

第一章 电力与电场

§ 1-1 电荷与电荷守恒

§ 1-2 材料的电性质

§ 1-3 库仑定律

§ 1-4 电场强度

§ 1-5 高斯定理

§ 1-6 静电场中的导体

§ 1-1 电荷与电荷守恒

一、电的认识过程

早期人们是通过物质的**力效应**来定义它的。公元前600多年，人们就发现琥珀，经过毛皮摩擦后，能吸引轻小物质。



后来人们发现琥珀、金刚石、蓝宝石、硫磺、明矾等经摩擦后都可以吸引轻小物体。

吉尔伯特（1544-1603），对此进行了系统研究，将被摩擦后能吸引轻小物体的物体定义为**“带电体”**，使物体带电的过程称为**“起电”**。吉尔伯特还发明了验电器，用于检验物体是否处于带电状态。

1733年，法国的杜菲指出有两种不同的电荷。同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。他把玻璃摩擦后的电称为“玻璃电”，硬树脂摩擦后带的电称为“树脂电”。

1747年，美国的富兰克林，在杜菲二元电的基础上，根据两种电荷的相消特性，提出了**正电、负电**理论。富兰克林还认为，摩擦起电的原因使电从一个物体转移到另一个物体，而不是创造了电。任何一与外界绝缘的体系中，电的总量是不变的。这其实就是**电荷守恒**的思想。

但是电的本质是什么？这一问题直到近代借助高能物理实验才获得了真正解答。

二、电荷：电磁学最基本的概念

1897年，英国物理学家汤姆孙测出了阴极射线带电粒子的**荷质比**；这种粒子带负电，后来被称为**电子**。

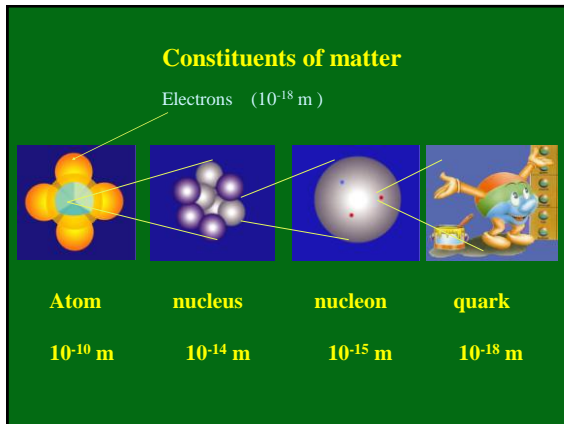


电子的发现者：
J.J. Thomson

近代物理关于电本质的认识

近代物理学的实验揭示了**电荷的物理本质**。电荷是组成物质世界的基本粒子（如电子、质子、 μ 子等等）的众多属性之一，没有脱离基本粒子而单独存在的电荷。

物体带电的多少称为**电量**，用符号 Q 、 q 表示。

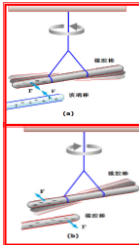


电荷的特性

- (1) **自然界中存在两种电荷**，分别称为正 (+) 电荷和负 (-) 电荷，带电体所带的电量是这两种电荷的代数和。**同号电荷相斥，异号电荷相吸。**

美国科学家富兰克林把在室温下丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷称为**正电荷**；毛皮摩擦过的橡胶棒所带的电荷称为**负电荷**。现在人们都习惯沿用富兰克林的定义。

利用同号电荷相斥，异号电荷相吸的性质可以用实验判断物体带有哪种电荷。



问题：

- 如果物体A、C分别移近B时，都吸引B，你能作出什么判断？

- ①A、C带同种电荷 ②A、C带异种电荷
③三个物体都带同种电荷 ④其中一个物体电中性
⑤以上都不对

- 如果物体A、C分别移近B时，都排斥B，你能作出什么判断？

- ①A、C带同种电荷 ②A、C带异种电荷
③三个物体都带同种电荷 ④其中一个物体电中性
⑤以上都不对

- (2) **电荷是量子化的**，即在自然界里物质所带的电量不是连续变化的，而只能一份一份地增加或减小。

- 实验测得最小的一份电量是电子或正电子所带的电量，称为电子电荷（量），用e表示， $1e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 。

- 电子 -e
- 质子 +e
- 中子 0

- (3) **“电荷对称性”**。一系列近代高能物理实验表明，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。例如，我们有电子和正电子，质子和反质子； π^+ 介子和 π^- 反介子等等。

- (4) **电量是相对论不变量**。即电量与质量不同，与带电物质的运动速度无关。

讨论题：请对比电荷与质量的异同？

三.电荷守恒定律

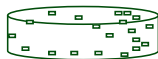
- 1、根据1965年的实验，估计电子的寿命超过 10^{21} 年（比推测的宇宙年龄，140亿年，还要长得多）。
- 2、“起电”过程不产生电荷，只是发生了电荷的转移，起电过程电荷的总量（代数和）不变。
- 3、电中和不是电消失，只是物体不对外显示电力作用。
- 4、对所有的物理、化学过程研究后都发现电荷守恒，而且电量是相对论不变量。

电荷守恒定律

一个孤立系统（与外界不发生电荷交换的系统）的电荷总量（代数和）是保持不变的，它既不能创生，也不会消灭。电荷只能从系统内的一个物体转移到另一个物体，系统的总电量既不随时间而变，也与参考系的选取无关。





四、电荷密度

一个带电体上不同部位带电量不一定相同，需要用电荷密度描述电荷分布。



因为电荷是物质的属性，物质占有三维空间，电荷分布是三维空间分布；但在某些情况下，电荷分布可以简化为面分布、线分布、甚至点分布。



- 体电荷密度: $\rho_e(\vec{r}) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q_e(\vec{r})}{\Delta V}$ 
- 面电荷密度: $\sigma_e(\vec{r}) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta Q_e(\vec{r})}{\Delta S}$ 
- 线电荷密度: $\lambda_e(\vec{r}) = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta Q_e(\vec{r})}{\Delta l}$ 
- 点电荷密度: ? 

五、关于电荷待解之谜

- **电子结构之谜。** 迄今为止的实验和理论都未发现电子的内部结构，都是看成点粒子，但是这样处理会带来 $\rho \rightarrow \infty$ 的问题，则电子必有结构，结构是什么？
- **电子稳定之谜。** 电子有结构，则必然有电荷分布，电荷之间会有强大的静电斥力，是什么力让电子保持为一个整体？
- **电子质子等电荷之谜。** 电子质子质量相差3个数量级，但是带电量却保持高精度相等，为什么？

§ 1-2 物质的电性质

一、导体、绝缘体与半导体

由于不同原子内部的电子数目和原子核内的情况各不相同，由不同原子聚集在一起构成的不同物质的电性质也各不相同，甚至有的差别很大。即使是由相同原子构成的物质，由于所处的环境条件（如温度、压强等）不同，电性质也有差异。

●早在18世纪初就为人们发现金属和丝绸的电性质不同，前者接触带电体时能很快把电荷转移或传导到别的地方，而后者却不能。

●大量实验表明：**不同物质转移和传导电荷的能力可以相差很大。**

●**电阻率**（用符号 ρ 表示）**是可以定量反映物质传导电荷能力的物理量，在数值上等于单位横截面、单位长度的物质电阻。**物质的 ρ 越小，其转移和传导电荷的能力越强。

根据物质转移和传导电荷能力的强弱（或电荷在物质中移动的难易程度），通常人们把物质分为3类：**导体、绝缘体和半导体。**

转移和传导电荷的能力		电阻率 ρ
导体	很好	$10^{-8}\Omega\cdot\text{m} \sim 10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$
半导体		$10^{-6}\Omega\cdot\text{m} \sim 10^6\Omega\cdot\text{m}$
绝缘体	很差	$10^6\Omega\cdot\text{m} \sim 10^{18}\Omega\cdot\text{m}$

(1) 导体

- 转移和传导电荷能力很强的物质，或者说电荷很容易在其中移动的物质；导体的电阻率约在 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m} \sim 10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$ 之间。
- 导体有固态物质，如金属、合金、石墨、人体、地等；
- 有液态物质，如电解液，即酸、碱、盐的水溶液等；
- 也有气体物质，如各种**电离气体**。
- 一类特殊的导体——**超导体**。

(2) 绝缘体

- 转移和传导电荷能力很差的物质，即电荷在其中很难移动的物质；绝缘体的电阻率一般为 $10^6\Omega\cdot\text{m} \sim 10^{18}\Omega\cdot\text{m}$ 。
- 绝缘体同样有固态物质，如玻璃、橡胶、塑料、瓷器、云母、纸等；
- 有液态物质，如各种油；
- 也有气态物质，如未电离的各种气体。

(3) 半导体

- 介于这两者之间的物质；半导体的电阻率约为 $10^{-6}\Omega\cdot\text{m} \sim 10^6\Omega\cdot\text{m}$ 。
- 半导体物质 **Si, Ge, GaP, InSb, InAs, GaSb, GaAs, GaN, SiC**。



硅太阳能电池

超导体

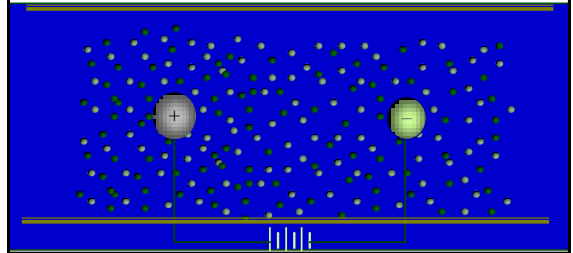
某些物质当**温度降低到某一温度 T_c** 时，它的**电阻率会几乎突然地消失**，这种现象称为超导电性，这类物质称为超导体，温度 T_c 就叫做超导体的**临界温度**。不同的超导体具有不同的临界温度。迄今我们知道大约有**20多种元素，几百种合金和金属化合物**是超导体，它们的**临界温度的范围从 $0.12\text{K} \sim 150\text{K}$** （如钇钡铜氧化物）。

等离子体

等离子体是部分或完全电离的气体，由大量自由电子和正离子以及中性原子、分子组成。从电性质上看，它是导电性能极好的良导体。



等离子体在宏观上是近似电中性的，即宏观尺度上所含的正电荷与负电荷几乎处处相等。如果因为某种因素某局域范围内正电荷或负电荷的偶然集中，其附近的相反电性电荷将立即移动，恢复该区域的电中性。

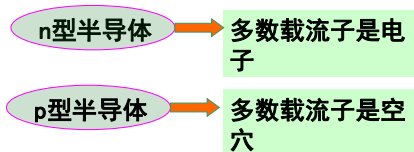


- 在等离子体中，中性原子分子之间的碰撞作用已退居次要地位，整个系统受带电粒子之间Coulomb力作用的支配。
- 等离子体是宇宙物质存在的主要形式，整个宇宙中99%的物质是等离子体。恒星是高温电离形成的等离子体，稀薄的星云和星际物质则是由辐射电离形成的等离子体。

二、物质的电结构

- 物质导电性能差异很大，究其原因，是它们的微观电结构不同，导电性能决定于所含带电粒子（载流子）数量的多少。
- 导体内存在大量可以在导体内自由运动的电子、或离子。
- 绝缘体中，绝大部分电荷都被束缚在组成绝缘体的分子或原子范围内，这种电荷叫束缚电荷，载流子数量很少。

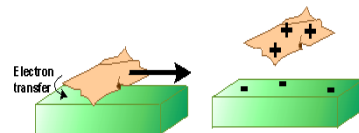
半导体中的载流子是带负电的电子和带正电荷的“空穴”。



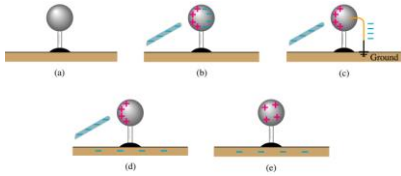
n型半导体和p型半导体结合起来可以构成pn结，利用它可以制成各种半导体器件。

三、接触起电和感应起电

- 接触起电是通过物体紧密接触，实现带电粒子（电荷）的转移，最常见的是摩擦起电。
- 接触起电过程中电荷转移有：电子转移、离子转移以及小块的带电体转移，通常是电子转移。



- 感应起电是带电物体移近导体使其带电的现象。
- 感应起电过程是借助电场对电荷的作用实现的。



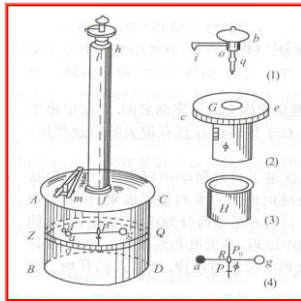
§ 1-3 库仑定律

一、库仑定律

随着科学的发展，电学方面的知识越来越丰富，人类开始思考**电荷之间作用力的大小和方向**这一问题，库仑通过实验得出了电荷之间的作用规律。库仑定律是电磁学发展史上的第一个定量规律，是电学研究从定性进入到定量阶段，是电学史上的一块重要的里程碑。

1. 库仑扭称实验

1785年库仑自行设计制作了一台扭秤，**利用银质悬丝的扭转力的知识**，测量了电荷之间的相互**排斥力**与其距离的关系，建立了库仑定律。



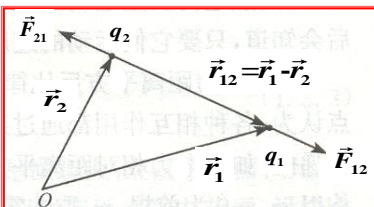
工欲善其事，必先利其器

2. 库仑定律

库仑定律的**精确表述**是：

两个**静止**的**点电荷** q_0 和 q_1 之间的**作用力的大小**与两点电荷电量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比，**作用力的方向**沿着两点电荷间的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸。

如下图，库仑定律可表达为：



$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_0}{r_{12}^2} \vec{r}_{12} = k \frac{q_1 q_0}{r_{12}^2} \hat{r}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

\vec{F}_{12} : q_1 受 q_2 的作用力; \vec{F}_{21} : q_2 受 q_1 的作用力.

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_0}{r_{12}^2} \vec{r}_{12} = k \frac{q_1 q_0}{r_{12}^2} \hat{r}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

k 为**库仑常数**，由**实验测定**并与**单位制有关**。通常将常数 k 写成为 $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$ ，其中 ϵ_0 称为**真空介电常量或电容率**。由实验测定已知电量的两个点电荷在真空中的相互作用力，便可得 k 或 ϵ_0 的值。采用国际单位制(SI)时近似值为： $\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$ ，相应的 k 值为 $k \approx 9 \times 10^9 \text{N m}^2/\text{C}^2$ 。

3. 对库仑定律的几点说明

(1) 电磁学现在常用的单位制是SI单位制，即 MKSA单位制，长度、质量、时间、电流强度是基本量，其余的量是导出量。

(2) 库仑定律适用的对象是点电荷。

点电荷是指几何线度为零的带电体。

(3) 库仑定律成立的条件——两点电荷静止，因此常把库仑力称为静电力。实际上，静止点电荷对运动点电荷的作用力仍满足库仑定律，但是运动电荷对静止电荷的作用力则不满足库仑定律。（？）

(4) 当电荷带入（+、-）符号时，表达式中力的数值为正时表示作用力是斥力，为负时是引力。

(5) 通常表述库仑定律时加上了“真空...”的条件，加这个条件只是为了排除周围电荷对实验测量的干扰。

(6) 库仑定律是目前最精确的实验定律之一。

$$F \propto \frac{1}{r^{2 \pm \Delta}}$$

1971年，威廉士等人实验表明 库仑指数误差：

$$\Delta \leq (2.7 \pm 3.1) \cdot 10^{-16}$$

点电荷模型的说明：

① 点电荷的两个重要参量是 Q 、 \vec{r} ，带电体的形状、大小及电荷分布等因素不考虑。

② 点电荷是个理想模型，真正的点电荷不存在，这儿采用的是抓主要矛盾的科学研究方法。

③ 当带电体的几何尺度远远小于带电体间的距离时，才能采用点电荷模型。

建立定律的归纳法

1. 观察现象

2. 提出问题

3. 猜测

4. 设计实验测量：库仑 $F \propto \frac{1}{r^{2 \pm \Delta}}$ $\Delta \leq 0.04$

5. 提高实验精度：

卡文迪许 $\Delta \leq 0.02$ ；麦克斯韦 $\Delta \leq 5 \cdot 10^{-5}$

普里姆顿和洛顿 $\Delta \leq 2 \cdot 10^{-9}$

威廉士等人 $\Delta \leq (2.7 \pm 3.1) \cdot 10^{-16}$

4. 库仑定律与万有引力定律的比较

相同点：

大小都与距离平方成反比，都是径向力，都是长程力。

不同点：

(a) 电荷有正、负两种，电力可以是斥力也可以是引力，而对质点来说，它们之间只有引力，没有斥力。

(b) 静电之间的相互作用可以屏蔽，而质点间的引力相互作用是无法屏蔽的。

(c) 带电粒子间的库仑力远大于它们间的万有引力。

例：氢原子中电子和质子间的距离 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ ，
 质子质量 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，
 试比较此两粒子间万有引力和静电力的大小。

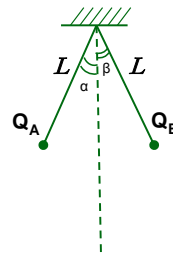
解：万有引力：

$$F_g = \frac{Gm_p m_e}{r^2} = \frac{6.7 \times 10^{-11} \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 3.7 \times 10^{-47} \text{ (N)}$$

静电力 $F_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ (N)}$

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.2 \times 10^{39}$$

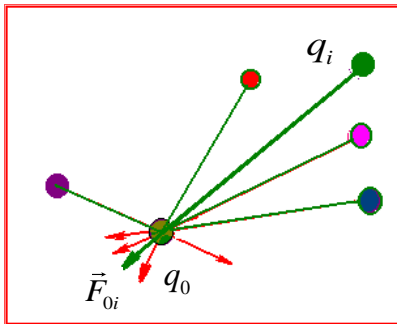
在微观粒子的相互作用中，万有引力与静电力相比远小得多，完全可以略去。



1) 两球质量、带电量都相等时， α 、 β 之间的关系？

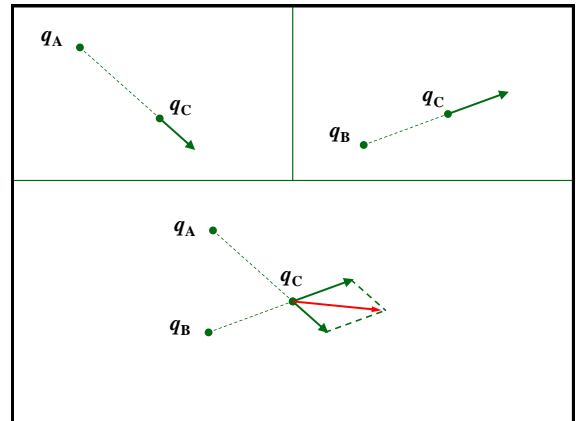
2) 两球质量相等，带电量不等时，设 $Q_A > Q_B$ ， α 、 β 之间的关系？

二、叠加原理



点电荷体系之间的库仑力

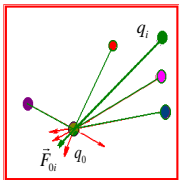
因为其他电荷的存在而变化？
 两个点电荷之间的作用力会不会



1. 叠加原理：

两个静止点电荷之间的相互作用力不因第三个静止点电荷的存在而改变，一个电荷所受的静电力等于其它电荷单独存在时对其作用的矢量和。

注意是矢量叠加！

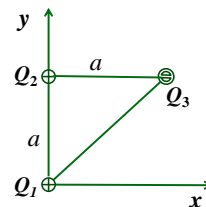


$$\vec{F}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q_0 \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{|\vec{r}_0 - \vec{r}_i|^3} (\vec{r}_0 - \vec{r}_i)$$

\vec{r}_i : q_0 的位置矢量，

\vec{r}_i : q_i 的位置矢量。

例： $Q_1=Q_2=e$, $Q_3=-2e$, 求 Q_3 受力。



解: $\vec{F}_{31} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_3}{r_{31}^2} \hat{r}_{31}$

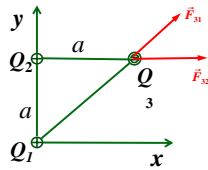
$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-2e^2}{2a^2} \left(\frac{\vec{i} + \vec{j}}{\sqrt{2}} \right)$$

$$= -\frac{1}{4\sqrt{2}\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a^2} (\vec{i} + \vec{j})$$

$$\vec{F}_{32} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_3}{r_{32}^2} \hat{r}_{32} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-2e^2}{a^2} \vec{i} = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a^2} \vec{i}$$

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32} = -\frac{1}{4\sqrt{2}\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a^2} (\vec{i} + \vec{j}) - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a^2} \vec{i}$$

$$= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{a^2} \left(\frac{4 + \sqrt{2}}{2} \vec{i} + \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{j} \right)$$

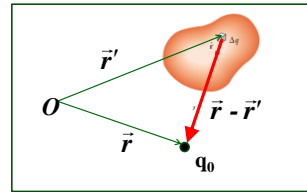


2. 带电体系对静止点电荷的作用力

利用叠加原理来求带电体系对点电荷 q_0 的作用力;

体电荷密度为 $\rho_e(\vec{r}')$ 的带电体V:

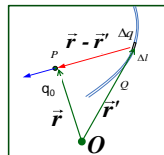
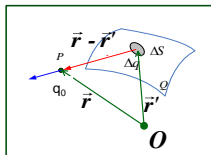
$$\vec{F} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \iiint_V \frac{\rho_e(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} (\vec{r} - \vec{r}') dV'$$



同理, 带电面和带电曲线对点电荷 q_0 的作用力分别为:

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

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



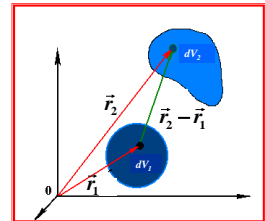
3. 带电体系之间的作用力

设有体积为 V_1 、电荷密度为 $\rho_1(\vec{r}_1)$ 和体积为 V_2 、电荷密度为 $\rho_2(\vec{r}_2)$ 的两个带电体, 则两个带电体之间的库仑力为:

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_{V_1} \iiint_{V_2} \frac{\rho_1(\vec{r}_1) \rho_2(\vec{r}_2)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) dV_1 dV_2 = -\vec{F}_{12}$$

式中 \vec{F}_{21} 为带电体2受带电体1的作用力,

\vec{F}_{12} 为带电体1受带电体2的作用力。



课后作业

1. 用3句话总结这节课的内容,

下次课堂提问检查。

2. 一电荷 Q 均匀分布在半径为 a 的球内, 在距离球心 $b(b>a)$ 处有一点电荷 q , 求 Q 对 q 的库仑作用力。

3. 书上习题:

