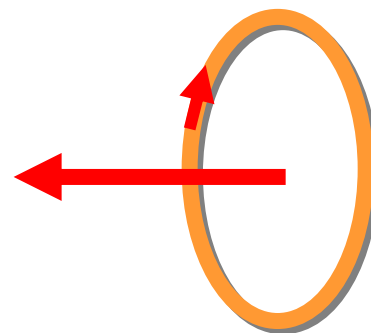
# 安培分子电流假说 (1826)

一切磁现象的根源是电荷的运动。物质**磁性的本质**是在磁性物质分子中，由于电子绕原子核的旋转和电子本身的自转，**存在着分子电流**。



分子电流相当于一个基元磁铁，物质的磁性取决于内部分子电流对外界磁效应的总和。

说明了两种磁极不能单独存在的原因。



当时人们并不了解原子的结构，因此不能解释物质内部的分子环流是如何形成的。现在大家都知道，原子是由带正电的原子核和绕核旋转的负电子组成。电子不仅能绕核旋转，而且具有自旋。在分子、原子等微观粒子内电子的这些运动形成了分子环流，这就是**物质磁性的基本来源的经典解释**。

# 电现象与磁现象密切相关

产生磁场的“源”：

1. 运动电荷
2. 传导电流
3. 永磁铁

磁场由分子电流产生 (安培假设)

运动电荷既能产生磁效应，也能受磁力的作用。一切磁现象都起源于电荷的运动。它们之间的相互作用力均为运动电荷之间的作用力。



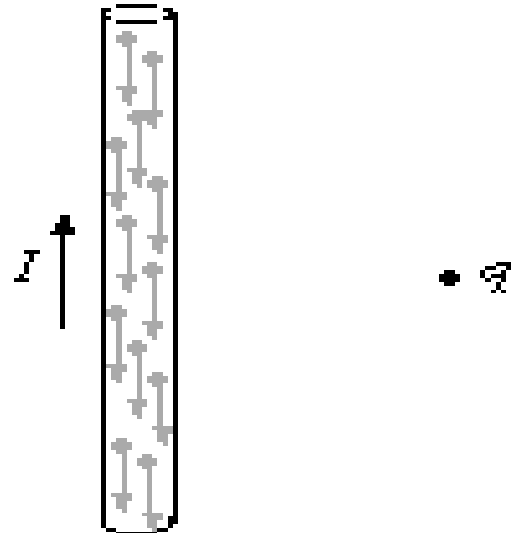
# Quiz 1

1. 单位正电荷从电源正极出发，沿闭合回路一周，又回到电源正极时，下列哪种说法正确？

- 1) 静电力所做总功为零；
- 2) 非静电力所做总功为零；
- 3) 静电力和非静电力做功代数和为零；
- 4) 在电源内只有非静电力做功，在外电路只有静电力做功。

2. 一正电荷在一载流导线附近，向上的电流是由于其中电子向下运动，电线对电荷作用

1. 电力
2. 磁力.
3. 电力和磁力
4. 没有力



# 作业:

(Due date: Mar. 29)



3-6, 3-8, 3-9, 3-10, 3-11