



面向 21 世纪 课程 教材
Textbook Series for 21st Century

电 磁 学

第二版

贾起民 郑永令 陈暨耀



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和普通高等教育“九五”国家级重点教材.本书是在原第一版(曾获国家教委优秀教材一等奖)的基础上结合作者在承担教育部“面向 21 世纪理科物理专业基本培养规格、教学基本要求和课程体系改革研究项目”所取得的成果修订而成的.在修订过程中,注意保持了原有的特色,按照现代化的要求,对结构和内容作了适当调整,增加了与电磁学密切有关的物理前沿领域和近代应用方面的知识,进一步明确了基本要求与提高要求间的界线,调整了难度.全书共分 9 章,内容涉及静电学的基本规律、静电场与导体、稳恒电流、稳恒电流的磁场、随时间变化的电磁场和麦克斯韦方程、匀速运动电荷的电场与磁场、物质中的电场、物质中的磁场、交流电路等.

本书可作为高等学校本科物理类专业电磁学课程的教材,也可供其他有关专业师生参考.

图书在版编目(CIP)数据

电磁学/贾起民,郑永令,陈暨耀.—2 版.—北京:
高等教育出版社,2001

ISBN 7-04-008603-4

I. 电… II. ①贾…②郑…③陈… III. 电磁学
IV. 0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 48289 号

电磁学 第二版

贾起民 郑永令 陈暨耀

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16

版 次 1985 年 8 月第 1 版

印 张 35

2001 年 1 月第 2 版

字 数 650 000

印 次 2001 年 1 月第 1 次印刷

定 价 29.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换.

版权所有 侵权必究

第一章 静电学的基本规律

静电学研究的对象是相对观察者静止的电荷及其周围的电场.在这一章中,我们只讨论处在真空中的静止电荷及其电场.我们将从最基本的静电现象出发,讨论静电场的描写方法和基本规律,进而建立静电场的基本方程式.本章的内容是学习以后各章的基础.

§ 1.1 物质的电结构 电荷守恒定律

1. 电荷 摩擦起电

早在古希腊时代,雕刻玉石的匠人就发现,用毛皮摩擦过的琥珀能吸引羽毛、头发、干草等轻小物体.在我国东汉成书的《论衡》中,也有“顿牟掇芥”的记载.以后相继发现许多材料如玻璃、水晶、硬橡胶、硫磺和火漆等经摩擦后都有吸引轻小物体的能力.当物体具有了这种性质,就说该物体带了电或有了电荷.带有电荷的物体称为带电体.经过摩擦使物体带电的过程称为摩擦起电.摩擦起电现象十分普遍,特别在塑料制造、化纤纺织、溶剂生产等过程中广泛存在.在这些过程中,摩擦起电常常会影响产品质量,甚至引起爆炸事故.

带电体之间存在相互作用,这种作用表现为相互吸引或相互排斥(图 1.1-1).实验表明,电荷有两类,同类电荷相互排斥,异类电荷相互吸引.由于只存在两类电荷,我们可以称一类电荷为正电荷,另一类电荷为负电荷.历史上,富兰克林(B. Franklin)最早对电荷的正负作了规定:玻璃与丝绸摩擦后,玻璃所带的电荷为正电荷,凡与它有吸引的电荷为负电荷.直到

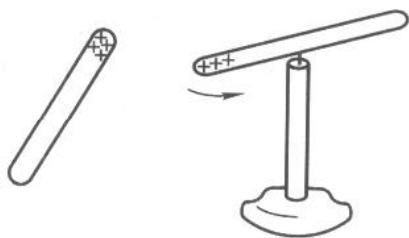


图 1.1-1 两根带同类电荷的棒相互排斥

现在,我们仍沿用富兰克林的规定.存在两类电荷及同类电荷相斥、异类电荷相吸是电荷的一种基本属性,但规定哪种电荷为正,哪种电荷为负,完全是任意的,具有一定的历史偶然性.富兰克林的命名法基于正电荷容易从一物体流到另一物体的错误猜测,事实上,容易流动的电荷是电子所带的负电.

摩擦起电是一个非常复杂的过程.两物体摩擦后带何种符号的电荷是由许多因素决定的,如表面的杂质层、物体的温度、物体表面的光洁程度等.当玻璃的表面比较粗糙(如摩擦因数 $\mu > 0.18$)或温度比较高时,经丝绢摩擦后的玻璃棒并不带正电,而带负电.因此确切地讲,在室温下表面光滑的玻璃经丝绢摩擦后所带的电才是正的.

2. 电子 质子 夸克

电磁现象的基本规律和电磁学的基本理论是在 18 至 19 世纪期间通过实验发现并总结出来的.当时,人们对物质的微观结构了解甚少,所以在宏观电磁理论的表述中,常常不涉及物质的微观结构.但在今天,如果我们能结合物质电结构的初步知识来学习电磁学,对深入理解电磁学的基本规律是有帮助的.

从物理和化学的观点来看,物质由原子、分子构成,而原子是由电子、质子和中子构成的.质子和中子是原子核的组成部分,统称核子.电子在核外运动,质量很小,约 10^{-30} kg,大小很难严格确定.迄今为止的实验和理论都未发现电子具有内部结构,故都把电子作为点粒子.电子的电荷 e 是电荷的最小单元,至今尚未发现荷电量比一个电子电量更小的稳定的带电体.但近年来,关于分数电荷的研究已引起广泛的兴趣.所谓分数电荷就是指比电子电荷更小的电荷.粒子物理的研究表明,核子等重粒子是由电量为 $(-1/3)e$ 或 $(2/3)e$ 的称为夸克的粒子组成的.但实验上尚未发现独立存在的带分数电荷的粒子.电荷具有最小单元的性质称为电荷的量子化,它是电荷的又一基本属性.质子和中子的质量几乎相等,约为电子质量的 1 840 倍(10^{-27} kg).质子带正电,电量与电子的相等(相等的精确程度达到 10^{20} 分之一),中子不带电^①.质子可以稳定的独立存在,中子则不能,它将衰变(半衰期 13 min)为一个质子、一个电子和一个中微子.电子和质子的质量和电量的数值如表 1.1-1 所示.

表 1.1-1 电子、质子的电量和质量

	电量/C	质量/kg
电子	$-(1.602\ 189\ 2 \pm 0.000\ 046) \times 10^{-19}$	$(9.109\ 534 \pm 0.000\ 047) \times 10^{-31}$
质子	$(1.602\ 189\ 2 \pm 0.000\ 046) \times 10^{-19}$	$(1.672\ 648\ 5 \pm 0.000\ 086) \times 10^{-27}$

为什么电子和质子的电量值相等的精度如此之高?为什么所有电子都能保持这样精确的固定的电荷值?是何种力量保持电子成为一个整体?这些问题至今令人迷惑不解.如果电子有内部结构的话,那么内部各部分之间应有静电斥力,电子结构的稳定性似乎表明其内部应存在某种比静电力更强的吸引力.所有

^① 中子作为一个整体不带电,但其内部却存在电荷分布.

这一切都是当今物理学尚未搞清楚的问题,但这些问题的讨论已超出本书的范围.

不同数目的质子和中子结合成各种不同的原子核.自然界中最重的原子核是铀-238的核(^{238}U),它含有238个核子,质量约为 $4 \times 10^{-25} \text{ kg}$.所有原子核的密度差不多都相等,而它们的直径大致正比于核子数的立方根.原子核的直径为 $3 \times 10^{-15} \sim 2 \times 10^{-14} \text{ m}$.铀原子核的半径约 10^{-14} m ,密度为 10^{17} kg/m^3 .

原子核和电子组成原子.原子核带正电,电量取决于核内的质子数.原子核外的电子数与核内的质子数相等.整个原子的净电荷为零.原子的质量几乎全部集中在原子核中,如氢原子核占氢原子质量的99.95%,铀原子核占铀原子质量的99.98%.在第一级近似下,可以认为原子的质量就是它的原子核的质量.原子的大小要比原子核大出好几个数量级.原子半径的典型值的数量级为 10^{-10} m .

分子由原子组成.由少数几个原子组成的分子,如 H_2O , CO_2 , Na_2SO_4 , C_6H_6 等,直径约为十分之几nm.它们的大小和质量与单个原子相比相差不大.但也有些分子很大、很复杂.至今知道的最大的分子是蛋白质分子和脱氧核糖核酸(DNA)分子,DNA分子的质量达 10^9 u (原子质量单位).

从历史看,到19世纪末,麦克斯韦(J. C. Maxwell)的电磁理论已经建立,电磁学在技术上的应用已有重大突破,如1866年横跨大西洋的海底电缆铺设成功,但对什么是电这样一个基本问题却并不清楚.早期曾把电看作是一种无质量的奇妙的流体,并认为传播电磁波的奇特媒质是以太.

在电子发现以前,人们认为构成万物的不可进一步分割的最小单元是原子,若干个原子构成分子.法拉第(M. Faraday)对电解的研究总结出了法拉第电解定律,认识到在电解质溶液中,正负离子是带电的实体,它们所带的电量将是某一基本电量的整数倍,并推出这基本电量的近似数值.当时麦克斯韦认为从法拉第电解定律可以推出电的分子概念.1891年斯托尼提出用“电子”表示这个基本量.电子这一名称虽然被提出来了,但并未认识到它是一个实体或粒子,更未认识到它是物质的最基本构件之一.

19世纪30年代,法拉第等人对低压气体中的导电现象进行了研究并发现了阴极射线.汤姆孙(J. J. Thomson)从1886年起对气体放电和阴极射线进行了大量实验研究,认为阴极射线是从阴极发出的质量非常小的带有负电的粒子流,并测得了这种粒子的电量与质量的比值,即荷质比.洛伦兹(H. A. Lorentz)支持汤姆孙的观点,并根据塞曼(Zeeman)效应算出了带电粒子的荷质比.以后汤姆孙又测量了光电效应中带电粒子的荷质比、灼热金属发出的带电粒子的荷质比,它们都与阴极射线中的带电粒子的荷质比相近似.经过几十年的实验工作,J. J. 汤姆孙在1899年得到如下的结论:原子并不是不可分割的最小的微粒,所有原子内部都有带负电的微粒,这种微粒带的电量都相同,质量也相同,但质量很小,只有氢原子质量的千分之一,并可通过不同的方式把它们从原子中扯出来.这种微粒就是电子.电子是构成原子的最小构件,是最早发现的“基本”粒子.汤姆孙由于证实电子的存在和测得电子的荷质比而于1906年荣获诺贝尔物理学奖.1909年,密立根(R. A. Milliken)做了著名的油滴实验,他和他

的学生测量了几千个油滴的电量.通过数据分析,得出了油滴所带的电荷总是某一基本电荷整数倍的结论.这个基本电荷就是电子的电荷.1917年密立根正式宣布电子的电荷值是 $(4.770 \pm 0.009) \times 10^{-10}$ esu. esu是绝对静电单位,若用SI单位制表示则为 $(1.591 \pm 0.002) \times 10^{-19}$ C.密立根因在电的基本电荷和光电效应方面的工作而荣获1923年诺贝尔物理学奖.1931年狄拉克(P. A. M. Dirac)企图为电荷量子化寻找理论根据并提出了磁单极的概念,如果自然界确实存在磁单极,则电荷的量子化可以得到圆满的解释.磁单极理论不仅涉及电磁场理论、量子力学理论,而且涉及规范场、基本粒子理论和量子场论.寻找磁单极的实验一直受到挫折,但物理学家和天文学家对磁单极的兴趣一直没有减退.

发现电子后,人们进一步去探索原子的内部结构.卢瑟福(E. Rutherford)提出了原子的核模型,玻耳(N. H. D. Bohr)建立了原子的玻耳理论.1924年,法国物理学家德布罗意(L. V. de Broglie)提出电子具有波粒二象性,奠定了量子力学的基础.以后美国的戴维逊(C. J. Davisson)和革末(L. H. Germer)、英国的G. P. 汤姆孙(G. P. Thomson)分别独立地发现了电子在晶体上的衍射现象,证明了电子具有波动性.

1896年贝克勒耳(A. H. Becquerel)首先发现了铀的放射现象,1897年居里夫妇(P. Curie, M. Curie)发现放射性元素钋和镭,1899年发现 α 和 β 射线,1900年发现 γ 射线.这些现象泄露了原子核具有复杂结构的天机.氢原子的核是一个带正电的质子,氦原子的核内除了有质子外,还存在质量与质子差不多相等的不带电的中性粒子.后来查德维克(J. Chadwick)在剑桥发现了这种中性粒子,这就是中子.依靠核力的作用,质子和中子才能聚合在一起.核力很强,是一种短程力,它与核子的带电状态无关.为了解释传递核力的媒介,1935年,日本的汤川秀树(H. Yukawa)提出了核力的介子理论,认为核力是由交换介子而产生的.1947年在宇宙射线中找到了介子.

随着加速器技术的提高,所能得到的粒子的能量越来越高,在更高能量的领域里又陆续发现了许多新的“基本”粒子,其中有些粒子的寿命很短.目前已经比较确定的“基本”粒子有200余种.如此众多的“基本”粒子并非同样基本,有些基本粒子内部还有复杂的结构.弄清这些所谓基本粒子内部的结构,减少真正的基本粒子数,是物理学家进一步追求的目标.于是便提出了有关基本粒子结构的各种模型,如20世纪50年代的板田(Shoyiehi)模型、20世纪60年代中期我国物理学家提出的层子模型以及在此同期盖尔-曼(M. Gell-Mann)和茨维格(G. Zweig)提出的夸克模型等.夸克有6种,即上夸克、粲夸克、底夸克、下夸克、奇夸克和顶夸克.前三种夸克带 $2e/3$ 电量,而后三种夸克带 $-e/3$ 电量.根据目前的认识,包括电子在内的六种轻子和六种夸克是最基本的基本粒子,它们是物质的最小构件.如质子由两个上夸克和一个下夸克组成,故质子的电量正好为 e .中子由一个上夸克和两个下夸克组成,故中子不带电.至今尚未观察到独立存在的夸克,因为夸克处在一种禁闭状态.在理论上和实验上如何实现退禁闭状态是人们非常关心的一个课题.

物质的结构是分层次的,我们对物质结构的认识正在向更深的层次进军.历史上,人类对物质结构每一更深层次的认识都导致重大的技术发明和进步.人类对物质的原子、分子这一层次的认识,导致了化学和化学工程以及生物和生物工程的飞速发展.对原子是由电子和原子核组成的认识导致电子技术的研究和电子管的发明、半导体的研究和晶体管的发明、通讯理论的研究和电视雷达的发明、集成电路的研究和微型计算机的发明以及激光的产生和激光

技术的应用.对原子核由质子和中子构成的认识导致重核裂变和轻核聚变的研究以及核武器的发明和核能的和平利用.对“基本”粒子内部结构的认识会对技术的进步产生什么影响,目前尚难预料.为了探索物质结构的各种层次,一代又一代的科学家耗去了他们的毕生精力,正是他们的无私奉献,才换来了今天的丰富多彩的世界.

3. 电荷守恒定律

任何物体,不论固体、液体还是气体,内部都存在正、负电荷.在通常情况下,物体内部正负电荷数量相等,电效应相互抵消,不呈现带电状态.如果由于某种原因,物体失去一定量的电子,它就呈现带正电状态;若物体获得一定量过剩的电子,它便呈现带负电状态.物体的带电过程实质上就是使物体失去一定数量的电子或获得一定数量的电子的过程.

大量实验事实表明,电荷还有一个属性是守恒性,即在任何时刻,存在于孤立系统内部的正电荷与负电荷的代数和恒定不变,这一结论称为电荷守恒定律.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,而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.换句话说,电荷是一个相对论性不变量.

电荷守恒定律可能与电荷的量子属性有关.比如说,假设 π 介子的电荷等于0.73个电子电荷,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,人们可以设想单个电荷是一种不可再分割的单位,它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.

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(比推测的宇宙年龄还要长得多).

4. 导体和绝缘体

金属原子的原子核对离核最远的电子(价电子)的作用力较小,当受到某种影响时,价电子很容易脱离原子核的束缚而成为自由电子,失去电子的原子核成为带正电的离子.当大量金属原子组成金属时,由于原子间的相互影响,几乎所有的价电子都变成自由电子,它们在金属内部自由运动,但不会跑到金属外面,这种情况与密封于容器中的气体分子很相似,故通常把金属中的自由电子称为电子气.酸、碱、盐溶于水时,将电离成可在溶液中自由运动的正离子和负离子.所以不论金属内部还是酸、碱、盐的溶液中都存在大量的自由电荷,当自由电荷受力作用时,很容易从一处向另一处迁移,因而它们有很好的导电性,故金属以及酸、碱、盐溶液称为导体.金属内部发生电荷迁移时,并不发生可觉察到的质量

迁移,而酸、碱、盐溶液中发生电荷迁移时,将伴随质量的迁移.我们把前者称为第一类导体,后者称为第二类导体.

许多非金属,其内部原子核对核外电子的作用力比较大,电子被正离子牢固地束缚着,不能自由运动(但是,电子在原子或分子内部极小范围内,仍可运动),故非金属几乎没有导电本领,称为绝缘体.

导体和绝缘体之间并无严格的界线,在一定条件下,绝缘体可以转化为导体.例如,绝缘体在强电力作用下将被击穿,使束缚电子变成自由电子,绝缘体就变成导体.

还有些物质如锗、硅和某些化合物等,其导电性能介于导体和绝缘体之间,称为半导体.半导体的导电性会因其中杂质含量和外界条件的改变(如温度、光照等)而发生显著变化.

§ 1.2 库 仑 定 律

1. 点电荷的概念 库仑定律

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许多因素有关.库仑(C. A. Coulomb)首先全面研究了两个点电荷间相互作用力的规律.点电荷是这样的带电体,它本身的几何线度比它与其他带电体之间的距离小得多,这样,在研究它与其他带电体的相互作用时,可以把它当作一个几何点处理.

对于两个点电荷,它们之间的距离具有完全确定的意义,而两带电体的形状、电荷在带电体上的分布情况已无关紧要.点电荷的概念与力学中质点的概念相似,它是从实际带电体中抽象出来的理想模型,只具有相对意义,本身不一定是非常小的带电体.库仑于 1785 年通过对实验(著名的扭秤实验)结果的分析,总结了两个静止点电荷间相互作用力的规律,这就是我们熟知的库仑定律,其主要内容是(1)同号电荷相互排斥,异号电荷相互吸引;(2)作用力沿两点电荷的连线;(3)力的大小正比于每个点电荷电量的多少;(4)力的大小反比于两点电荷之间距离的平方.用数学可表示为

$$\boldsymbol{F}_{12} \propto \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \boldsymbol{e}_r \quad (1.2-1)$$

$\boldsymbol{F}_{12}$ 代表点电荷 2 作用于点电荷 1 上的力, q_1 和 q_2 分别为该两点电荷的电量, r_{12} 是点电荷 q_2 到 q_1 的矢径 r_{12} 的大小, r_{12} 的方向由 q_2 指向 q_1 ,如图 1.2-1 所示, $\boldsymbol{e}_r$ 为该方向的单位矢量,即

$$\mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}} \quad (1.2-2)$$

把(1.2-1)式写成等式,就得到库仑定律的数学表示式

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_r \quad (1.2-3)$$

比例系数 k 的值取决于式中各量的单位. 对同号电荷, $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 同方向, 作用力为排斥力; 对异号电荷, $\mathbf{F}_{12}$ 与 $\mathbf{e}_r$ 反方向, 作用力为吸引力. 点电荷 1 对点电荷 2 的作用力 $\mathbf{F}_{21}$ 与 $\mathbf{F}_{12}$ 的大小相等, 方向相反, 满足牛顿第三定律.

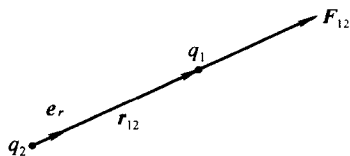


图 1.2-1 同号电荷 q_2 对 q_1 的作用力 $\mathbf{F}_{21}$ 沿 q_1 与 q_2 的连线, 并由 q_2 指向 q_1

2. 电量的单位

库仑定律(1.2-3)式中的比例系数 k 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). 电量的单位 C 是导出单位,

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$$

其中 A 是 SI 单位制中电流的单位, 称为安培, s 为时间的单位, 称为秒. 既然库仑定律(1.2-3)式中各量的单位都已规定, 比例系数 k 的值只能由测量来确定. 设两个点电荷的电量 $q_1 = q_2 = 1 \text{ C}$, 在真空中相距 $r_{12} = 1 \text{ m}$, 当用 N 为单位去量度它们的作用力时, 所得的数值就等于(1.2-3)式中的 k , 这样确定的 k 的值为

$$k = 8.987\,551\,787 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

为了后面的方便, 我们用另一常数 ϵ_0 表示 k , 规定

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1.2-4)$$

由此得 $\epsilon_0 = 8.854\,187\,82 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$, 近似可取

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (1.2-5)$$

ϵ_0 称为真空介电常数. 这样, 在 SI 单位制中, 库仑定律的表示式为

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_r \quad (1.2-6)$$

3. 真空的概念及其演变 正负电子的湮没及产生

库仑定律(1.2-6)式给出了处在真空中的两点电荷之间的作用力, 通常称为真空中的库仑定律. 在物理学中, 真空的概念是在不断演变的, 真空变得越来越复杂. 真空并非什么都没有, 恰恰相反, 真空有许多复杂的性质, 有丰富的内容.

最早,人们头脑中的真空是指什么都不存在的空间,若房间内什么物件都不存在,则此房间便是真空.后来发现,房间内虽无看得见的东西,但仍充满着各种气体的原子或分子,并非真空,于是认为只要把气体抽去后,房间便成真空.场的概念确立以后,认识到真空中虽无原子、分子,但仍充满着场.场是物质的一种形态,因此真空仍是有物质存在的空间.在经典的电磁理论范围内,把真空看作没有原子、分子存在的空间就可以了.但随着物理学的不断发展,真空的概念亦在发展,内容也更加丰富.

1928年,狄拉克把薛定谔(Schrödinger)波动方程推广到相对论的情形中,得到所谓狄拉克方程.把狄拉克方程用到电子,得到电子的总能量可以是正也可以是负的结论.若电子的静止质量为 m_0 ,其静能为 m_0c^2 ,电子可以处在大于 $+m_0c^2$ 的状态,也可处在小于 $-m_0c^2$ 的状态,并可从正能量状态向负能量状态跃迁,如图 1.2-2 所示.“负能量”问题在相对论力学中普遍存在,在量子力学中,引起了重视.例如,一个正常的氢原子,可以不断地发出辐射并向低能级跃迁,由于低能量没有下限,能量负了还可以负,好像在一个无底的深渊里永远向下沉,这将与氢原子稳定的事实相抵触.根据泡利不相容原理,每一个确定的电子状态只允许有一个电子,如果所有的能量为负的电子状态都被电子占满,则能量为正的电子就不可能再跃迁到负能量的状态上去了,因而氢原子不可能不断发出辐射而跃迁到负能级去,从而保证了氢原子的稳定性.在物理上,把所有的电子的负能量状态都被粒子占满、所有的电子的正能量状态都空着,没有被粒子占有的状态称为真空.所以真空也就是粒子能量最低的状态.做一个比方,设想空间充满着完全相同的东西,你也许会感到这空间与什么都没有的空间完全相当,一旦空间出现了某种破绽,有了某种缺陷,即发生了破缺,你也许反而感到出现破缺的地方不空了,有什么东西存在了.

在真空状态,若给一定的能量,把电子从负能量状态激发到正能量状态,于是正能量状态出现一个电子,带负电,而负能量状态留下一个“空穴”,结果,其他处在负能量状态的电子便可进入这一空穴,留下一个新的空穴,或者说空穴发生了“转移”.空穴的运动行为与电子的运动行为一样,其质量与电子的质量相等,电量也与电子的电量相等,不过是正的电荷.这个空穴就是正电子,它是电子的反粒子.1932年,安德逊(C. D. Anderson)从宇宙射线中找到了正电子,证实了狄拉克的设想.当负能态存在空穴时,一个处在正能态的电子可以跃迁到负能态,把负能态的空穴占领,并发出光子.这时,正能态的电子不见了,负能态的空穴也不见了,仅多出了光子.这就是正负电子湮没产生光子的过程.相反,若处在负能态的电子吸收光子后跃迁到正能态,于是光子不见了,正能态出现了一个电子,负能态出现了一个空穴,这就是光子产生正、负电子的过程.按照现代量子场论的观点,粒子存在的状态可看作相应的量子场的激发态,而未被激发的状态代表了没有任何粒子存在的状态,看作是自然界的真空,所以真空就是量子场的基态.

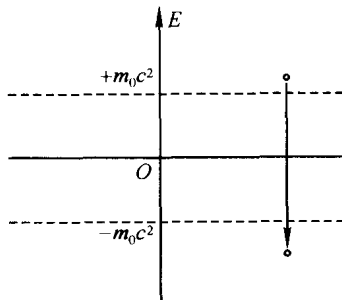


图 1.2-2 电子从正能级到负能级的跃迁

4. 几点说明

1. 库仑定律中的电荷相对观察者(或实验室参考系)都处在静止状态. 实验表明, 静止电荷对运动电荷的作用力仍由(1.2-6)式给出, 但是运动电荷对静止电荷的作用力不能用库仑定律来表示, 运动电荷的电效应比较复杂, 我们将在第六章中讨论这一问题.

2. 库仑定律指出, 两静止电荷间的作用是有心力, 力的大小与两电荷间的距离服从平方反比律. 我们将看到, 静电场的基本性质正是由静电力的这两个基本特性决定的.

3. 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. 验证平方反比律的一种方法是假定力按 $1/r^{2+\delta}$ 变化, 然后通过实验求出 δ 的数值(当然这些实验并不是用扭秤进行的). 1971 年的实验结果是 $\delta \leq 2 \times 10^{-16}$.

4. 库仑定律给出的平方反比律中, r 值的范围相当大. 虽然在库仑的实验中, r 只有若干英寸, 但近代物理与地球物理的实验表明, r 值的数量级大到 10^7 m 而小到 10^{-17} m 的时候, 平方反比律仍然成立.

5. 叠加原理

当空间存在两个以上的点电荷时, 任意两个点电荷间都存在相互作用. 实验指出, 两个点电荷间的作用力不因第三个电荷的存在而改变. 不管一个体系中存在多少个点电荷, 每一对点电荷之间的作用力都服从库仑定律, 而任一点电荷所受到的力等于所有其他点电荷单独作用于该点电荷的库仑力的矢量和, 这一结论称为叠加原理.

设有 n 个点电荷组成的体系, 第 j 个点电荷 q_j 作用于第 i 个点电荷 q_i 的库仑力为

$$\mathbf{F}_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \mathbf{e}_{r_{ij}}$$

式中 r_{ij} 为 q_j 到 q_i 的距离, $\mathbf{e}_{r_{ij}}$ 为从 q_j 指向 q_i 方向的单位矢量, 如图 1.2-3 所示. 根据叠加原理, q_i 受到的合力为

$$\mathbf{F} = \sum_j \mathbf{F}_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \mathbf{e}_{r_{ij}} \quad (1.2-7)$$

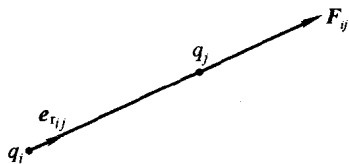


图 1.2-3 点电荷 q_j 对 q_i 的作用力 $\mathbf{F}_{ij}$

叠加原理是自然界客观事实的总结,叠加原理与库仑定律相结合,构成了整个静电学的基础.但不能理所当然认为,叠加原理应在一切情况下都是成立的.在某些非常小的范围内如原子或亚原子范围内,叠加原理并不成立.

6. 生物大分子中的静电力 DNA 的结构及其功能

生物体内分子量在 $10^4 \sim 10^{12}$ 间的多聚合物称为生物大分子,例如蛋白质、核酸和多糖等,它们行使着多种重要的生命功能.生物大分子的结构、功能是由组成生物大分子的原原子、原子集团间的相互作用力决定的.原子、分子中各种不同形式的相互作用就其起因都来自原子内部各带电粒子间的电相互作用,属于静电力,服从库仑定律.

一类重要的生物大分子是核酸,它存在于所有的生物体内,是生物体贮存和传递遗传信息的载体,是生物体遗传和变异的物质基础.核酸是生物界 35 亿年进化历史的接力棒,它与个体的代谢、生长、发育、适应、免疫和病理过程密切相关.核酸可分为核糖核酸(RNA)和脱氧核糖核酸(DNA)两大类,它们都是由称为核苷酸的组分组成的聚合物.一个核苷酸含有一个糖基、一个碱基和一个磷酸.组成 DNA 的核苷酸的糖基为脱氧糖基,故 DNA 称为脱氧核糖核酸. DNA 中的碱基有四种:胞嘧啶(C)、胸嘧啶(T)、腺嘌呤(A)和鸟嘌呤(G).组成 RNA 的核苷酸的碱基也有四种:胞嘧啶(C)、尿嘧啶(U)、腺嘌呤(A)和鸟嘌呤(G).

1955 年美国遗传学家华特生(J. Watson)和英国物理学家克利克(F. Crick)提出了 DNA 的双螺旋型结构模型,即 DNA 是由两条相互平行的多核苷酸链构成的,两条链的走向相反,平行地绕同一轴以右手螺旋方向旋转.每条链中的核苷酸按碱基的不同而有一定的排列顺序,核苷酸的脱氧糖基和磷酸基在链的外侧,碱基位于链的内侧,并分别与另一链中的碱基结合,使双螺旋具有固定的空间结构.每条链中不同碱基的核苷酸的排列顺序是遗传密码问题,两条链间碱基的结合有严格的规则,一条链中的腺嘌呤(A)与另一链中的胸嘧啶(T)连成对,一条链中的鸟嘌呤(G)与另一链中的胞嘧啶(C)连成对,即两条链中核苷酸的碱基形成严格的 A—T 对和 G—C 对. DNA 的双螺旋结构如图 1.2-4 所示.

A—T 对和 G—C 对间碱基的结合力是静电力.我们知道氢原子只有一个电子,但在某种情况下,氢原子能与其他原子结合,那个附加的与氢原子结合的原子一般为氮、氧或氟,它们是原子体积较小的负电性原子,这种结合力来自氢原子核的正电荷对氮、氧或氟等负电性原子的静电吸引力.如两个氢原子与一个氧原子通过共用氢原子的价电子结合

成水,当氢原子的一个价电子被共价后,其带正电的核在一定程度上“暴露”在外面,从而对另一个水分子中的氧有静电作用力,使水出现冰的结构,如图 1.2-5 中虚线就代表这种作用,称为氢键. DNA 的两条链中的 A—T 和 G—C 对的结合也是依靠这种氢键.

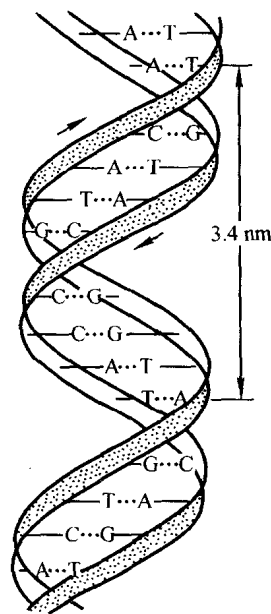


图 1.2-4 DNA 的双螺旋结构

DNA 中碱基的 A—T、G—C 严格配对规律是遗传密码传递的关键. 在某种酶的作用下, DNA 中碱基 A—T、G—C 之间静电作用会解脱, 从而变成两条独立的链, 每条链上 A、T、G、C 的电荷暴露在外面, 由于细胞质中有大量的活性游离的核苷酸, 当它们靠近已解开的单链时, 因静电力而被结合, 结合对象严格按配对规律进行选择. 这样 DNA 的每一条单链又结合成一条双链. 新形成的 DNA 双链中 A—T、G—C 的排列顺序与原来的完全相同, 这就是 DNA 的自我复制能力. 在自我复制中, 静电力起了选择作用. DNA 的自我复制能力可用图 1.2-6 来表示.

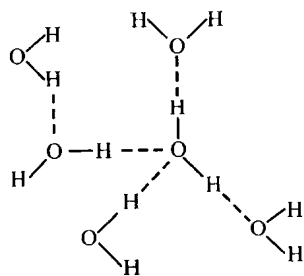


图 1.2-5 氢键

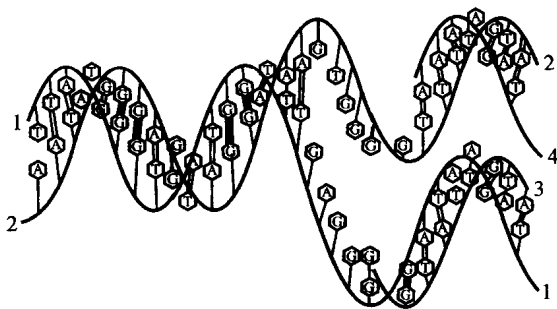


图 1.2-6 DNA 的自我复制

DNA 的另一功能是转录. 在某种酶的作用下将产生一种核糖核酸 RNA, 它的核苷酸的碱基的排列顺序与 DNA 相对应, 只是胸嘧啶(T)被尿嘧啶(U)所代替. 在转录过程中, RNA 把 DNA 中核苷酸碱基的排列顺序即遗传密码转录出来, 并带着这些密码到蛋白质合成场所形成相对应的氨基酸.

所谓基因, 就是链上一节有功能的区段, 这一区段的 DNA 不但有起始信号和终止信号, 而且具有自体复制、决定性状和发生突变等基本特征. 作为基因的 DNA 区段的平均“长度”约含有 1 200 个碱基对. 如果我们把一个区段的 DNA 看作是由 4 个字母书写成的长为 N 的语句, 则可能形成的语句有 4^N 种. 若 $N = 1\,000$, 则 4 个碱基形成的不同序列的区段有 $4^{1\,000} = 10^{602}$ 种. 若碱基排列的突变是随机的, 每发生一次突变经历的时间为 10^{-8} s, 那么向一个确定目标进化的序列所经历的时间将为 10^{587} a, 这远远超过宇宙的年龄, 可见进化的速度比上面的估计要快得多. 物种竞争将怎样进化, 看来是一个尚未解决的问题. 分子遗传学是一个极有挑战性的领域, 而在解决这些问题的过程中, 物理学家仍能发挥其特有的作用.

§ 1.3 电场和电场强度

1. 电场

库仑定律给出了两个静止电荷间的相互作用力, 但没有说明这种作用是通

过什么途径发生的. 两个电荷相隔一定距离, 虽无任何由原子、分子所组成的物质媒介, 却可以发生相互作用. 历史上, 围绕电力的传递问题有过长期争论, 一种看法认为: 一个电荷对另一电荷的作用无需经中间物传递, 而是超越空间直接地瞬时地发生的, 这就是超距作用的观点, 即

电荷 $\Leftrightarrow$ 电荷

另一种看法是: 一个电荷对另一个电荷的作用是通过空间某种中间物为媒介, 以一定的有限的速度传递过去的, 这就是近距作用的观点. 传递相互作用的中间物, 历史上最早认为是一种特殊的弹性媒质——以太.

近代物理的发展证明, 超距作用的观点是错误的, 近距作用的观点才是正确的. 电力(磁力也是这样)虽然以极快的速度传递, 但该速度仍然有限. 在真空中, 它的速度就是真空中的光速 c ,

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

但“以太”并不存在, 电力(磁力)通过电场(磁场)传递. 凡是有电荷的地方, 周围就存在电场, 即电荷在自己的周围产生电场或激发电场, 电场对处在场内的其他电荷有力作用. 电荷受到电场的作用力仅由该电荷所在处的电场决定, 与其他地方的电场无关, 这就是场的观点. 按照这种观点, 电荷间的相互作用可表示为

电荷 $\Leftrightarrow$ 电场 $\Leftrightarrow$ 电荷

静止电荷产生的电场称为静电场, 静电场对其他静止电荷的作用力就是静电力. 电场并不限于静电场, 凡对静止电荷有作用力的场都是电场. 在静电场范围内, 电荷间的作用是超距作用还是通过场传递, 无法判断, 因而也就无法确定超距作用和近距作用两种观点谁是谁非. 然而, 在电场随时间变化的情况下, 例如当场源运动时, 两种观点的区别就显示出来了. 设两点电荷, 电量分别为 q_1 和 q_2 , 在某一时刻 t , 它们的距离为 r . 这时, q_2 对 q_1 有一定的作用力, 若 q_2 突然改变位置, 使两电荷的距离发生变化, 按超距作用的观点, q_1 受到的作用应同时变化. 但按场的观点, 当 q_2 位置变化时, q_1 受到的作用力并不立即变化. 因为 q_2 在新位置产生的场将以有限的速度 c 向 q_1 传播, 经过一定的时间 Δt 之后, 当 q_1 所在处的场发生变化时, q_1 受到的作用力才变化. 所以, q_2 对 q_1 作用力的变化要比 q_2 位置的变化推迟一定时间 $\Delta t = r/c$. 实验结果证明场的观点是正确的. 以后我们还将看到, 电场和磁场与实物(由原子或分子构成的物质)一样, 具有动量和能量, 服从一定的运动规律, 它们可以脱离电荷和电流单独存在. 与物质的实物形式一样, 电磁场也是物质的一种形式.

2. 电场强度

电场的一个重要特性是对处在场内的其他静止电荷有力作用. 因此, 我们可以通过电场对电荷的作用力来研究电场, 并用电荷作为研究和检测电场的工具.

例如,把一点电荷逐次置于空间某个区域的各个位置上,如果这点电荷总是不受力的作用,则该区域内无其他电荷的电场存在;反之,则存在电场.用于研究和检测电场的电荷称为试探电荷或检测电荷.产生被研究电场的电荷称为源电荷.源电荷可以是若干个点电荷,也可以是具有某种电荷分布和某种形状的带电物体.试探电荷应满足一定的条件.首先,它的电量 q_0 应尽可能小,使它对源电荷的作用非常小,这样,试探电荷的引入几乎不会引起源电荷分布的变化;其次,试探电荷本身的几何线度应尽可能小,这样才可能用它来探测场内每一点的性质.今后凡讲到试探电荷,我们都认为是满足这些条件的.

在电场内任一确定点,试探电荷受到的电场作用力与试探电荷的电量有关.电场对试探电荷的作用力是由电场与试探电荷共同决定的.但是电场对试探电荷的作用力与试探电荷电量之比是一个与试探电荷无关而仅由电场本身性质决定的物理量,我们用它来描写电场,称为电场强度,简称场强.

若电量为 q_0 的试探电荷在场内某点受到的作用力为 F ,则该点的电场强度定义为

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1.3-1)$$

电场内任意一点的电场强度在数值上等于一个单位电量的电荷在该点受到的作用力,电场强度的方向与正电荷在该点受力的方向相同.

一般讲来,空间不同点的场强的大小和方向都是不同的,即电场强度是空间位置 x, y, z 的函数,

$$E = E(x, y, z)$$

电场是矢量场.若空间各点场强的大小和方向都相同,则称之为均匀电场或匀强电场.电场强度的单位是 N/C.

3. 点电荷与点电荷系的场强

设场源是电量为 q 的点电荷.为了研究它的场,设想把电量为 q_0 的试探电荷引入场内的考察点 P , P 点到 q 的距离为 r .由库仑定律,源电荷 q 作用于试探电荷 q_0 的力为

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} e_r$$

式中 e_r 是从向 q 指向 q_0 的单位矢量. P 点的电场强度为

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} e_r \quad (1.3-2)$$

若场源由 n 个点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 组成,设 E_i 为第 i 个点电荷 q_i 在考察点 P 处产生的电场的场强,由(1.3-2)式得

$$\mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{e}_{ri}$$

式中 r_i 是 q_i 到 P 点的距离, $\mathbf{e}_{ri}$ 是 q_i 指向 P 点的单位矢量. 根据力的叠加原理, 各源电荷在 P 点产生的电场的总场强为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots = \sum_i \mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{e}_{ri} \quad (1.3-3)$$

即一组点电荷共同产生的电场的场强等于每个点电荷在该点单独产生的电场的场强的矢量和(图 1.3-1). 这一结论称为场强的叠加原理.

4. 任意形状带电体的电场

点电荷是一种理想模型, 只有当考察其场强的地点到源电荷的距离比源电荷本身的线度大得多时, 源电荷才能当作点电荷, (1.3-2) 式才成立. 当带电体不能作为点电荷处理时, 就必需考虑带电体的形状和大小, 以及电荷在带电体上的分布情况. 对于任意形状的带电体, 我们可以想象把它分割成许多足够小的电荷元 dq , 每一电荷元在所讨论的问题中都可看作点电荷, 于是电荷元 dq 单独产生的电场的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r$$

式中 r 是电荷元 dq 到考察点 P 的距离, $\mathbf{e}_r$ 是单位矢量, 由电荷元指向考察点, 如图 1.3-2 所示. 由电场的叠加原理, 整个带电体产生的电场的场强为

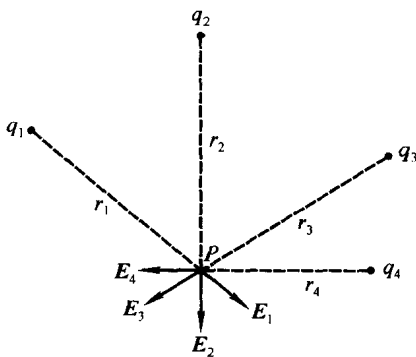


图 1.3-1 诸点电荷在 P 点产生的电场

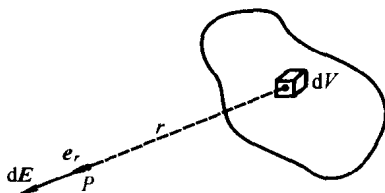


图 1.3-2 带电体上的电荷元在 P 点产生的电场

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r \quad (1.3-4)$$

若电荷分布在带电体内部, 则可以用电荷体密度 ρ 描写电荷在带电体内的

分布. 电荷体密度定义为单位体积内的电量, 即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV} \quad (1.3-5)$$

知道了电荷体密度, 带电体内任一电荷元的电量

$$dq = \rho dV \quad (1.3-6)$$

代入(1.3-4)式, 即可求得体分布的源电荷所产生的电场.

上面的讨论, 实际上已认为电荷在带电体上是连续分布的. 我们知道, 任何带电体所带的电都是一个个电子或原子核所带电荷的集合, 只能是电子电量的整数倍, 所以带电体的电量具有不连续性. 但是, 宏观上的电量包含着极大量的基元电荷(例如, 一普通的电容器充电到数百伏后, 极板上带有的基元电荷数达到 10^{15} 的数量级), 因此, 在宏观范围内, 我们可以认为电荷是连续地“粘”在带电体上的, 或者说电荷是连续地分布在带电体上的, 毋需考虑电荷的不连续性. 当然, 在取电荷元 dq 时, 一方面要求电荷元非常小, 可以把它看作点电荷, 另一方面 dq 又应足够大, 仍包含大量基本电荷. 同样, 在电荷体密度的定义式(1.3-5)中, $\Delta V \rightarrow 0$ 的含义与数学上的无限小量也有所不同, 因为电荷具有分立特性, ΔV 太小, 可能使 ΔV 内一个电子也没有. 在物理上, $\Delta V \rightarrow 0$ 的含义是 ΔV 在宏观上足够小, 足以反映电荷密度在空间的细致变化, 但在微观上却相当大, 即比单个原子或分子的体积要大得多, 以致在 ΔV 内仍然包含有大量的原子或分子, 电荷仍然可以看作是连续分布的. 通常, 把这种意义下的无穷小量称为物理无穷小量. 物理上的无穷小量是可实现的. 例如, 以气体为例, 在标准状态下, 每立方厘米的气体中有 3×10^{19} 个分子, 若我们取体积元 $\Delta V = 10^{-10} \text{ cm}^3$, 这在宏观上是一个非常小的量, 但其中仍然含有 10^9 个分子.

在有些问题中, 电荷仅分布在物体表面一个薄层内. 当薄层的厚度在所讨论的问题中可以忽略不计时, 这种电荷称为面电荷. 可以用电荷的面密度来描写电荷在表面上的分布. 设想表面层的厚度为 δ . 取一面元 ΔS , 层内的电荷体密度为

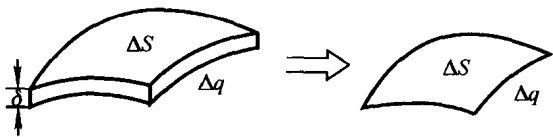


图 1.3-3 面分布的电荷可看成体分布电荷的极限

ρ , 则对应体元内的电量 $\Delta q = \rho \Delta S \delta$, 如图 1.3-3 所示. 电荷的面分布意味着当厚度 $\delta \rightarrow 0$ 时, Δq 并不为零, 这要求薄层内电荷的体密度 $\rho \rightarrow \infty$ 以保证 $\rho \delta$ 为有限. $\rho \delta$ 的极限称为电荷的面密度, 用 σ 表示,

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S} = \lim_{\delta \rightarrow 0, \rho \rightarrow \infty} \delta \rho \quad (1.3-7)$$