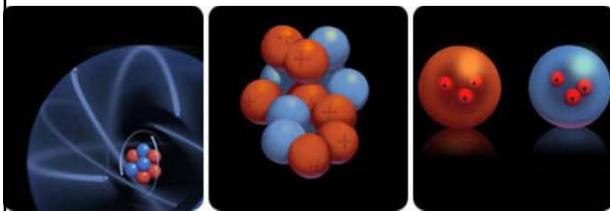


第一章 电力与电场



1

§ 1.1.2 摩擦起电



2

电荷是什么？

- ◆ 一切电和磁的现象都起源于**物质具有电荷的属性**；
- ◆ 电现象起源于**电荷**；
- ◆ 磁现象起源于**电荷的运动**；
- ◆ 没人能说出电荷是什么，但能确定电荷是如**何相互作用的**。



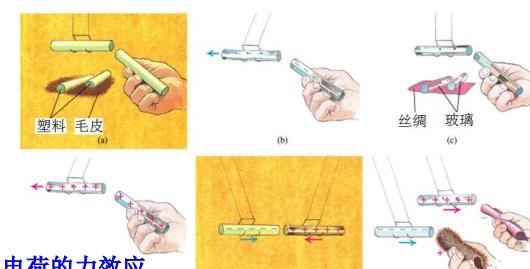
3

1. 早期电荷的定义



- ◆ 早期通过**物质的力效应**来定义电荷：经摩擦后的物体具有**吸引轻小物体的性质**。
- ◆ **任何物体本身都有电荷**，多数情况下它们所带正、负电荷的数量相等，总电量 $Q=0$ 。
- ◆ 带电体指物体中的正、负电荷之和 $\Sigma Q \neq 0$ 。
- ◆ **摩擦起电的物理机制**：外界(摩擦)提供能量，激发部分电子脱离原子，电子被**转移**到另一个物体或真空中，使得物体总电量不为 0。

4



电荷的力效应

- ◆ 实验表明：
- 用毛皮摩擦过的橡胶棒之间**相互排斥**；
- 用丝绸摩擦过的玻璃棒之间**相互排斥**；
- 用毛皮摩擦过的橡胶棒与用丝绸摩擦过的玻璃棒之间**相互吸引**。

电荷-电荷间的相互作用

5

- ◆ 实际上摩擦起电是一个很复杂的过程，两种物体摩擦后带正电荷还是负电荷是由许多因素决定：

- 表面的杂质层；
- 物体的温度、湿度、气压；
- 物体表面的粗糙度及其他表面特性。

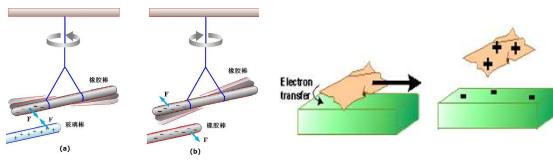
如玻璃棒比较粗糙 ($\mu > 0.18$) 或温度比较高时，经丝绸摩擦后，玻璃棒不带正电，而是带负电。

6

2. 两种电荷

1747年美国科学家富兰克林定义：

- 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**。
- ◆**自然界只有两种电荷：正电荷和负电荷。**



- 1736年，当选为宾夕法尼亚州议会秘书。
- 1737年，任费城副邮务长。
- 从1757到1775年，他几次作为北美殖民地代表到英国谈判。
- 独立战争爆发后，他参加了第二届大陆会议和《独立宣言》的起草工作。
- 1776年，已七十高龄的富兰克林又远涉重洋出使法国，赢得了法国和欧洲人民对北美独立战争的支援。
- 1787年，他积极参加了制定美国宪法的工作，并组织了反对奴役黑人的运动。

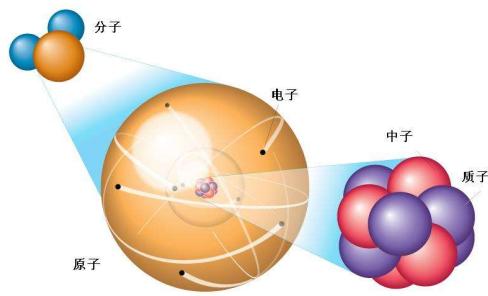


富兰克林

- 1706年1月17日，富兰克林出生在北美洲的波士顿。他的父亲原是英国漆匠，当时以制造蜡烛和肥皂为业，生有十个孩子，富兰克林排行第八。
- 1723年富兰克林离开了波士顿，到费城的基末尔印刷所和英国伦敦的帕尔未和瓦茨印刷厂当工人。
- 1727年秋，富兰克林在费城和几个青年创办了“共读社”，组织了小型图书馆，帮助工人、手工业者和小职员进行自学。每周五晚上，讨论有关哲学、政治和自然科学等问题。
- 通过刻苦自修，富兰克林成为一个学识渊博的学者和启蒙思想家，在北美的声誉日益提高。在他的领导下，“共读社”几乎存在了四十年之久，后来发展为美国哲学学会，成为美国科学思想的中心。

8

§ 1.1.3 物质结构和电荷



11

富兰克林名言



- ◆ 诚实和勤勉，应该成为你永久的伴侣。
- ◆ 我未曾见过一个早起、勤奋、谨慎、诚实的人抱怨命运不好。
- ◆ 良好的品格，优良的习惯，坚强的意志，是不会被假设所谓的命运打败的。
- ◆ 一个人失败的最大原因，就是对于自己的能力不敢充分信任，甚至自己认为必将失败无疑。
- ◆ 读书使人充实，思考使人深邃，交谈使人清醒。
- ◆ 没有准备的人就是准备失败。
- ◆ 如果有什么需要明天做的事，最好现在就开始。
- ◆ 平庸的人最大缺点是常常觉得自己比别人高明。

10

一、电子的发现及其电荷测量

1. 电子的发现

- ◆ 1891年，英国斯通尼将电的自然单位取名为“electron”。
- ◆ 1897年，汤姆逊 (J.J.Thomson) 从实验上认定阴极射线是**负电荷粒子**，且阴极射线粒子的**荷质比** e/m 约为氢离子(质子)的荷质比的2000倍 (现在精确值为1840)，并指出这种带负电的粒子是一切原子的基本成员之一。
- ◆ 汤姆逊荣获1906年诺贝尔物理学奖。

12

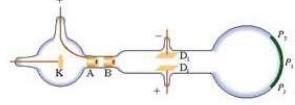


1897年，汤姆逊发现电子

实际上在汤姆逊之前，1887年考夫曼，1890年舒斯特，都曾得到过类似实验结果。

但由于不相信阴极射线会是由粒子组成的，特别比原子还小很多，认为不可思意，没有勇气发表得到的结果。

13

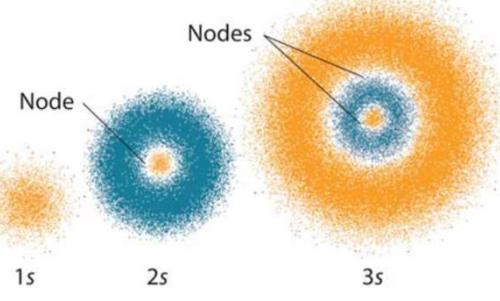


2. 电荷的测量

- ◆ 1898年，斯托克斯测量电荷的最小单位是 $e=5 \times 10^{-10}$ 静电单位(esu)
- ◆ 1909-1913年，美国科学家密立根(R.A.Millikan)用油滴实验，测定电荷的最小单位是
 $e=4.774 \times 10^{-10}$ 静电单位
- ◆ 密立根由此荣获1923年诺贝尔奖，
- ◆ 目前测量的电子电量为 $e=1.6021892(46) \times 10^{-19}$ C

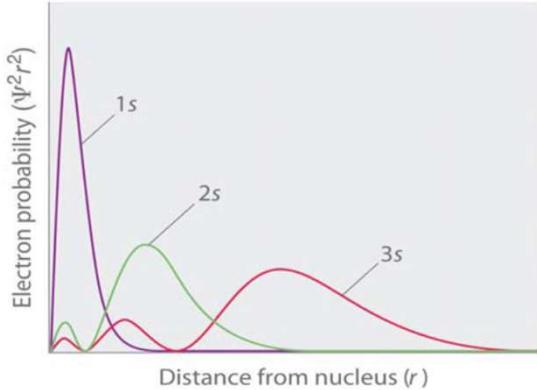
(注：静电单位是电磁学建立初期采取的一种单位制。
1 静电单位 = $3.33564096 \times 10^{-10}$ 库伦)
R. A. Millikan (1913) "On the Elementary Electric Charge and the Avogadro Constant", *Physical Review*, series II, 2, pp. 109-143

14



Probability distributions for 1s, 2s, and 3s orbitals

15



16

二、点电荷

1. 电子是点电荷

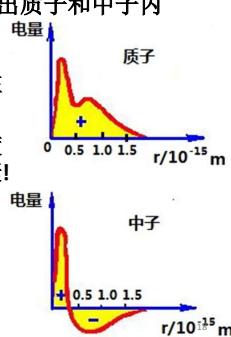
- ◆ 实验证实，电子的电荷集中在半径小于 10^{-18} m的小体积内。
- ◆ 电子被当成是一个无内部结构、而有有限质量(m_e)和电荷(q)的“点”。

17

2. 质子和中子内的电荷分布

通过高能电子束散射实验可测出质子和中子内部的电荷分布。

- ◆ 质子中只有正电荷，集中在半径约为 10^{-15} m的体积内。
- ◆ 质子与电子的电量相等程度达 10^{20} 分之一，这仍是一个谜！
- ◆ 中子内部也有电荷分布，靠近中心为正电荷，靠外为负电荷；正负电荷电量相等，所以对外不显带电。



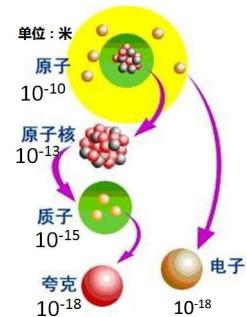
3. 电磁学意义上的点电荷

- 当一个带电体本身的线度 l ，比研究的问题中所涉及的距离 d 小很多时 ($l \ll d$)，该带电体的形状与电荷在其上的分布状况均无关紧要，该带电体就可看作一个带电的点，叫点电荷。
- 点电荷是个相对的概念**
 - 带电体的线度比问题所涉及的距离小多少时，它才能被当作点电荷，这要依问题所要求的精度而定。
 - 在宏观意义上谈论电子、质子等带电粒子时，完全可以把它们视为点电荷。

19

4. 电荷是物质的基本属性

- 电荷是基本粒子(如电子、质子、 μ 子等)的一种属性，电荷不能离开这些基本粒子单独存在；
- 即电荷是物质的基本属性；
- 不存在不依附于物质的“单独电荷”！



20

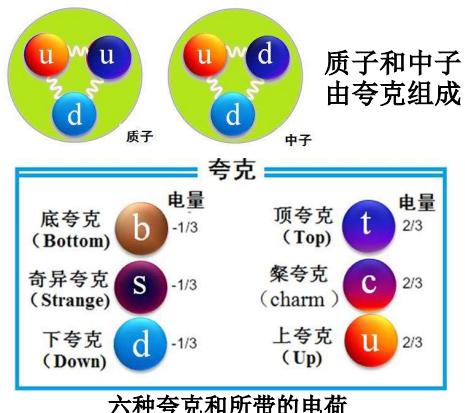
5. 电荷的量子性

- 实验证明，在自然界中，物质所带的电量不可能连续变化，只能一份一份地增加或减小，即电荷总是以一个基本单元的整数倍出现，电荷的这个特性叫做电荷的量子性。
- 电荷的基本单元就是一个电子所带电量的绝对值， $Q=Ne$ (N, 整数)

21

- 近代物理从理论上预言了基本粒子由若干种夸克或反夸克组成，每个夸克或反夸克可能带有 $\pm 1/3e$ 或 $\pm 2/3e$ 的电量。
- 然而至今以单独存在的夸克尚未在实验中发现，即它们被禁闭在强子(受强相互作用的亚原子粒子)内部，不能脱离强子自由运动。
- 带分数电荷的粒子的发现，不过是把基本电荷的大小缩小到目前的 $1/3$ ，电荷的量子性依然不变。

22



23

6. 电荷的对称性—反粒子

1928年狄拉克预言反电子——正电子存在



24

- 我国物理学家，中国科学技术大学近代物理系首任系主任赵忠尧院士，于1929年就在实验中发现硬 γ 射线的反常吸收、以及伴随出现的“特殊辐射”，这是最早观察到的正、负电子对产生和湮没的现象。
- 1932年Anderson在宇宙射线中发现正、负电子对的轨迹。
- Anderson因正电子(e+)的发现，获得了1936年的诺贝尔奖。



25

- 近代高能物理发现，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^- 介子等等。
- 产生正、负电子对；或正、负电子对湮没过程，满足电荷守恒、能量守恒和动量守恒。



正、负电子对湮没



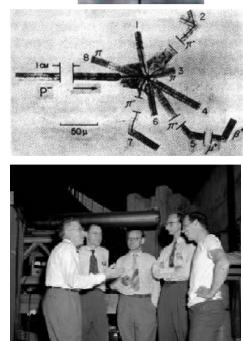
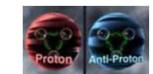
26

也许宇宙中还有一个反你，你遇到反你时，
小心不要握手！

27

反质子的发现

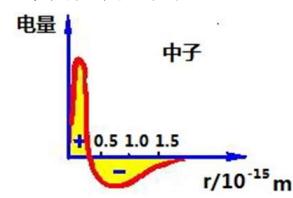
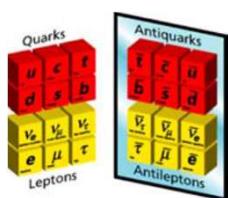
1955年Segrè 和 Chamberlain利用质子同步稳相加速器，把质子加速到6.2GeV，打到铜靶上，用磁装置和切连科夫计数器进行检测，从照相乳胶所得的爆炸性核蜕变“星形”径迹记录中，判断出是反质子轰击原子核的事件，从而证明了反质子的存在。



28

反中子的发现

- 仅一年后，B. Cork, O. Piccione, W. Wenzel and G. Lambertson 宣布发现了反中子。

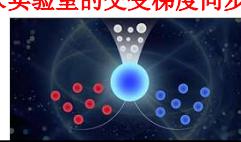


虽然中子没有电荷，但中子有自旋和磁矩，且构成中子的夸克是电荷的，所以中子也有反中子。

29

反原子核的发现

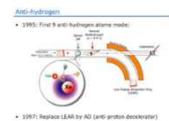
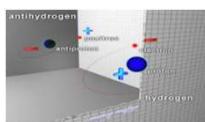
- 1965年，两个研究组同时发现反氘(D)核[一个反质子+一个反中子]。
- 一个是由Antonino Zichichi领导的、利用在CERN的质子同步加速器得到；
- 另一个是由Leon Lederman领导的、利用纽约Brookhaven国家实验室的交变梯度同步加速器得到。



30

反原子的发现

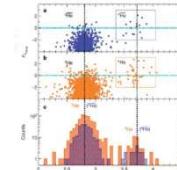
- 1995年末在CERN，第一次由德国和意大利物理学家得到了反原子。
- 尽管仅仅得到了9个反原子，还是轰动了世界，成为许多世界性报纸的头条新闻。



31

STAR: 反物质4He核合成

- 由中国科学家参加的相对论重离子对撞机(RHIC)-螺旋管径迹探测器(STAR)国际合作组，探测到氦核的反物质粒子——反物质氦4核。
- 这种新型粒子是迄今为止所能探测到的最重的反物质原子核(2012, Nature)。
- STAR发言人说：科大师生在飞行时间探测装置(TOF)的研发、建造和数据分析中都起了关键性的作用。



32

欧洲核子研究中心(CERN)



1951年起，欧洲11个国家开始筹划成立欧洲核子研究中心CERN，1954年9月CERN正式成立。CERN位于法国和瑞士交界处的日内瓦城附近，现已有26个成员国，成为世界上最大的粒子物理研究中心。CERN的经费由各成员国分摊，CERN的研究人员达9000人，是目前国际最大的核子研究中心

33



超级质子同步加速器SPS 隧道 低能反质子环LEAR

34

7.电子仅仅是实物粒子吗？

- Rutherford提出了原子的核模型；
- Bohr建立了原子的玻尔理论；
- 1924年，法国物理学家 deBoglie提出电子具有波粒二象性，奠定了量子力学的基础；
- 此后，美国的Davisson和Germer、英国Thomson分别独立地发现了电子在晶体上的衍射现象，证明了电子不仅是实物粒子，还具有波动性。



35

§ 1.1.4 电荷守恒定律

1. 电荷守恒律

对一孤立系统，如果没有净电荷出入其边界，则该系统的正、负电荷电量的代数和将保持不变。或者说系统中总电荷有增加（或减少）时，那么必定有等量的电荷进入（或离开）这一系统。

$$\iint_S \vec{j} \cdot d\bar{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \cdot dV$$

j 电流密度：单位面积流过的电流
 ρ 电荷密度：单位体积中的电荷

$$j = \frac{I}{S} \quad \rho = \frac{Q}{V}$$

$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \cdot dV$

通过量 $\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \nabla \cdot \vec{j} dV$

高斯散度定理：矢量场散度的体积分等于矢量场在包围该体积的闭合面上的法向分量沿闭合面的面积分

散度 $\nabla \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$

$\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ j 电流密度, ρ 电荷密度

37

- 宏观物体的带电、电中和、及物体内的电流等现象实质上是由于微观带电粒子在物体内运动的结果。
- 因此，电荷守恒实际上也就是在各种变化中，系统内粒子的总电荷数守恒。

局部电荷守恒：在每一点，电荷守恒

广义电荷守恒：在每一个区域，电荷守恒

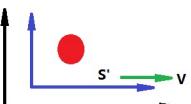
38

2. 电荷守恒律的一些讨论

(1) 电荷守恒定律是物理学的基本规律

- 电荷守恒定律是一切宏观过程和一切微观过程都必须遵循的基本规律，它在所有的惯性系中都成立；
- 且在不同的惯性系内的观察者对电荷进行测量所得到的量值都相同，即电荷是一个相对论性不变量：

$$Q = Q'$$



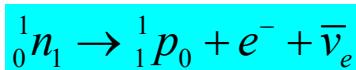
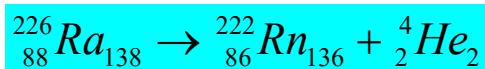
这是规范不变的必然结果

39

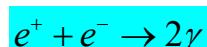
(2) 电荷守恒定律与电荷的量子属性有关

- 假设 π 介子的电荷不是 e 的整数倍，例如等于 $0.73e$ ，那么要平衡衰变过程的方程、并保持电荷守恒就十分困难。
- 实际上，依据现有的衰变过程的理论，不但在衰变前后，甚至在衰变过程的每一个中间阶段，电荷都是守恒的。
- 因此，可以设想单个电荷是一种不可再分割的单位，具有量子属性。
- 单个电荷只能从一个粒子转移给另一个粒子，而决不会削减下来或者分割开来。

40

中子 \rightarrow 质子+电子+反中微子(β 衰变)镥 \rightarrow 氡+氦(α 衰变)

正负电子对湮没



每一步都遵循电荷守恒

(3) 电荷守恒定律还与电子的稳定性有关

- 电子是最轻的带电粒子，它不能衰变。假如电子发生衰变，那一定要违反电荷守恒定律。
- 如果电荷守恒定律基本上有效，而不是完全有效，则电子的寿命将是有限的。
- 1965年有人做了一个实验，估计出电子的寿命超过 10^{21} 年(比推测的宇宙年龄 10^{11} 年还要长得多)。

42

(4) 电子电量与质子电量精确相同，这对于宇宙存在的形式是十分重要的

- 如果两者稍有差别，虽然也可以形成稳定的“原子”与“分子”，但却是非电中性的。由于电力比引力大39个量级，其间的电斥力将超过引力，从而不可能形成星体，各种生命和人类也就失去了赖以形成的基础。
- 由于质子质量比电子质量大千余倍，使原子中的原子核几乎不动，这才得以形成各种有序结构的物质和高度有序的生物。如果质子质量与电子质量相差无几，则各种有序物质与生物都将不复存在。
- 由此可见，这些基本物理常量以及其间的关系，正是宇宙能以当今形式生存发展的根据，或者反过来说，基本物理常量以及其间的关系，正是宇宙基本特征的描绘与反映。

43



电荷守恒是宇宙能以当今形式生存发展的根据

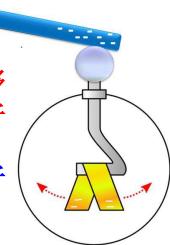
44

§ 1.1.5 接触导电和感应导电

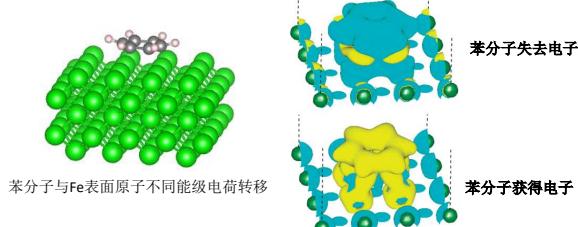
电中性物质带电方式主要有两种：接触带电和感应带电。

1. 接触带电

- 定义：通过接触而带来电荷的转移
- 电荷转移方式：电子的转移、离子的转移、带电荷材料的转移。
- 多数情况下电荷的转移是通过电子的转移进行的。
- 摩擦带电属于接触带电。

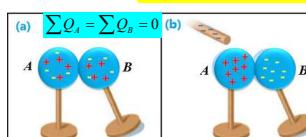


- 接触带电是一个复杂的微观过程，涉及组成材料的原子体系的能级和表面功函数(从固体中取走一个电子到达真空中必须做的功)。
- 研究表明，绝缘材料与不同的金属相接触后，其电子的转移过程是不一样的。

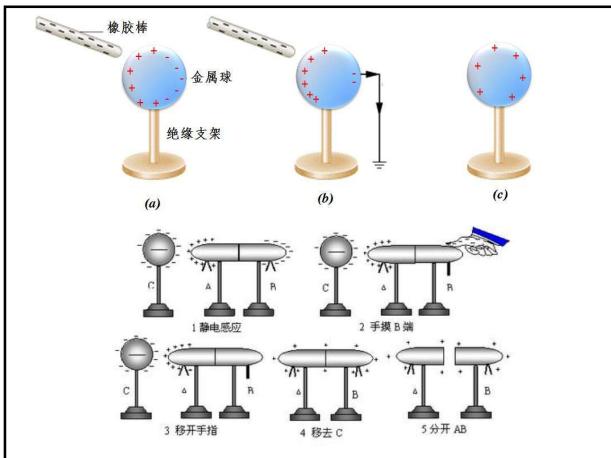


2. 感应带电

$$\sum Q_A > 0, \sum Q_B < 0$$



- 将带电体移近不带电导体，可以使导体带电，这种现象叫静电感应。
- 利用静电感应使物体带电，叫感应带电。
- 如图，两个中性的导体球A、B相互接触，用一个摩擦后的橡胶棒(带负电)靠近A，则由于金属中的自由电子被排斥，**A球带正电，B球带负电**，两者电荷数量相等。两球分开后，依然如此。



§ 1-2 库仑定律

§ 1.2.1 库仑定律 Coulomb's law

一、库仑定律



(Coulomb 1736-1806)

50

1. 库仑及他的扭秤实验

(1) 库仑定律建立的基础

- ◆ 十六世纪工艺、航海、军工的发展，极大地有利于自然科学的研究，也促进人类从理论高度探索电和磁。
- ✓ 制造了摩擦起电机；
- ✓ 明白了电荷可分为正、负电两种；
- ✓ 弄清了雷雨和闪电原理，将天电和地电统一起来；
- ✓ 掌握了电荷转移及储存方法，制成了莱顿瓶；
- ✓ 认识到电荷守恒定律等。

51

- ◆ 1750年前后，德国科学家埃皮诺斯发现，当发生相互作用的电荷之间的距离缩短时，两者之间的吸引力和排斥力便增加，遗憾的是他没有继续研究其定量规律。
- ◆ 1766年，德国科学家普利斯特利用一系列的实验证明，当中空的金属容器带电时，除了靠近开口的地方外，金属容器的内表面上没有任何电荷，在内部的空气中也没有任何电力。
- ◆ 1767年，普利斯特提出了一个猜测：“难道我们就不可以认为电的吸引力遵从与万有引力相同的规律吗？”但是，普利斯特仅仅停留在猜测上，而没有作深入一步的研究。

52

- ◆ 著名的英国科学家卡文迪许，完成了一系列静电实验，证明空腔内表面不带电，据此推断电力与距离的平方成反比关系。但是这些成果没有公开发表，直到他去世后很久，1879年才由麦克斯韦整理、注释出版了他生前的手稿，其中记述了平方反比定律。
- ◆ 由此可见，在这个时期，人类逐步把电学的研究推进到定量的、精确的科学境地，为库仑定律的建立奠定了基础。

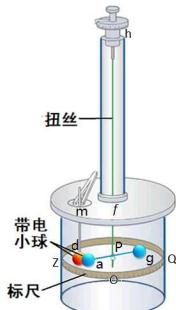
如果我看得更远一点的话，是因为我站在巨人的肩膀上
——牛顿

53

(2) 库仑的扭秤实验

- ◆ 库仑(C.A.de Coulomb)早年是一名军事工程师，督造了若干年的防御工事，正是这一工作，使他对科学产生了兴趣，开始对扭力进行系统的研究。
- ◆ 1781年，由于有关扭力的论文，当选为法国科学院院士。在1784年递交科学院的一篇论文中，他通过实验确立了决定金属丝的扭力定律，发现这种扭力正比于扭转角度，并指出这种扭力可用来测量 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，测量了电荷之间的相互作用力与其距离的关系，于1788年建立了库仑定律。

54



- 实验开始时，首先调整零点：即让指针向调到扭力计刻度上的零点，调整玻璃盖板的位置，使孔m对准刻度ZOQ的零点；然后转动玻璃管f上的整个扭力计，直到细杆ag与刻度ZOQ上的零点成一条线为止，也就是银丝在无扭力时使球a的中心对准零点。
- 再按图所示，使球d与球a接触。库仑使一枚插在绝缘的细棒上的大头针带上电，然后把它伸到孔m里，接触d球，于是使d球与a球带上了同种等量的电荷。由于相互排斥，a、d将离开一段距离。转动旋钮b，改变银丝扭转角（即改变扭力），可改变a、d两球间的距离。

55

库仑作了三次数据记录：

- 令两小球相距36个刻度；银丝扭转36°
- 令两小球相距18个刻度；银丝扭转144°
- 令两小球相距8.5个刻度；银丝扭转575.5°

库仑分析出两小球间距之比约为 **1 : 1/2 : 1/4**，而银丝扭转角之比约为 **1:4:16**。

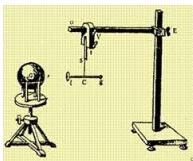
- 库仑还作了一系列实验，但共同的结果使库仑得出结论，两个带同种电荷的小球之间的相互排斥力和它们之间的距离的平方成反比。

56

异号电荷之间引力扭秤实验困难

- 在同号电荷间斥力成功后，库仑又开始异号电荷之间引力扭秤实验，实验装置相同，但其平衡是不稳定的，1785年库仑在一篇论文中指出，用扭秤实验十分困难，也不精确。
- 为此，库仑设计了电引力单摆实验，获得了满意的结果。
- 库仑实验结果的精度为：

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^{2+\delta}} \quad (\delta < 0.04)$$



57

2. 库仑定律

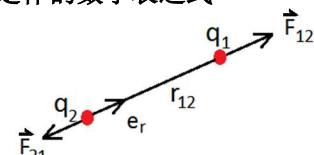
(1) 库仑定律的表述

带电体之间作用力的大小和方向与带电体的几何形状、电荷的种类以及电量的多少等因素有关。库仑定律主要内容是：

- 同号电荷相互排斥，异号电荷相互吸引；
- 作用力沿两点电荷的连线；
- 力的大小正比于每个点电荷电量的多少；
- 力的大小反比于两点电荷之间距离的平方。

58

库仑定律的数学表达式



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

\vec{F}_{12} : q_1 作用在 q_2 上的力
 \vec{F}_{21} : q_2 作用在 q_1 上的力

59

(2) k 值的确定

- 库仑定律中的比例系数 k 由实验测定，它的数值、量纲与单位制的选择有关。
- 在SI制中，力的单位是N(牛顿)，电量的单位是C(库仑)， $1\text{C(库仑)}=1\text{A}\cdot\text{s(安培}\cdot\text{秒)}$ 。
- 设两点电荷的电量 $q_1=q_2=1\text{ C}$ ，在真空中相距 $r_{12}=1\text{ m}$ ，力用 N 量度，这样确定的 k 值为：
 $k=8.987551787\times10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \cong 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$
- 由 $k=1/4\pi\epsilon_0$ 可以确定 ϵ_0 的值，即真空介电常数
 $\epsilon_0=8.85418782 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$

60

二、关于库仑定律的讨论

(1) 库仑定律适用对象是点电荷

- 点电荷是尺度为零($r=0$)的电荷，自然界中并不存在这种理想的点电荷。
- 实际问题中，只要带电体本身的线度(l)远小于它们间的距离(d)，即 $l \ll d$ ，就可以当作点电荷来处理。
- 宏观意义上谈论电子、质子等带电粒子时，可将它们当做点电荷。

61

(2) 库仑定律成立的条件是真空和静止？

- 真空条件：是为了除去其他电荷的影响、以及因周围的感应和极化等因素的影响。周围有其他电荷存在时，两电荷之间的电力仍然满足库仑定律，所以这个条件并非必要。
- 静止条件：是指两电荷相对静止，且相对观察者静止，因此库仑力场称为静电力。
- 这个条件可以放宽成：静止源电荷对运动电荷的作用力，但不能推广到运动电荷对静止电荷的作用力，因为运动电荷的电场会发生变化。

62

(3) 两静止电荷间的作用是有心力

- 有心力的大小与电荷间的距离服从平方反比律。
- 静电场的基本性质正是由静电力的基本特性决定的。

(4) 库仑定律是一条实验定律

- 在库仑时代，测量仪器的精度较低（即使在现代，直接用库仑的实验方法，所得结果的精度也是不高的）；
- 但是库仑定律中静电力对距离的依赖关系，即平方反比律，却有非常高的精度。
- 1971年的实验结果是 $\delta < 2 \times 10^{-16}$ 。

63

(5) 库仑定律中 r 值的范围很大

- 虽然在库仑的实验中， r 只有若干英寸，但近代物理的实验表明， r 值的数量级大到 10^7m 而小到 10^{-17}m 的时候，平方反比律仍然成立。
- 实际上库仑力是长程力，理论表明库仑力比 10^7m 还要大很多。

64

(6) 库仑定律的重要性

电力平方反比律与光子静止质量 m_γ 是否为零有密切关系。

- ❶ 近代观点认为，各种相互作用都是某种粒子来传递的（近距作用），其中电磁相互作用就是通过光子来传递的。
- ❷ 如果电力平方反比律出现偏差，即 $\delta \neq 0$ ，将导致光子静止质量 $m_\gamma \neq 0$ ，则电磁力为非长程力，反之，如果 $m_\gamma = 0$ ，则 $\delta = 0$ 。因此，光子静止质量与电力平方反比律偏离平方的修正数 δ 有关。

65

❸ 现有的物理理论均以 $m_\gamma = 0$ 为前提。如果 $m_\gamma \neq 0$ ，即使十分微小，也会给物理学带来一系列原则问题。

- 电磁场的规范不变性被破坏，使电磁学和电动力学的一些基本性质失去了依据；
- 电荷将不守恒；
- 光子偏振态将发生变化，这将影响光学；
- 黑体辐射公式要修改，会出现真空色散，即不同频率的光波在真空中的传播速度不同，从而破坏光速不变；

总之，“后果”是很严重的。

66

- 由于光子静止质量 m_γ 是否严格为零至关重要，人们不断采用各种方法来确定它的下限，迄今为止，用天体物理的磁压法得出的 m_γ 的最强限制为

$$m_\gamma < 10^{-60} \text{ g}$$

- 电子的质量 $m_e \approx 10^{-28} \text{ g}$ ，可见 m_γ 与 m_e 相比是极小的，在许多问题中可以忽略不计。
- 尽管如此， m_γ 是否严格为零仍引起广泛的关注。

67

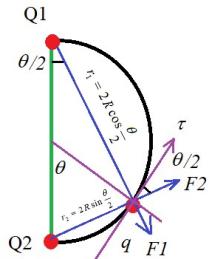
【例1】带电量为 Q_1 和 Q_2 的两正点电荷，分别置于半径为 R 的光滑绝缘圆环直径两端，固定不动。直径右侧的圆环上有一带电量为 q ($q > 0$) 的小珠，小珠可以在圆环上无摩擦滑动。试求小珠在右半圆环上的平衡位置（用 θ 表示）。

解： $F_1 = k \frac{Q_1 q}{\left(2R \cos \frac{\theta}{2}\right)^2}, F_2 = k \frac{Q_2 q}{\left(2R \sin \frac{\theta}{2}\right)^2}$

平衡时，小珠在切向 τ 方向的合力为：

$$\begin{aligned} f &= F_2 \cos \frac{\theta}{2} - F_1 \sin \frac{\theta}{2} \\ &= k \frac{Q_2 q}{\left(2R \sin \frac{\theta}{2}\right)^2} \cos \frac{\theta}{2} - k \frac{Q_1 q}{\left(2R \cos \frac{\theta}{2}\right)^2} \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned}$$

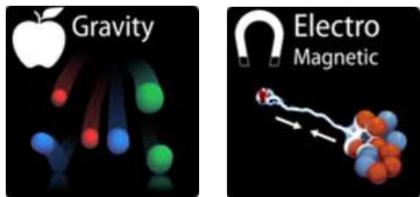
平衡条件 $f = 0 \rightarrow \tan \frac{\theta}{2} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{\frac{1}{3}}$



68

三、库仑定律和万有引力的对比

1. 电力与引力的比较



69

(1) 电力与引力都遵守平方反比律

- 电力与距离平方成反比是物理学中最精确的实验定律之一；
- 引力与距离平方成反比的关系却并不精确。

如太阳M与行星m之间的引力作用势能，按照Einstein的广义相对论，应为

$$U = -\frac{GmM}{r} - \frac{3v^2 GmM}{2c^2 r} + \dots$$

r: 距离, c: 光速
v: 行星速度

- 太阳与行星间的引力不仅与距离有关，还与速度有关
- 后Newton项与Newton项相比，是一个很小的修正

Newton项: Newton万有引力定律的结果
后Newton项: 广义相对论带来的修正

70

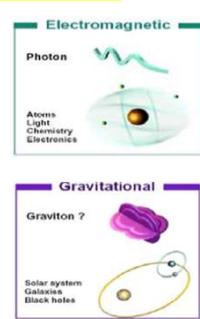
(2) 电力与引力都是自然界的基本力

- 电磁力和万有引力是自然界的两种基本力，也是宇宙宏观世界的两种基本力。
- 它们都是长程力，决定着宏观宇宙存在的形式。
- 但是它们又各具特色。

71

(3) 作用的转播子不同

- 它们都是靠场传播作用力；
- 电磁力的转播子是光子；
- 万有引力的转播子至今还是一个谜。
- 是否存在所谓的引力子，2016年引力波被测出，引力子也将浮出水面？



72

(4) 作用的强度不同

- 万有引力是自然界四大相互作用力中，作用强度最弱的力；
- 与电磁力相比，万有引力仅为电磁力的 10^{-39} 。

四大相互作用：万有引力、电磁力、强相互作用、弱相互作用

73

【例2】 氢原子的外层电子和原子核(质子)之间的距离为 $0.53 \times 10^{-10} \text{m}$ 。比较电子和质子间的电力和万有引力的大小。

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, F_G = G \frac{mM}{r^2}$$

$$\begin{aligned} k &= 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 \text{C}^{-2} \\ q_1 = -q_2 &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \\ G &= 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{kg}^{-2} \\ m &= 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \\ M &= 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} F_e &= k \frac{q_1 q_2}{r^2} = -8.2 \times 10^{-8} \text{ N} \\ F_G &= G \frac{mM}{r^2} = 3.6 \times 10^{-47} \text{ N} \end{aligned}$$

$$|F_e / F_G| = 2.27 \times 10^{39}$$

74

2. 电荷与质量的对比 $q \leftrightarrow m$

(1) 电荷和质量都是物体的基本属性

- 电力与两点电荷电量乘积成正比 $F_e = k q_1 q_2 / r^2$
- 万有引力与两质点质量乘积成正比 $F_G = G m M / r^2$
- 电量在库仑定律中的地位与质量在万有引力定律中的地位相当。
- 电荷和质量都不能脱离物质单独存在，它们都是物体的基本属性。

75

(2) 电力和引力都遵守平方反比律

电力与距离平方成反比是物理学中最精确的实验定律之一；

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

而引力与距离平方成反比的关系却并不精确。

$$F_G = G \frac{m M}{r^2} + \frac{3v^2 G m M}{2c^2 r^2} + \dots$$

76

(3) 电荷和质量遵循各自的守恒定律

一个孤立系统，不论其中发生什么变化，其中所有电荷的代数和永远保持不变，这就是电荷守恒定律。

$$\nabla \cdot \bar{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

同样，孤立系统的质量—能量守恒也是物理学最基本的定律之一。

$$\nabla \cdot (\rho_m \bar{\mu}) + \frac{\partial \rho_m}{\partial t} = 0$$

77

(4) 质量只有一种，其间总是彼此吸引 电荷有正、负两种，可吸引和排斥

- 由于电荷有正、负之分，正电荷发出电力线，负电荷聚敛电力线。正是根据这一特征，使人们得以利用接地的空腔导体来“隔绝”内、外电场的相互影响，达到静电屏蔽的目的，即电力可以屏蔽。
- 质量只有正的，没有负的，引力无从屏蔽。



78

(5) 质量有相对论效应，电荷无相对论效应

Einstein的狭义相对论给出

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

式中 m_0 和 m 分别是静止质量和速度为 v 时的质量。

➤ 上式表明，质量的大小随速度变化，这种变化在速度 v 与真空中光速 c 可相比拟时十分显著。这就是质量的相对论效应。

➤ 与此不同，电子、质子以及一切带电体的电量都不会因运动而变化，即电量是一个相对论不变量，不存在相对论效应。

这是电荷与质量的又一重大区别

$$Q = Q_0$$

79

(6) 电荷具有量子性，质量无量子性

◆ 迄今为止的所有实验都表明，任何电荷都是电子电荷 e 的整数倍， $Q=Ne$ 。

◆ 电荷守恒定律很可能与电荷的量子性有关。如果 e 是电荷不可分割的最小单位，它只能从一个粒子完整地转移给另一个粒子，从一个物质完整地转移给另一个物质，则电荷守恒是很自然的。

◆ 实际上现有的衰变过程理论，不仅要求衰变前后，甚至要求衰变过程的每一个中间阶段电荷都是守恒的。

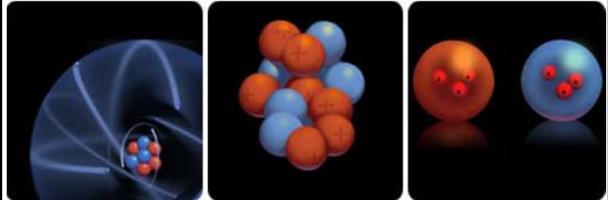
80

问 题

1. 若电荷同性相吸，异性相斥，会怎样？
2. 为什么自然界长程力都满足平方反比定律？
3. 讨论两种电荷的必要性和合理性
4. 质量是否是量子化的？
5. 如果电荷是相对论变化的量会怎样？

81

Thank you!



作业 1.3, 1.4

82