

高等学校教学用书

朱荣华 主编

物理学教程

(中册)

WULIXUE
JIAOCHENG



重庆大学出版社

04
2890
2

高等学校教学用书

物理学教程

(中 册)

朱荣华 吕金钟 编著

重庆大学出版社

物理学教程(中册)

朱 荣 华 主 编

责任编辑 董若炼

*

重庆大学出版社出版发行

新 华 书 店 经 销

重庆大学印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13.5 字数:337 千

1993年12月第 1 版 1993年12月第 1 次印刷

印数:1—3000

ISBN 7-5624-0820-3/O.102 定价:6.63 元

(川)新登字 020 号

教 学 说 明

在电磁学卷中,仍按传统顺序讲述:静电、物质中的电极化、稳恒电流、磁场、电磁感应、物质中的磁极化、麦克斯韦方程组及电磁波,但研究的方法与传统方法有所不同。主要是应用了相对论的基本思想,应用了洛伦兹坐标变换公式与速度变换公式。要求学生善于从不同惯性系观测电磁现象,善于从不变性与对称性考察问题。

在静电学中,注意把有关电荷的基本实验事实、逻辑结果以及对它的数学描写区分开来。指出了在相对论与守恒原理协调一致过程中场物质存在的必要性。分析了场的高斯定理与力线描写的普适性及场的环路定理与势函数描写的应用范围。

在研究运动电荷的电场与磁场时,与传统方法的差异尤为显著。

本卷强调了不仅对质点运动的描写具有相对性,而且对场运动的描写也具有相对性。 $\vec{E}$ 和 $\vec{B}$ 仅仅是统一电磁场的分量,它们并非相互独立,不存在各自分开的意义。在某一个惯性系中观测到纯电场或纯磁场时,在另一个惯性系中将同时观测到电场分量与磁场分量。在叙述中,努力应用普通物理的方法,设计尽可能简单直观的模型,由相对论、电荷的不变性及库仑定律证明了磁场的存在,指出磁场仅仅是一种相对论效应。当用一试验电荷探测由运动电荷产生的场力时,将观测到一个依赖于试验电荷速度的力,磁仅仅是描写此力的新名称。

在叙述麦克斯韦方程组时,介绍了它的微分形式,介绍了用势函数描写电磁场的方法,介绍了有关规范变换的现代概念,使学生易于接触现代物理学成果。

为了加强本卷的适用性,当把“*”号章节舍去时(舍去了利用洛伦兹坐标、速度、力变换公式的定量推导部分),仍保证了教材的连续性,教材内容安排接近于传统的编排。但作者认为,舍去了打“*”号章节,就不易用统一的观点把握电磁场的基本规律,这对学生是一个损失,教师应尝试指导有条件的学生有选择的学习这部分内容。

此卷内容可安排 34~40 学时。

目 录

第三卷 电磁学

第一章 电荷的基本性质	1
§ 1-1 两种电荷	1
1-1-1 电荷	1
1-1-2 两种电	1
§ 1-2 库仑定律	2
1-2-1 平方反比关系	2
1-2-2 电量	2
§ 1-3 叠加原理	4
§ 1-4 电荷守恒定律	5
§ 1-5 电荷的不变性	5
§ 1-6 电荷的量子化	6
思考题	7
习题	7
第二章 静电场的基本性质	9
§ 2-1 电场强度	9
2-1-1 场物质	9
2-1-2 电场强度	9
2-1-3 静电场的电场强度计算	10
§ 2-2 高斯定理	17
2-2-1 电力线与电通量	17
2-2-2 高斯定理	18
2-2-3 高斯定理的应用	20
§ 2-3 静电场的环路定理	23
2-3-1 静电场的环路定理	23
2-3-2 电势	25
2-3-3 静电场的电势计算举例	27
2-3-4 等势面与电势梯度	30
2-3-5 静电场能量	33
思考题	39
习题	40
第三章 静电场中平衡问题	46
§ 3-1 静电场中的平衡	46

§ 3-2 有导体时的静电平衡	47
3-2-1 导体的静电平衡条件	47
3-2-2 导体表面电荷与场强	48
3-2-3 导体空腔内的静电场	50
3-2-4 电荷分布	51
3-2-5 电容	56
§ 3-3 有电介质时的静电平衡	61
3-3-1 电介质的极化	62
3-3-2 电容器中的电介质	63
§ 3-4 有电介质时的高斯定理	64
3-4-1 极化强度矢量	64
3-4-2 极化强度矢量与极化电荷面密度的关系	65
3-4-3 电位移矢量	66
3-4-4 极化率	66
§ 3-5 介质极化的能量供给	67
短文 静电学的若干应用	69
思考题	75
习题	77
第四章 静磁场	81
§ 4-1 运动电荷之间的作用力	82
4-1-1 运动电荷之间的作用力	82
4-1-2 运动电荷的电场	83
4-1-3 运动电荷的磁场	85
§ 4-2 恒定电流	87
4-2-1 电流密度矢量	87
4-2-2 电流强度	88
4-2-3 基尔霍夫第一定律	89
4-2-4 欧姆定律的微分形式与电流热效应	90
4-2-5 电动势	93
4-2-6 基尔霍夫第二定律	94
§ 4-3 毕奥-萨伐尔定律	96
§ 4-4 带电粒子在磁场中运动	104
4-4-1 带电粒子在磁场中运动	104
4-4-2 在电磁场中粒子的运动	110
§ 4-5 磁场对载流导线的作用	113
4-5-1 平行无限长直载流导线间的相互作用	113
4-5-2 电流回路在均匀磁场中所受力矩	114
§ 4-6 静磁场的基本性质	117
§ 4-7 电磁场变换公式	122

思考题	127
习题	128
第五章 麦克斯韦方程组	139
§ 5-1 位移电流与安培环路定理	139
§ 5-2 法拉第电磁感应定律与涡旋电场	142
5-2-1 法拉第电磁感应定律	142
5-2-2 涡旋电场	144
5-2-3 动生电动势	149
§ 5-3 电感	154
5-3-1 互感和自感	154
5-3-2 磁场能量	155
§ 5-4 有磁介质时的磁场	159
5-4-1 磁介质	159
5-4-2 磁偶极子模型	160
5-4-3 有磁介质时安培环路定理	163
5-4-4 铁磁性物质	166
§ 5-5 麦克斯韦方程组	170
5-5-1 麦克斯韦方程组	170
5-5-2 能流密度	171
5-5-3 电磁波	174
5-5-4 加速电荷发射的电磁波	179
* 5-5-5 麦克斯韦方程组的微分形式	182
科学家介绍 法拉第	186
科学家介绍 麦克斯韦	189
思考题	191
习题	194
习题答案	202

第三卷 电 磁 学

第一章 电荷的基本性质

§ 1-1 两 种 电 荷

1-1-1 电荷

对电力现象的观察可追溯到古代。希腊哲学家泰勒斯(Thales, 公元前 640—546)记载了琥珀被毛皮摩擦后会吸引稻草或羽毛一类轻小物体的现象。到十六世纪,英国医生吉尔伯特(W. Gilbert, 1540—1603)证明了除琥珀外还有许多物质被摩擦后也有吸引轻小物体的本领,并称物质此时处在带电状态。处于带电状态的物质叫作带电体。“电”一词来源于希腊文 *elektron*, 意思是琥珀。带电体就是指象摩擦后的琥珀那样具有吸物本领的物体。

大约在 1729 年前后,英国人格雷(S. Gray, 1670—1736)发现带电体与某些物质(如金属)接触,可以使这些物质也带电,这种现象叫电传导。并以此把物质分为两类,能发生电传导现象的物质称为导体,反之称为绝缘体。电传导现象使人们意识到,电不是一种与摩擦有关的物质性能,而可能是在物质中独立存在的某种东西。

1747 年,美国科学家、政治家富兰克林(B. Franklin, 1706—1790)提出了电流质模型。认为电是一种类似流体的特殊物质,叫作电荷。电荷的基本性质在于电荷之间存在电力作用。由此,通过对电荷之间电力作用及其电效应的实验研究,人们逐步认识到电荷的基本性质。

1-1-2 两种电

杜·费伊(C. F. Du Fay, 1698—1739)曾用金箔作实验,观察到金箔与带电玻璃棒接触后,随即被玻璃棒所排斥,而此金箔却为带电琥珀吸引。金箔若与带电琥珀接触,同样为琥珀所排斥,而为带电玻璃棒吸引。带电体之间的电力,只观测到排斥和吸引。为解释这一基本特征,杜·费伊提出了存在两种电的假设。金箔通过电传导获得的电应是同性电,“琥珀”电与“玻璃”电应是异性电。并由此总结出“同性相斥,异性相吸”的电力规律。富兰克林又把这两种电,命名为正电和负电,并且把玻璃棒被丝绸摩擦后所带的电约定为正电。由此,就可以判断所有带电体的电性:凡与带电玻璃棒相斥的都带有正电,相吸的都带有负电。

1897 年,英国物理学家汤姆逊(J. J. Thomson, 1856—1940)通过对阴极射线的研究,证明了所有物质都含有荷质比相同的粒子,称之为电子,它是所有原子的基本组成成份。根据富兰克林的约定,电子带负电。1911 年,英国物理学家卢瑟福(E. Rutherford, 1871—1937)通过 α 粒子轰击金箔的散射实验,发现原子质量绝大部分集中在一个非常小的带正电的核上。从此,人们逐渐了解到自然界中实物都是由带正电的原子核与带负电的电子组成,它们依靠电力结合在一起。

两种电的存在,反映了电世界的一种基本对称性。若把所有电荷的电性作一个变换,正电变为负电,负电变为正电,则人们观测到的电力不变。一个由带正电原子核与带负电的电子组成的电世界所发生的现象,与一个带负电的原子核和带正电的电子组成的电世界所发生的现象,在实验上不存在任何可观测的差异。也就是说,对电荷电性的变换是一种对称变换,带电体的电性本身是不可观测的。由于历史原因,说电子带“负”电只不过是人为的约定而已。对于万有引力而言,只存在吸引。产生万有引力的物质也只有一种性质。由万有引力结合在一起的物质系统中(如太阳系)不存在如上所述的对称性。

§ 1-2 库 仑 定 律

1-2-1 平方反比关系

考虑到物理学定律的普适性要求,应由点电荷之间电力所遵循的规律推导出一般带电体之间的电力。

与质点概念一样,点电荷并非反映带电体的实际大小。只要与到其它带电体的距离相比,该带电体本身线度大小可忽略不计时就可按点电荷处理。数学上的一点精确地描写了它的空间位置。点电荷的模型,在理论上具有重要意义,因为任何带电体总可以看成点电荷的集合。

若在所选定的惯性系中,有两个静止点电荷,相隔距离为 r 。1785 年法国工程师库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806)用他自己发明的扭秤通过实验找到了这两静止点电荷之间电力与距离之间的普适关系,即电力的平方反比关系:

$$F \propto \frac{1}{r^2} \quad (1-1)$$

事实上,任何测量结果总是有误差的,一般应表示为 $F \propto r^{-2 \pm \delta}$,对 r 的幂数取整数 2 只是一个理论假设。麦克斯韦用静电屏蔽实验测量结果,给出测量误差 δ 小于 10^{-4} 。现在更精确的实验已给出 δ 小于 2.7×10^{-16} ,在此实验误差范围内,证实了上述的平方反比关系。

当然,还有另一方面的问题,即平方反比关系作为普适关系,在多大范围内被实验证实过?近代原子散射实验以及其它间接论据,平方反比关系在小到 10^{-16}m ,大到几 km 范围内保持有效。1947 年,兰姆(W. E. Lamb, 美国, 1913—)与雷瑟福(R. C. Retherford, 美国, 1912—)通过对氢光谱精细结构极为精确的测定表明,平方反比关系在原子尺度(10^{-10}m)上,其幂指数 2 的误差 δ 小于 10^{-10} 。核物理的高能粒子散射实验中,粒子与核的接近可达 10^{-15}m 尺度,结果表明平方反比关系仍然有效。在高能电子与质子碰撞实验中,电力在短于 10^{-16}m 距离上发现,测量结果比平方反比关系预期计算要弱 10 倍。对此有两种解释,一种认为平方反比关系失效,一种认为在小于 10^{-16}m 尺度内质子不能看成点电荷。目前,大多数物理学家倾向于后者。当然,此问题尚未定论。总之,平方反比关系作为一个理论假设,它的真理性将永远要经受实验的检验。

1-2-2 电量

库仑从电力与引力的类比中提出电荷电量的概念。如同质量作为物体所含物质质量的多少一样,电量也被看作带电体所带电荷量的多少。而电量的操作定义是由德国数学家高斯(C. F. Gauss, 1777—1855)给出的。通常用符号 Q 或 q 表示。

(1)为给出电量的操作定义,首先选一个特殊的静止点电荷 q 。在离 q 固定距离 P 点处,依次放置静止的待测点电荷 $q_1, q_2, \dots$ 。测得相应电力 $F_1, F_2, \dots$,如图1-1。并规定待测点电荷的电力与所带电量成正比:

$$F_i \propto q_i$$

(1-2) 图1-1 用待测电荷受力定义电量 q_i

则有

$$\frac{F_i}{F_1} = \frac{q_i}{q_1}$$

或

$$q_i = \frac{F_i}{F_1} q_1 \quad (i = 2, 3, \dots)$$

规定第一个电荷为电量标准, q_1 为一个电量单位。由此可测得第 i 个点电荷的电量 $q_i = \frac{F_i}{F_1}$ (电量单位)。这样给出了电荷所带电量的操作定义。

(2)如把特殊点电荷 q 换成任一点电荷,实验可发现待测电荷的电力与其电量仍成正比。此时, $F \propto q$ 不仅仅是电量的定义而且成为被实验证实的普遍规律了。

因此,两点电荷相互作用时(图1-2),有: $F_{21} \propto q_2, F_{12} \propto q_1$,且实验可证实牛顿第三定律依然成立,即有 $F_{21} = F_{12}$ 。所以,两点电荷之间电力大小应与它们所带电量的乘积成正比:

$$F \propto q_1 q_2 \quad (1-3)$$

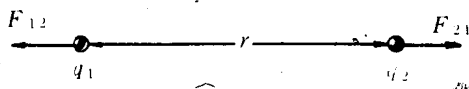


图1-2 两电荷间相互作用

(3)当保持 q_2 相对于 q_1 的距离 r 不变,改变 q_2 相对于 q_1 的空间方位时,实验上可观测到电力大小不变,电力的方向总在两点电荷的连线上。这一基本事实表明:电荷不存在内在的方向性,它对其它电荷的电力作用是各向同性的。因此,在有关电力的理论中只需用电量这个标量来描写点电荷的电性质。正如在引力理论中只需用质量这个标量描写质点的引力性质一样。

当空间仅有两个点电荷时,存在一个沿两点电荷连线的特殊方向。若电力偏离这个方向,势必破坏空间对称性。电力方向在两点电荷的连线上,可以看作空间对称性逻辑推理的必然结果。

(4)综上所述,两静止点电荷之间电力为:

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1-4)$$

K 为比例系数, r 为两点电荷间距离。实验进一步发现,比例系数 K 是一个与电荷电性、电荷带电量及距离无关的普适常数。再根据“同性相斥,异性相吸”电力规律,正电荷的电量可用正数表示,负电荷的电量可用负数表示,则一个点电荷 q_1 施于另一点电荷 q_2 的电力图1-3为:

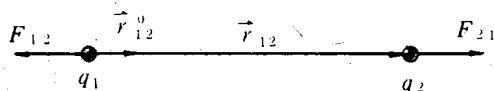


图1-3 库化定律

$$\vec{F}_{21} = K \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{r}_{12}^0 \quad (1-5)$$

$\vec{r}_{12}$ 是从 q_1 指向 q_2 的矢径, $\vec{r}_{12}^0 = \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}$ 是从 q_1 指向 q_2 的单位矢量。这就是著名的库仑定律,它

指出两静止点电荷间电力方向沿着它们的连线方向；同号相斥、异号相吸；力的大小与两点电荷间距平方成反比，而与两个电荷的电量的乘积成正比。

在国际单位制(SI)中，电量的单位是库仑(C)，比例常数由实验测定为：

$$K = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

大多数计算中，可近似取 $K = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ 。通常还用另一个常数 ϵ_0 表示 K ：

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1-6)$$

ϵ_0 称为真空介电常量，其值为 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。则(1-5)式可写成

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{r}_{12}^0 \quad (1-7)$$

例1 试求氢原子中电子与原子核之间电力与引力之比。

解：电子和质子的电量分别是 $-e$ 和 $+e$ ，而 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。氢原子中电子与原子核(质子)之间电力大小 $F_e = K \frac{e^2}{r^2}$ 。电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，质子的质量 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，它们之间万有引力大小 $F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2}$ 。因此

$$\begin{aligned} \frac{F_e}{F_g} &= \frac{K}{G} \cdot \frac{e^2}{m_e m_p} = \frac{(9.0 \times 10^9) \cdot (1.6 \times 10^{-19})^2}{(6.8 \times 10^{-11}) \cdot (9.1 \times 10^{-31}) \cdot (1.7 \times 10^{-27})} \\ &= 2.3 \times 10^{39} \end{aligned}$$

可见在此问题中，万有引力作用与电力作用相比十分微小，可忽略不计。

§ 1-3 叠加原理

若点电荷 q_0 旁边，同时存在两个静止点电荷 q_1, q_2 。实验可测得 q_0 受力 $\vec{F}$ ，并发现此力恒等于用库仑定律计算出的 q_1 与 q_2 单独对 q_0 电力的矢量和图(1-4)：

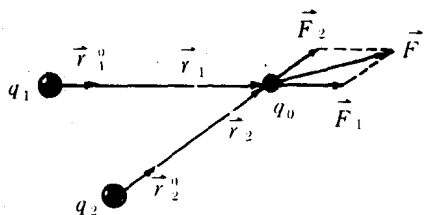


图 1-4 叠加原理

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_0}{r_1^2} \vec{r}_1^0 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_2 q_0}{r_2^2} \vec{r}_2^0 \quad (1-8)$$

在理论上可用静电力叠加原理表示：任意两个点电荷之间的电力，不因第三个电荷的存在而改变。

施加某一电荷的电力应等于其它每一电荷单独存在时对它施加力(可用库仑定律计算)的矢量和。所以这又叫静电力的独立作用原理。

若有 n 个静止点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ ，则 q_0 受到这 n 个点电荷的电力 $\vec{F}$ 为：

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_i q_0}{r_i^2} \vec{r}_i^0 \quad (1-9)$$

这就是叠加原理的数学表达式。式中 r_i 为第 i 个点电荷 q_i 到 q_0 的间距。若有一连续带电体，其电荷密度分布为 ρ ，则带电体可看作电荷元 $dq = \rho dV$ 的集合。带电体对某一静止点电荷 q_0 的电力 $\vec{F}$ 可写成：

$$\vec{F} = \int d\vec{F} = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_0 \rho dV}{r^2} \vec{r}_0 \quad (1-10)$$

$\vec{r}$ 为 dq 到 q_0 的矢径, 积分遍及带电体的体积 V 。

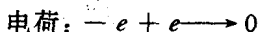
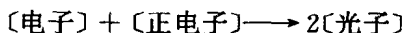
根据叠加原理, 若由 q_1 与 q_2 组成的系统对其它电荷没有电力作用 ($F=0$), 即系统对外不显示电性, 我们称该电荷系统处于电中性状态。在例 1 中曾指出氢原子中电力比引力大 10^{39} 倍, 但由于原子中保持了正负电荷量精确相等, 所以一般物体在宏观尺度上表现为精确的电中性。因此, 在宇宙中天体之间万有引力起着主宰的作用。

应注意的是, 叠加原理并非是逻辑推理的结果, 而是在实验基础上总结出来的基本事实。原则上讲, 有了库仑定律与叠加原理, 可解决静电学中所有电力计算问题。

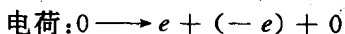
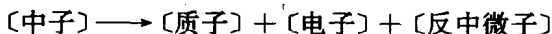
§ 1-4 电荷守恒定律

在摩擦起电现象中, 是把一些电子从一个物体移到另一个物体上, 则前者带正电, 后者带负电, 不过这两个物体的正负电量的代数和仍为零。大量的实验表明: 若把参与相互作用的几个物体或粒子叫做一个系统, 而整个系统与外界没有电荷交换, 那么不管在系统中发生了什么样的变化, 整个系统的正负电荷电量的代数和始终保持不变。这个结论叫做电荷守恒定律, 它是物理学中的一条基本定律, 首先是由富兰克林于 1747 年提出的。直到现在, 无论在宏观现象中, 或者在原子、原子核和基本粒子范围中, 电荷守恒定律都是正确的。下面我们列举一些电荷参与变化的反应过程。

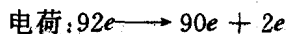
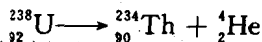
正、负电子的湮灭



中子的放射性衰变



铀核的放射性衰变



在上述诸过程中, 反应前系统的总电量恰好等于反应后系统的总电量, 即电荷在反应前后是守恒的。在分析有基本粒子参与的各种反应过程时, 电荷守恒定律具有特别重要的指导意义。只有遵从电荷守恒定律的过程才可以实现, 违反电荷守恒定律的过程就一定不能实现。

§ 1-5 电荷的不变性

实验发现, 一个电荷的电量与它的运动状态无关, 也就是说与观测者所选的参照系无关。电荷的这一特性, 叫作电荷的不变性。今举二例加以说明。

(1)氢分子和氦原子,都有两个质子和两个电子。它们的电子运动状态相差不大,但它们的质子运动状态大不相同。氢分子中,两个质子作为分子中原子核,在相距约 $0.7\text{\AA}$ 距离上作转动。而氦原子中,两个质子作为原子核的组成部分紧密地结合在一起运动,其运动能量比氢分子中两质子的运动能量约大 10^6 倍。如果带电粒子电量与它的运动状态有关,则两种分子不可能都呈现电中性。但实验证明,它们在 10^{20} 分之一的精度上都是电中性的,这说明电荷电量确实具有不变性。

(2)一般不同种类分子中电子运动状态是不同的。通过化学反应可以改变分子中电子运动状态。如果电荷对其运动速率有一个十分微小的依存关系,由于物体中包含有大量分子,就会通过化学反应产生出十分可观的电量来。但这种效应从未被观测到。

值得注意的是,电荷不变性与电荷守恒是电荷的两个本质上不同的属性。以往我们接触的质量、动量与能量都是守恒量,却不是不变量。

守恒量是指在选定的参照系下,在某一过程中,某物理量保持不变。不变量是指在不同参照系中,对同一个物理量的测量结果不变,即与参照系选择无关。

既然在某一惯性系中,对任一过程电量是守恒的,而在另一惯性系中测得的电量又是不变的,则对同一过程自然也是守恒的。由此可见,电荷的不变性、电荷守恒定律与相对性原理是协调一致的。

值得强调的是,正是两种电荷的存在及电荷的不变性,使得由电荷组成依靠电力结合过来的世界与由质点组成依靠引力结合过来的世界有某些本质上不同的特征。而电荷与质点都不存在内在的方向性,以及电力与引力都遵循平方反比关系,又使得这两个世界呈现出某些相似的特征。

§ 1-6 电荷的量子化

1913年密立根(R. A. Millikan, 1868—1953)的油滴实验以及其它实验证明,自然界中观测到的电荷总是以一个基本单元的整数倍出现的。这个基本单元叫作电荷的量子,用符号 e 表示,数值上等于电子电量。实验测得 $e=1.602\times 10^{-19}\text{C}$,它是一个普适常数。现在,我们知道的大多数基本粒子或者不带电(如中子),或者带一个 $+e$ (如质子),或者带一个 $-e$ (如 μ^- 子)。由基本粒子组合而成的粒子可以带有 $2e, 3e$ 等等,如 α 粒子具有 $+2e$ 的电量。质子和电子的电量完全相等,使铯原子束在高真空下通过强电场时并没有观测到任何的偏移。实验给出电子与质子电量相等的精度已达到 10^{20} 分之一。

在粒子物理研究中,理论上曾预言有电量为 $\pm\frac{1}{3}e$ 或 $\pm\frac{2}{3}e$ 的粒子(夸克)存在,并认为很多基本粒子是由若干种夸克或反夸克组成的。1990年诺贝尔物理奖就授予美国杰罗姆·弗里德曼、亨利·肯德尔、理查德·泰勒教授,以表彰他们证实了比中子和质子还小的物质——夸克存在的杰出贡献,使得电荷的最小值又有了新的结论。但是电荷量子化规律并没有改变,即电荷只能取分立的、不连续的数值。

电荷是量子化的。但对于比密立根油滴所带电量大的带电极体,它们的电荷分布仍可认为是连续的,可引入电荷密度的概念进行描写。

思 考 题

- 1-1 有人说一根绝缘棒上带有电荷。你怎样证明它确实带电？并确定这电荷的符号。
- 1-2 (a)一根带正电的玻璃棒吸引一个悬挂的物体，能否断定这物体是带了负电？(b)一根带正电的玻璃棒排斥一个悬挂着的物体，能否断定这物体带了正电？
- 1-3 估计伍分硬币包含正负电荷电量的数量级是多少？
- 1-4 如果当初富兰克林把电子呈现的电称做正电，质子呈现的电叫做负电，那么会在今天电世界中引起任何重要差别吗？
- 1-5 其它电荷的靠近会影响一个电荷作用到另一个电荷上的电力吗？
- 1-6 请设计一个精密的实验检验氢原子的电中性。
- 1-7 某电荷 Q 分成 q 和 $(Q-q)$ 两部分，并将两部分分开一定的距离，则它们之间的库仑力为最大的条件是什么？
- 1-8 电荷的量子可以认为是 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ，是否有与此相对应的质量的单个量子？
- 1-9 所谓一个物理量是(a)量子化的；或(b)守恒的；或(c)不变性，其意义为何？举例说明之。
- 1-10 你怎么知道地球与月亮之间的引力是万有引力而不是库仑力呢？

习 题

- 1-1 求两个电子的库仑力 F_e 和万有引力 F_g 的比率。
- 1-2 为了抵消地球与月球之间的万有引力，必须在地球与月球上各安置多大的等量电荷？
- 1-3 两个 1.0C 的电荷在真空中相距 1.0m ，它们间吸引力有多大？相距 $1.0 \times 10^3 \text{m}$ 时吸引力又为多大？
- 1-4 在正方形的相对两角顶上各放一电荷 Q ，而在另一相对的两角顶上各放一电荷 q 。如果作用在 Q 上的力为零，则 Q 与 q 有何关系？
- 1-5 两个相同的小球，质量都是 m ，带等值同号电荷 q ，各用长为 l 的细线挂在同一点，如图所示。设平衡时两线夹角为 2θ (很小)，试证下列的近似等式成立：

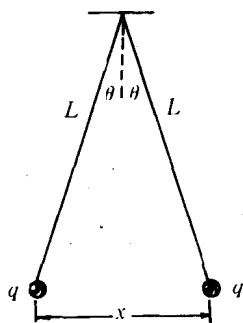
$$x = \left(\frac{q^2 l}{2\pi\epsilon_0 mg} \right)^{\frac{1}{3}}$$

式中 x 为两球平衡时的距离。再求：

(1) 如果 $l=1.20 \text{m}$, $m=10 \text{g}$, $x=5.0 \text{cm}$ ，则每个小球上的电量 q 是多少？

(2) 如果每个球以 $1.0 \times 10^{-2} \text{C} \cdot \text{S}^{-1}$ 的变化率失去电荷，则两球彼此趋近的瞬时相对速度 (即 $\frac{dx}{dt}$) 是多少？

1-6 一个中子被认为是由一个上夸克和两个下夸克组成。上夸克带电量 $\frac{2}{3}e$ ，下夸克带电量 $-\frac{1}{3}e$ 。将夸克作为经典粒子处理，如果在中子内部两个下夸克相距 $2.6 \times 10^{-15} \text{m}$ ，试求它们之间的电力。



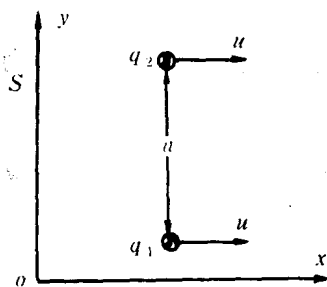
习题 1-5 图

1-7 试粗略估计一杯水中有多少库仑的正负电荷。设水的体积为 250cm^3 。

1-8 摩擦一个塑料棒可能产生的电量是 -10^{-9}C 。塑料棒在摩擦过程中得到多少电子？

1-9 电子湮灭 ($e^- + e^+ \longrightarrow \gamma + \gamma$) 是电荷守恒的一个例子。求由于正负两个电子的消失而出现的两条方向相反 γ 射线的能量。

*1-10 相距为 a 的两个点电荷 q_1 与 q_2 (都带正电荷) 某时正以速率 u 沿 x 轴正向运动, 如图所示。在 S 惯性参照系中, 试求 q_2 受到的电力。



习题 1-10 图

第二章 静电场的基本性质

§ 2-1 电场强度

2-1-1 场物质

从本章开始,我们把第一章叙述过的有关电荷的知识逐渐发展成为与相对论协调一致的理论体系。首先要根本抛弃对电力所作的超距作用解释,引入场物质的概念,重新理解库仑定律。近代物理学已证明场观点的正确性。

在空间(图 2-1)除了电荷 q_1 、 q_2 外,还存在着弥散的场物质——电场。 q_2 所受电力 $\vec{F}_{21}$ 是 q_2 所在处的电场施加的,而不是由离开 q_2 电荷 r 处的电荷 q_1 所施加的。当然, q_2 处的电场是由 q_1 产生的。对 q_1 所受电力 $\vec{F}_{12}$ 应作同样的解释。所有电力是场物质与电荷的相互作用,称为电场力。

若 q_1 与 q_2 相隔足够远,当我们在短时间 τ 内使 q_1 有一个位移,显然将改变 q_2 所在处的电场,因而也就改变了 q_2 所受到的电场力 $\vec{F}_{21}$ 。按相对论思想,这种改变不可能是即时的,而需要一个传播时间 t (至少为 $\frac{r}{c}$, c 为真空光速),才能把 q_1 位移的信息通过场物质传播到 q_2 所在处。在 $t < \frac{r}{c}$ 时间内, q_2

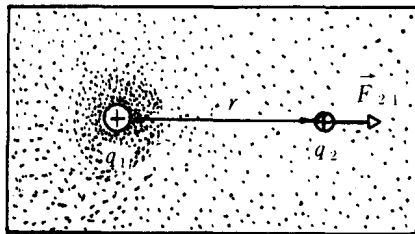


图 2-1 场对 q_2 的作用

所受的电力不应受 q_1 位置变动的影响。故对 q_2 电力的影响应存在一个推迟效应。因此,对静止电荷间电力(静电力)描述有效的库仑定律对运动电荷间的电力描述已不再适用了。

当 q_2 在电场力作用下运动时,带电体 q_2 的动量、能量将发生变化。按守恒原理,必有其它物质参与并即时进行交换,而能即时交换的只有场物质,不可能是相隔两地的带电体 q_1 。因此,只有把实物与场都包括在内的物质系统中,守恒原理才能得以确立。一种崭新的物质——场是独立存在的,它应具有实物粒子一样的属性:动量、角动量、能量等力学量,并能与实物粒子相互作用过程交换这些力学量。所有这些观念,对理解电现象是非常重要的。场物质是十九世纪物理学最伟大的发现。

以后,我们的研究对象主要是场。要注意对它如何描述,如何根据实验知识揭示场的基本性质及探索场变化的基本规律。

本章仅研究静电场。

2-1-2 电场强度

静电场的可观测性质,就是对浸在其中的电荷有力的作用。因此,可用一个试验电荷 q_0 去探测电场。所谓试验电荷,就是一个充分小的点电荷,其电量之小,不会因它的出现改变原有电场的分布情况;其体积之小,在电场中只占有一个确定的点。当然可以想象,试验电荷所受电场力越大,它所在处的电场越强。

可引入电场强度的概念来描写电场,用符号 $\vec{E}$ 表示,其操作定义为:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (2-1)$$

$\vec{F}$ 为 q_0 受到的电场力。(2-1)式表明电场强度就是该处单位正电荷所受的电场力。可观测量电场强度的国际单位为牛顿·库仑⁻¹(N·C⁻¹)。

电场强度是电场本身的性质,与试验电荷 q_0 无关。若 q_0 为正,施于 q_0 的力 $\vec{F}$ 与场强 $\vec{E}$ 方向一致;若 q_0 为负,则力 $\vec{F}$ 与 $\vec{E}$ 方向相反。而比值 $\frac{\vec{F}}{q_0}$ 二者相同。如果试验电荷所带电量 q_0

增加 1 倍,施于 q_0 的力 $\vec{F}$ 也随之增加 1 倍,

比值 $\frac{\vec{F}}{q_0}$ 仍不变。如图 2-2。

一般情况下,试验电荷 q_0 在不同空间位置,测得的电场强度也不同。因此,电场强度应是空间坐标的矢量函数,对于静电场可写成 $\vec{E}(\vec{r})$ 或 $\vec{E}(x, y, z)$ 。

只要知道了某处的电场强度,可直接由(2-1)式求得该处电荷 q 所受的电力:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2-2)$$

电力的近距作用,导致电场的局域性,即空间各处的场物质,将独立地与该处的电荷发生相互作用,该处电荷不受它处电场的影响。

2-1-3 静电场的电场强度计算

根据库仑定律,在距静止的场电荷 q 为 r 处的试验电荷 q_0 所受的电力为:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r^2} \vec{r}^0$$

$\vec{r}^0$ 为从 q 指向 q_0 的单位矢量。根据(2-1)式,试验电荷 q_0 所在处的电场强度为:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \vec{r}^0 \quad (2-3)$$

这是静止点电荷的电场强度计算公式,用以描写 q 产生的空间电场。

根据叠加原理(1-9)式,在由 n 个静止点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成的电荷系统附近的试验电荷 q_0 所受电场力为 $\vec{F}$,那么有:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \sum_i^n \vec{E}_i = \sum_i^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_i}{r_i^2} \vec{r}_i^0 \quad (2-4)$$

$\vec{E}_i$ 是电荷 q_i 单独存在时在 q_0 所在处激发的电场强度, $\vec{r}_i^0$ 是由 q_i 指向 q_0 所在处的单位矢量。上式就是静止点电荷系统的电场强度公式,用以描写该系统产生的空间电场分布。它表明静止电荷产生的电场中,空间某处的电场强度等于该系统的每个点电荷单独存在时在该处产生的电场强度的矢量和。也就是说,一个点电荷在某处产生的电场,不受其它电荷存在的影响。若干点电荷在该处产生的场,应是每个点电荷在该处产生场的矢量和。这个结论又称为