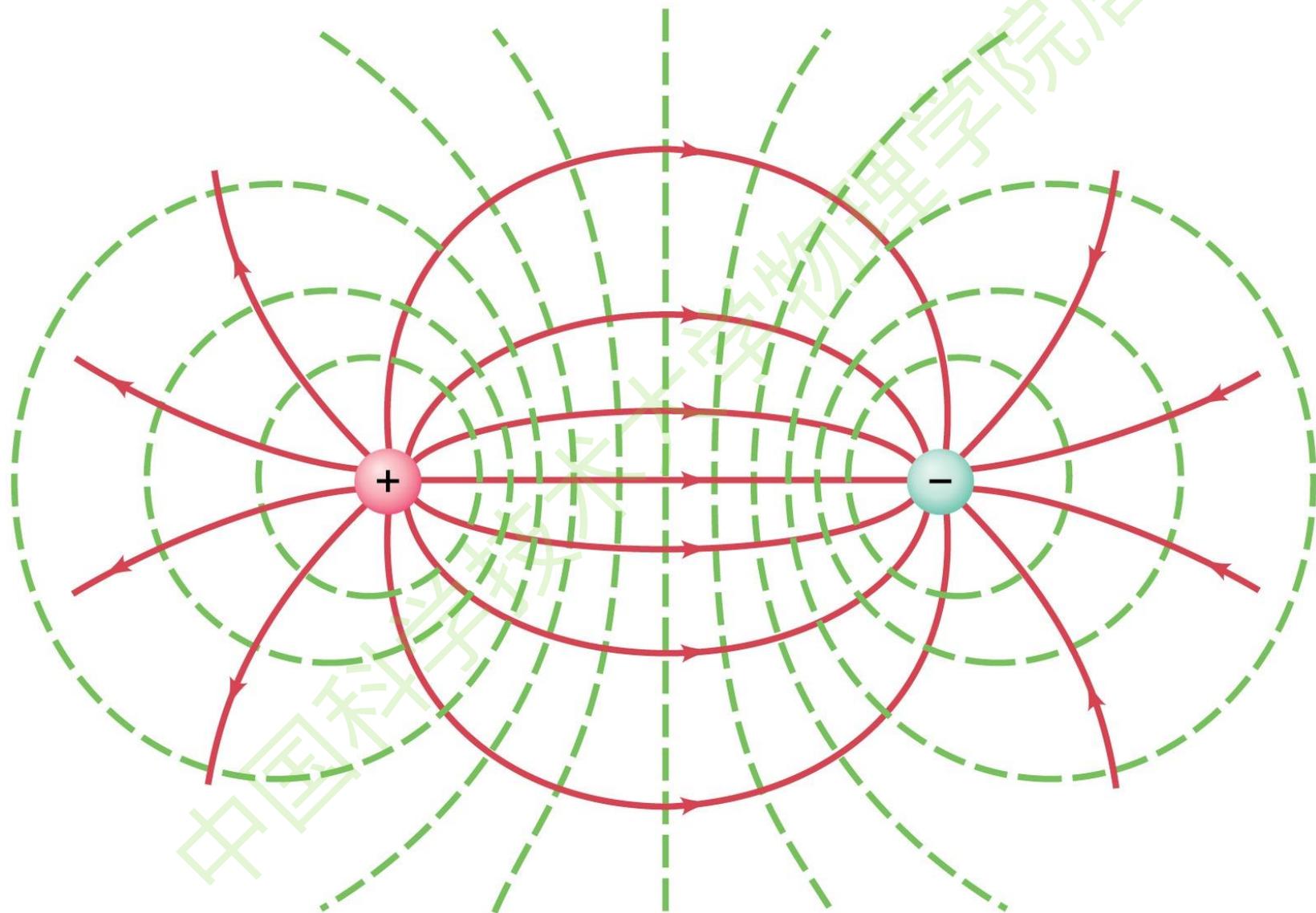


第1章 电力与电场



第1章 电力与电场

§ 1.1 电力起源

§ 1.2 库仑定律

§ 1.3 电场强度

§ 1.4 高斯定理

§ 1.5 环路定理

中国科学技术大学物理学院唐

连续分布的电荷

- 电荷的最小单位

$$e = 1.6021892(46) \times 10^{-19} \text{ C}$$

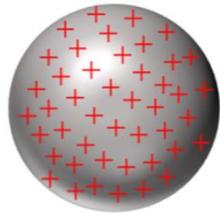
- 1库仑电量包含的电荷： 6.24×10^{18}
- 1库仑电量分布在1立方米体积中时，电荷的平均间距约为： $2 \times 10^{-7} \text{ m}$
- **一般情况下**，可以忽略电荷的量子性，将电荷分布当做连续分布的

连续分布的电荷的描述

连续分布的电荷可以用**电荷密度**来描述

可以是均匀的，也可以是不均匀的

• 体电荷:



$$\rho = \frac{\Delta q}{\Delta V}$$

$$dq = \rho dV$$

“电荷元”

• 面电荷:



$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}$$

$$dq = \sigma dS$$

• 线电荷:



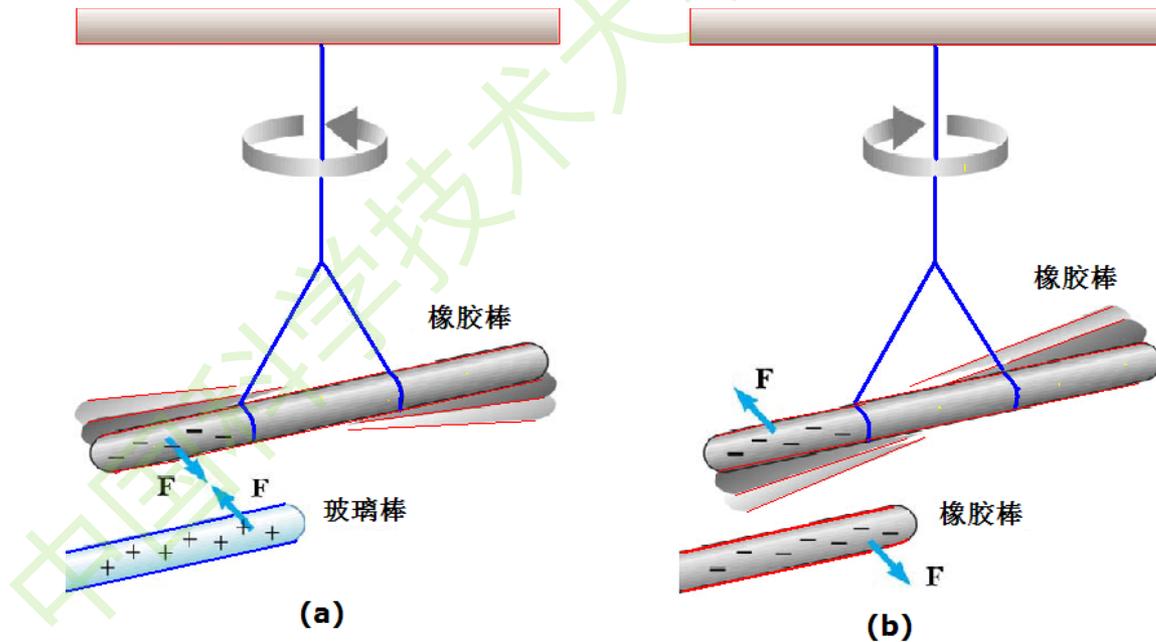
$$\lambda = \frac{\Delta q}{\Delta l}$$

$$dq = \lambda dl$$

电荷的特性

1. 自然界中存在两种电荷。

- 分别为正电荷和负电荷，它们互为相反电荷。
- 具有相加性。
- 同号电荷相斥，异号电荷相吸。



电荷的特性

2. 电荷是量子化的。

- 可以自由存在的电荷的基本单元是一个电子的电量。
- 夸克的电量是电子电量的 $\pm 2/3$ 或 $\pm 1/3$ 。但至今未发现夸克可以自由存在。
- 质子 (uud) $+1$ ；中子 (udd) 电中性。

电荷的特性

3. 电荷的对称性。

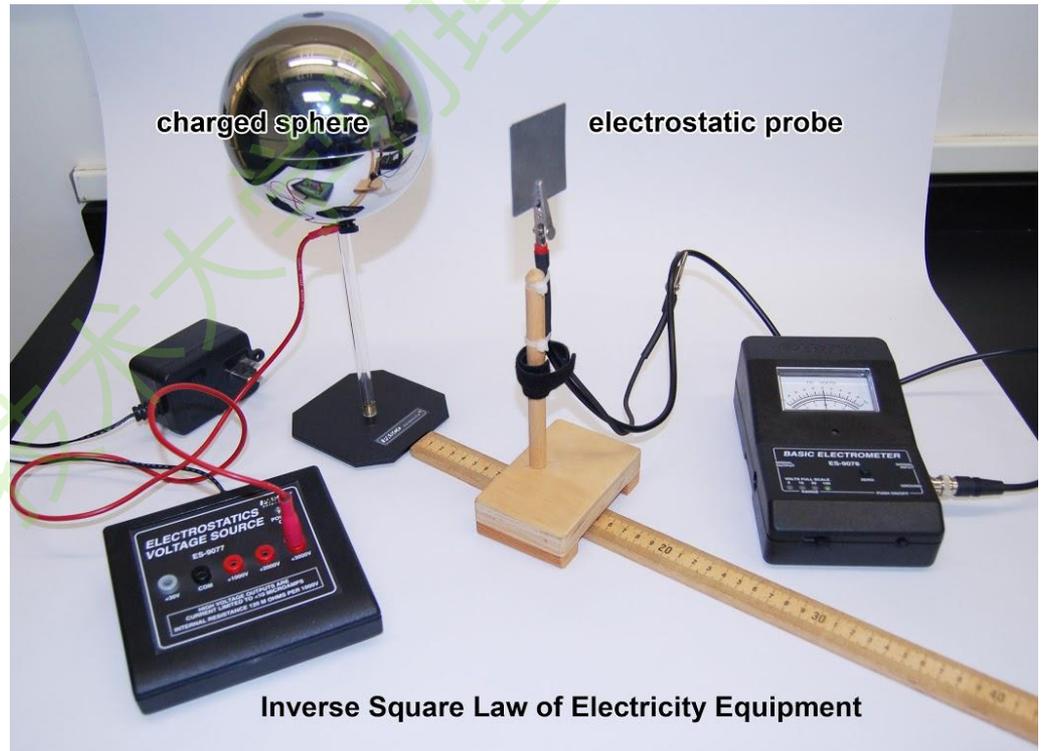
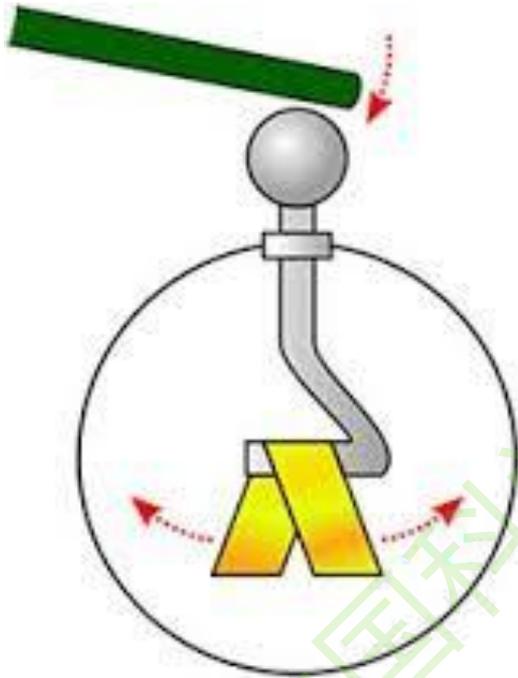
- 对于每种带电的基本粒子，必然存在与之对应的、带等量异号电荷的另一种基本粒子-反粒子。

4. 电量是相对论不变量。

- 电量和带电物质的速度无关，与参照系无关。
- 与质量的区别。

电荷是物质的基本属性，不存在不依附物质的“单独电荷”。

电量是物体所带电荷的数量，可用验电器、静电计等测量。

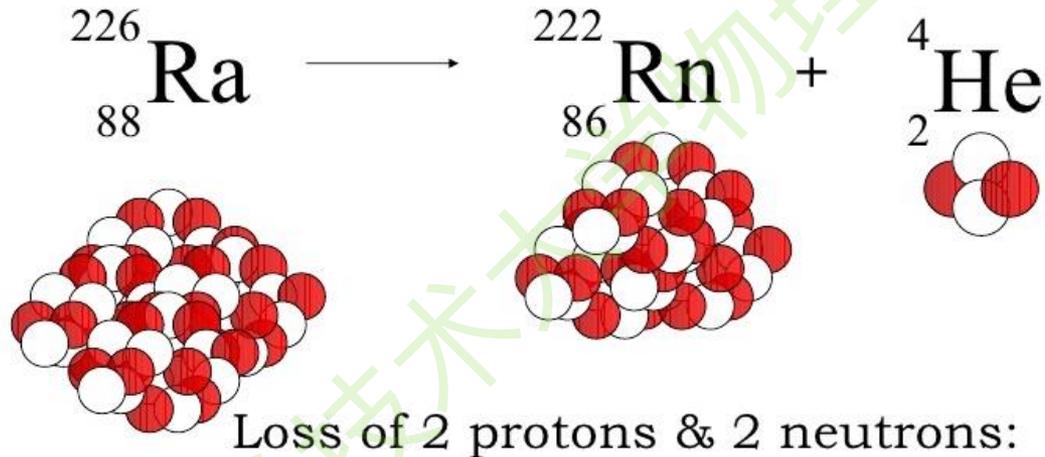


§ 1.1.4 电荷守恒定律

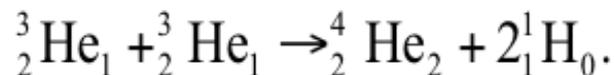
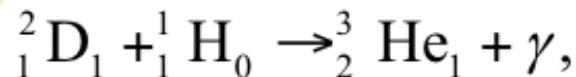
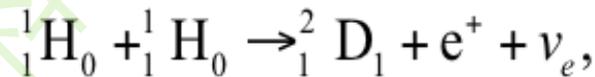
- 电荷不能脱离实物存在，只能从一个物体**转移**到另一个物体；或者从物体的一部分转移到另一部分。
- 在转移的过程中，电量的总量保持不变。
- 对于一个孤立系统，系统的电荷的代数和总是保持不变的，这就是**电荷守恒定律**。

- 由于电荷的相对论不变性。电荷守恒定律在所有的惯性系都成立。
- 电荷不仅在宏观上守恒，在微观上也守恒

Alpha Decay

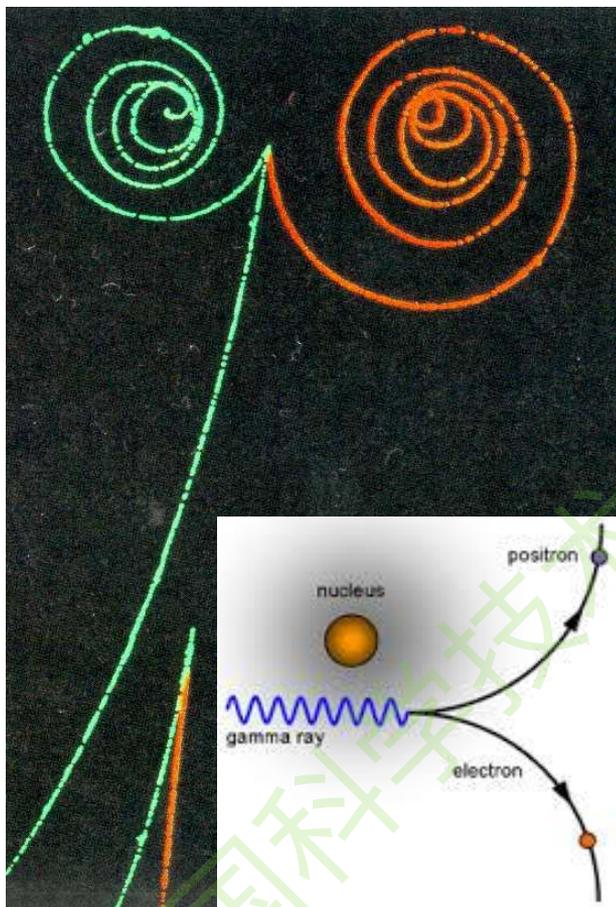


- 不仅在反应前后守恒，在反应的任意阶段都守恒



- 电荷可以从真空中产生或湮灭

产生



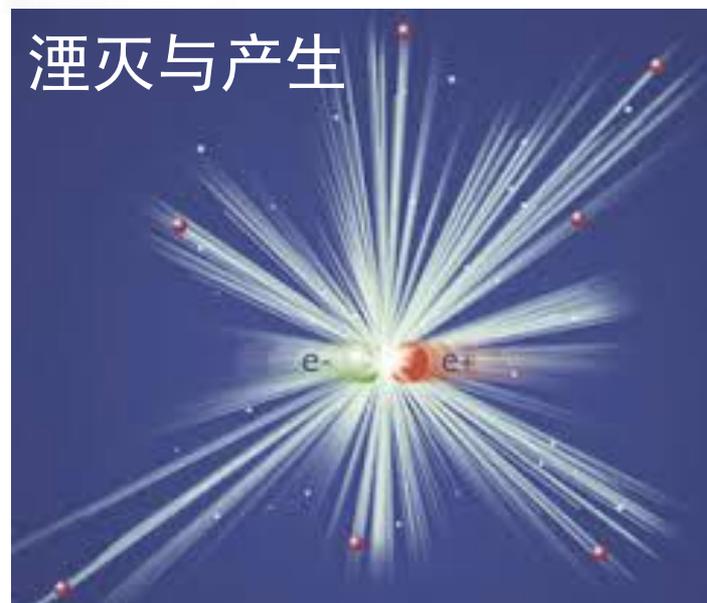
湮灭

No! I don't want
a hug!

C'mon you're always
so negative!



湮灭与产生

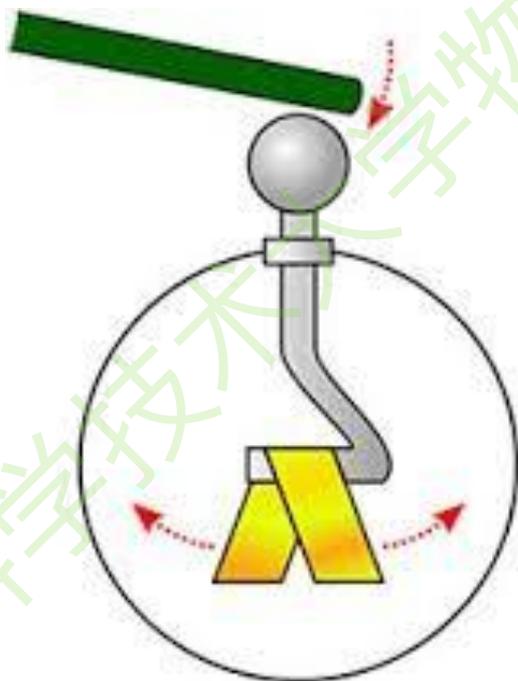


- 但必须是成对的!

§ 1.1.5 接触带电与感应带电

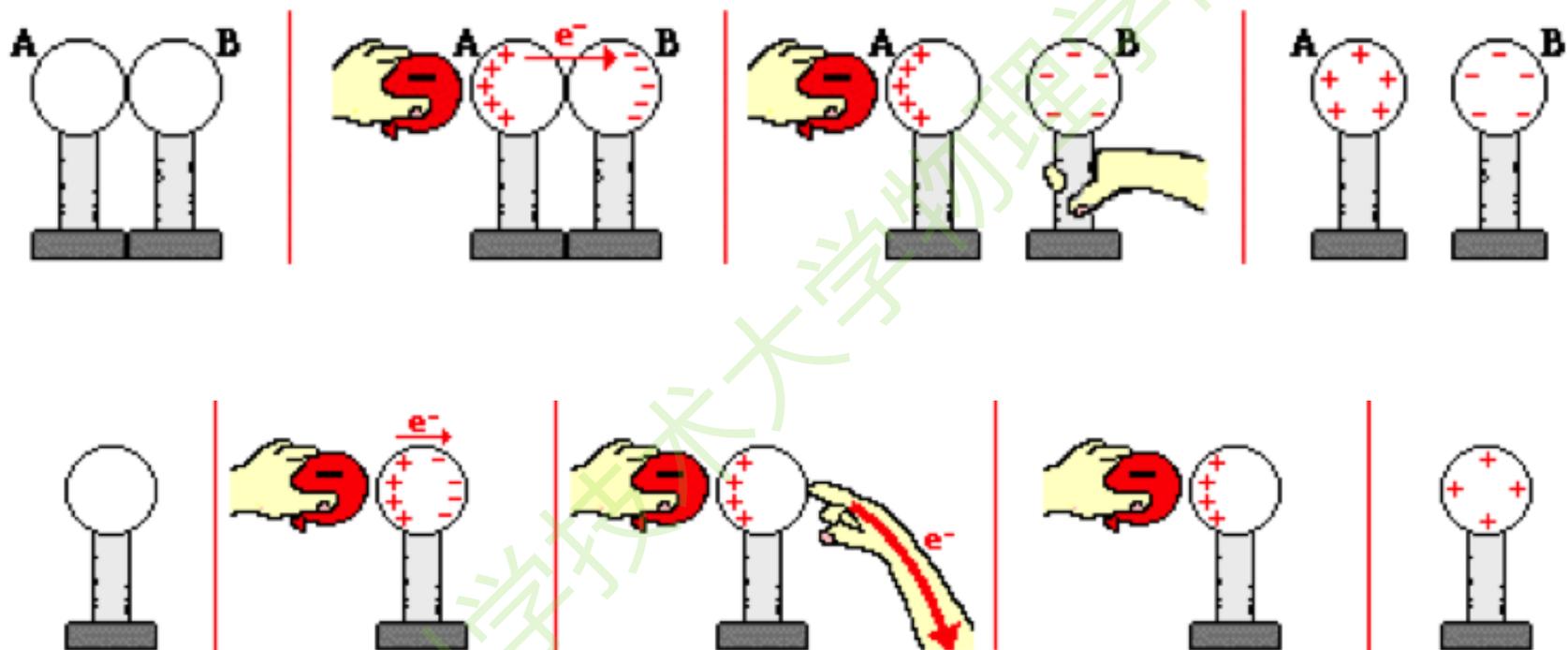
1. 接触带电

通过接触带来电荷的转移，从一个物体转移到另外一个物体

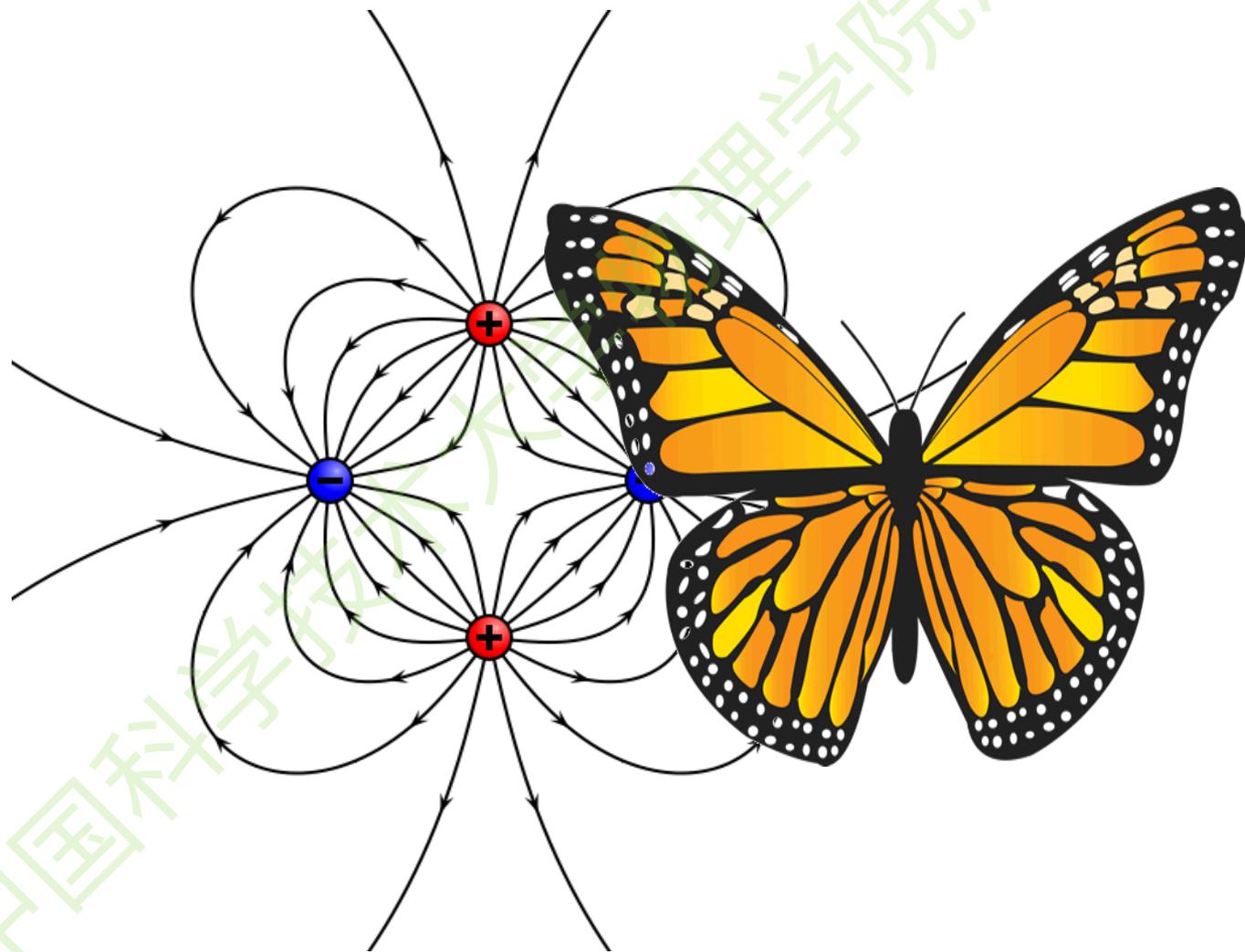


2. 感应带电

通过静电感应使得电荷转移。电荷重新分配。



§ 1.2 库仑定律



中国科学院大学物理学院唐

§ 1.2.1 库仑定律 (Coulomb's Law)



Charles-Augustin de Coulomb

1736-1806



库仑秤

1. 库仑与扭秤

- 库仑早年是一名军事工程师，督造过若干年的防御工事。
- 1781年，由于有关扭力的论文，他当选为法国科学院院士。
- 1784年，通过实验确立了金属丝的扭力定律。发现扭力正比于扭转角度，并指出可用来测量 6.48×10^{-6} 克重这样小的力。
- 1785年，库仑自行设计制作了一台精确的扭秤，测量了电荷之间相互作用力与距离等的关系。
- 1788年建立了库仑定律。

库仑做了三次实验记录：

1. 小球间距36刻度，银丝扭转 36°
2. 小球间距18刻度，银丝扭转 144°
3. 小球间距8.5刻度，银丝扭转 575.5°

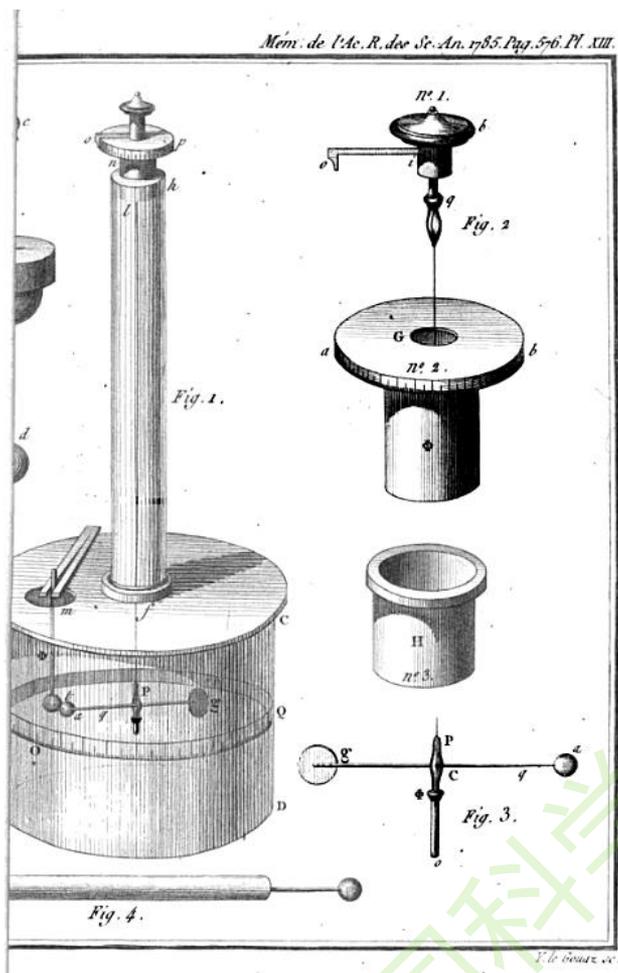
扭转角比 $1:4:16 \rightarrow$ 斥力比 $1:4:16$

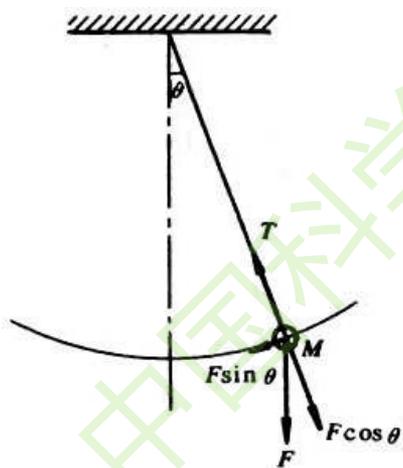
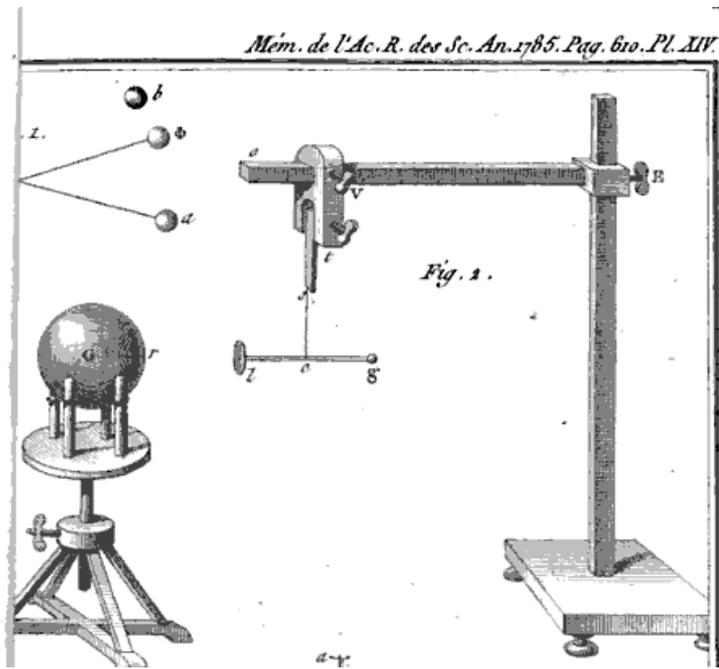
两小球间距比约为 $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{4}$

库仑还做了一系列实验，得出结论：

两个带同种电荷小球之间的相互斥力与他们之间的距离的平方成反比。

思考：为何第三次实验的间距偏小？





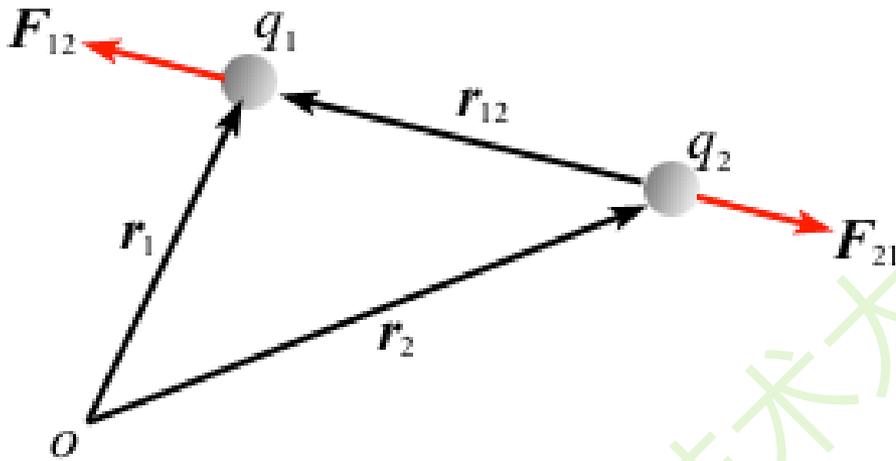
- 在同号电荷间斥力成功后，库仑开始**异号电荷引力**的扭秤实验。但发现平衡不稳定，结果不精确。
- 1787年，他通过扭摆实验，利用振荡方法测量了带电体周期与异号电荷之间间距的关系，也得到平方反比定律。
- 他还指出吸引力与两个带电体的**电量乘积成正比**。

库仑定律

库仑定律的主要内容：

- 同号电荷相互排斥，异号电荷相互吸引；
 - 作用力沿两电荷的连线；
 - 力的大小正比于每个电荷的电量；
 - 力的大小反比于两个电荷之间距离的平方。
- 方向
- 大小

数学表述



$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12}$$

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

k 值的确定

- 库仑定律中的比例系数 k 的数值及量纲与单位制的选取有关
- 在国际单位制SI中，力的单位是N（牛顿），电量的单位是C（库仑）

$$1C = 1A \cdot s$$

- 则通过实验测得比例系数

$$k = 8.987551787 \times 10^9 \approx 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$$

- 定义 $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$ ，则真空介电常数

$$\epsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12} \text{ N}^{-1}\text{m}^{-2}\text{C}^2$$

[例] 氢原子中质子和电子之间的距离为0.053 nm, 求它们之间的相互作用力

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = -k \frac{e^2}{r^2} \\ = -9.0 \times 10^9 \cdot \left(\frac{1.6 \times 10^{-19}}{5.3 \times 10^{-11}} \right)^2 = 8.2 \times 10^{-8} N$$

$$F_g = G \frac{Mm}{r^2} = 6.673 \times 10^{-11} \cdot \frac{1.67 \times 10^{-27} \cdot 9.1 \times 10^{-31}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \\ = 3.6 \times 10^{-47} N$$

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.3 \times 10^{39}$$

质子与电子之间的静电力与引力的比约为： 10^{39}

2. 关于库仑定律的讨论

1. 库仑定律的适用对象：**点电荷**

2. 库仑定律成立的条件：

真空条件并不必要，周围有其他电荷存在时依然成立。

两点电荷相对静止

静止源电荷对运动电荷的作用力也满足。运动速度对静止电荷的作用力需要修正。但速度远低于光速时修正很小，可以忽略。

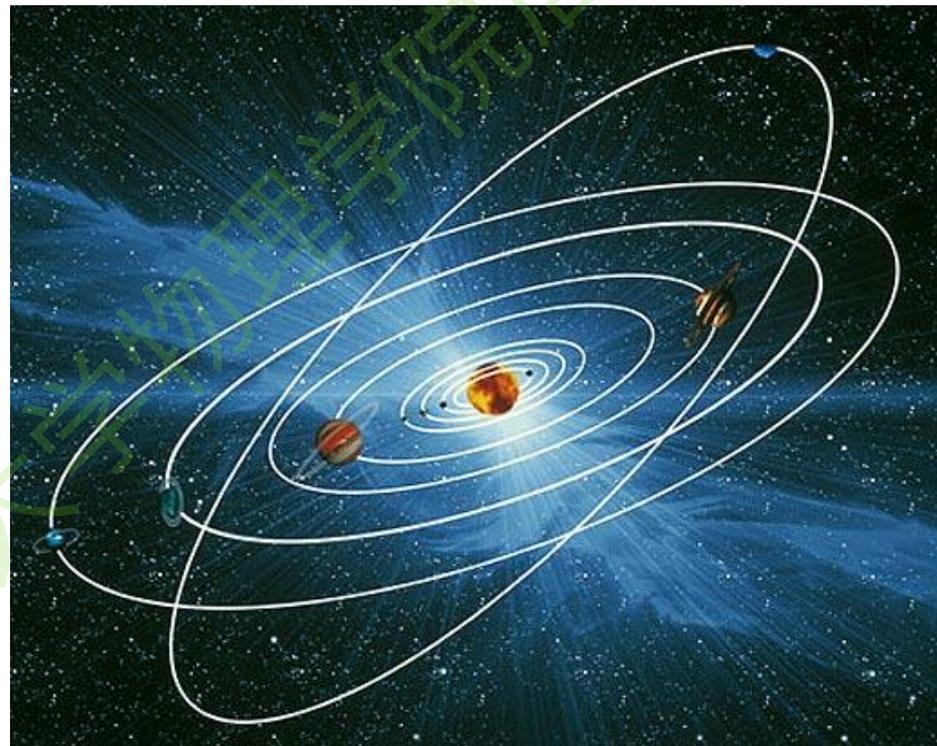
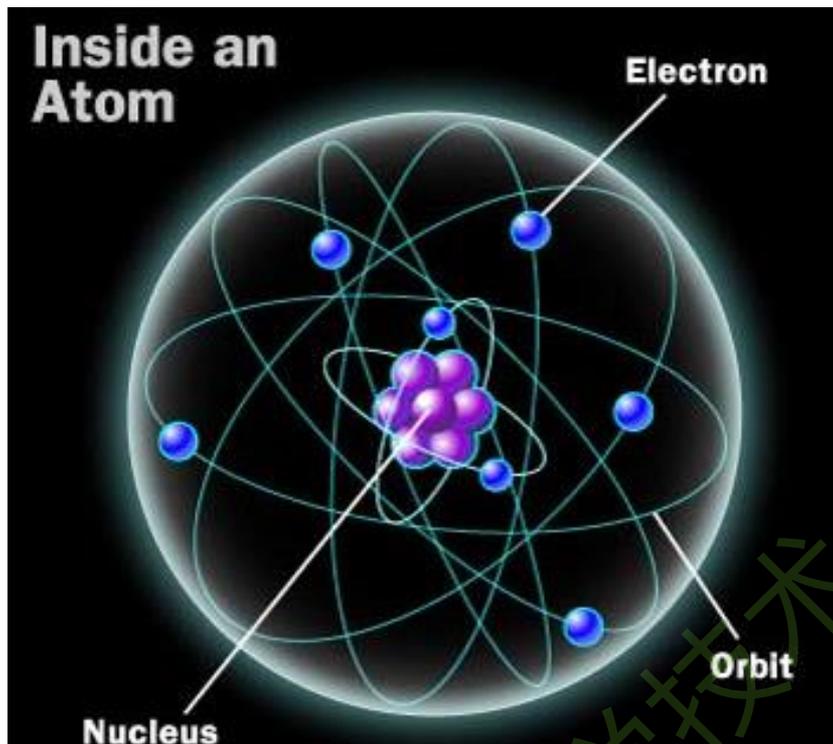
距离 r 的适用范围很大： $10^{-17} - 10^7$ m。

关于库仑定律的讨论

3. 库仑力是**有心力**，大小与**距离平方成反比**
4. 库仑定律是一条实验规律

Author	Date		ε
Cavendish	1773	d	3×10^{-2}
Coulomb	1779	d	1×10^{-2}
Robison	1801	d	6×10^{-2}
Maxwell	1892	d	5×10^{-5}
Plimpton and Lawton	1936	d	2×10^{-9}
Cochran and Franken	1968	d	9×10^{-12}
Bartlett <i>et al</i>	1970	d	1×10^{-13}
Williams <i>et al</i>	1971	d	6×10^{-16}
Goldhaber and Nieto	1968	i	1.7×10^{-16}
Franken and Ampulski	1971	i	4.3×10^{-18}
Lowenthal	1973	i	3.0×10^{-08}
Davis <i>et al</i>	1975	i	3.4×10^{-17}
Crandall	1983	d	3.4×10^{-16}
Ryan <i>et al</i>	1985	i	6.4×10^{-11}
Boulware and Deser	1989	i	1.2×10^{-13}
Chernikov <i>et al</i>	1992	i	3.6×10^{-14}
Fischbach <i>et al</i>	1994	i	4.3×10^{-17}
Lakes	1998	i	6.8×10^{-19}
Schaefer	1999	i	1.8×10^{-12}
Lou <i>et al</i>	2002	i	5.1×10^{-20}

3. 库仑定律与万有引力的对比



一沙一世界
一花一天堂
无限掌中置
刹那成永恒

-- 徐志摩译

To see a world in a grain sand
And a heaven in a wild flower
Hold infinity in the palm of your hand
And eternity in an hour

-- William Blake (1757-1827)

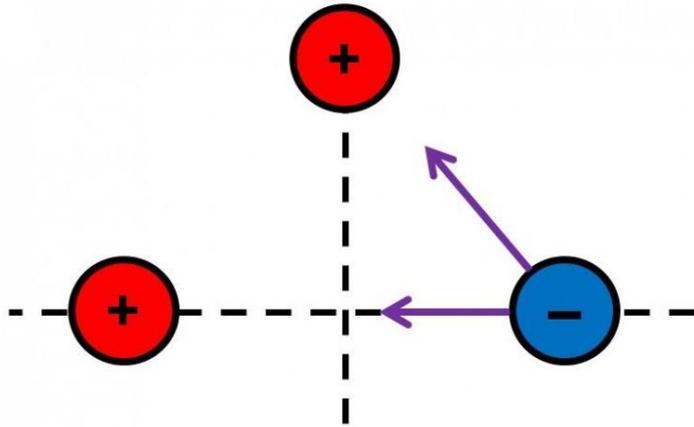
电力与引力的比较

1. 都是自然界的基本力
2. 都遵守平方反比律
3. 作用强度差别很大
4. 万有引力只有吸引力，电力有吸引力和排斥力

电荷与质量的比较

1. 都是物质的基本属性
2. 都遵循各自的守恒定律
3. 质量只有一种，电荷有正、负两种
4. 质量有相对论效应，电荷无相对论效应
5. 电荷有量子性，质量则并无量子性？

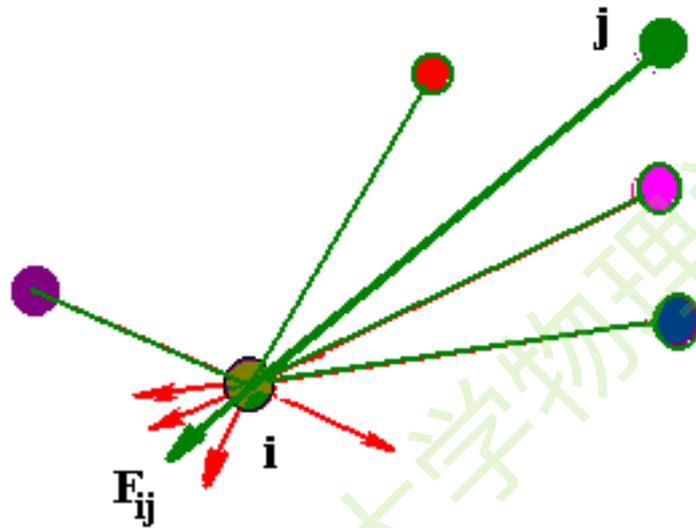
§ 1.2.2 叠加原理



- 两个点电荷间的作用力不因第三个电荷的存在而改变。

- 对多个点电荷系统
 - 每一对点电荷之间的作用力都服从库仑定律
 - 任一点电荷受力为所有其他点电荷**单独**作用的库仑力的**矢量和**。
- 这一结论称为**叠加原理**。

数学表述



$$\vec{F}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}^2} \vec{e}_{ij} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}^3} \vec{r}_{ij}$$

带电体系与“电荷元”

对于带电体系，可将其分割为许多称为“电荷元”的小部分，可当做“点电荷”来处理。

- 体电荷密度： $\rho = \frac{\Delta q}{\Delta V}$ $dq = \rho dV$

- 面电荷密度： $\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}$ $dq = \sigma dS$

- 线电荷密度： $\lambda = \frac{\Delta q}{\Delta l}$ $dq = \lambda dl$

点电荷与带电体系的作用

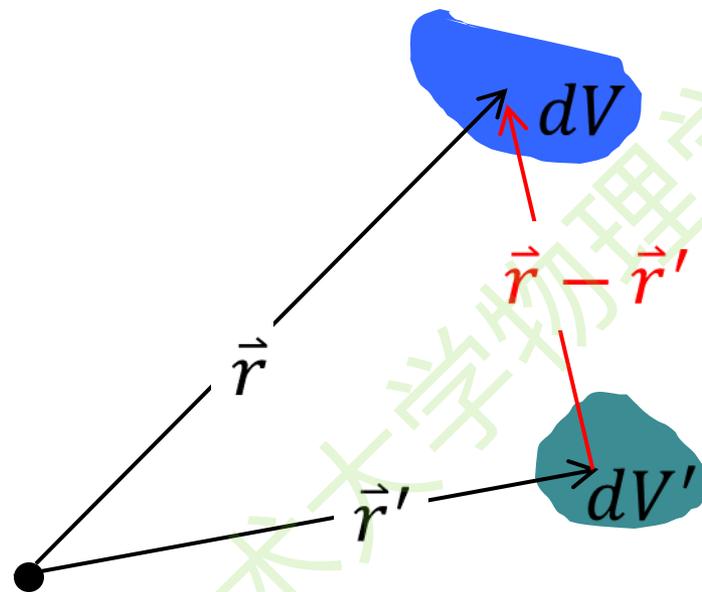
利用叠加原理，可以求体带电体、面带电体和线带电体对点电荷的作用力

$$\vec{F} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \iiint_{V'} \frac{(\vec{r} - \vec{r}')\rho(\vec{r}')dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}$$

$$\vec{F} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \iint_{S'} \frac{(\vec{r} - \vec{r}')\sigma(\vec{r}')dS'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}$$

$$\vec{F} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \int_{l'} \frac{(\vec{r} - \vec{r}')\lambda(\vec{r}')dl'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}$$

带电体系之间的作用



$$\vec{F}_{VV'} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_V \iiint_{V'} \frac{(\vec{r} - \vec{r}')\rho(\vec{r})\rho'(\vec{r}')dVdV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}$$

作业

- 1. 2
- 1. 3
- 1. 6
- 1. 31

中国科学技术大学物理学院唐