



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
2009年度普通高等教育精品教材

C5版

张三慧 编著

大学物理学

下册

(第三版)



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
2009年度普通高等教育精品教材

张三慧 编著

C5版

大学物理学

下册

(第三版)

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是张三慧编著的《大学物理学》(第三版)中的下册,包括电磁学、光学和量子物理,按传统方法讲述电磁学的基本理论,包括静止和运动电荷的电场,运动电荷和电流的磁场,介质中的电场和磁场,电磁感应,电磁波等。除了基本内容外,还专题介绍了大气电学、超导、等离子体等今日物理趣闻和著名科学家介绍,作为选讲或选读内容,以扩大学生的现代知识领域。基本内容简明扼要,选读部分通俗易懂。

本书可作为高等院校的物理教材,也可以作为中学物理教师教学或其他读者自学的参考书,与本书配套的《大学物理学(第三版)学习辅导与习题解答》可帮助读者学习本书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学: C5 版. 下册/张三慧编著. --3 版. --北京: 清华大学出版社, 2013. 1
ISBN 978-7-302-30405-0

I. ①大… II. ①张… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 242969 号

责任编辑: 邹开颜

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 清华大学印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 16.25 字 数: 373 千字

版 次: 1982 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 3 版 印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 1~5500

定 价: 29.00 元

产品编号: 048493-01

前言

FOREWORD

这部《大学物理学》(第三版)含力学、热学、电磁学、光学和量子物理 5 部分内容。本书内容完全涵盖了 2006 年我国教育部发布的“非物理类理工学科大学物理课程基本要求”。书中对物理学的基本概念与规律进行了正确明晰的讲解。讲解基本上都是以最基本的规律和概念为基础,推演出相应的概念与规律。笔者认为,在教学上应用这种演绎逻辑更便于学生从整体上理解和掌握物理课程的内容。

力学是以牛顿定律为基础展开的。除了直接应用牛顿定律对问题进行动力学分析外,还引入了动量、角动量、能量等概念,并着重讲解相应的守恒定律及其应用。除惯性系外,还介绍了利用非惯性系解题的基本思路,刚体的转动、振动、波动这三章内容都是上述基本概念和定律对于特殊系统的应用。

热学的讲述是以微观的分子运动的无规则性这一基本概念为基础的。除了阐明经典力学对分子运动的应用外,特别引入并加强了统计概念和统计规律,包括麦克斯韦速率分布律的讲解。对热力学第一定律也阐述了其微观意义。对热力学第二定律是从宏观热力学过程的方向性讲起,说明方向性的微观根源,并利用热力学概率定义了玻耳兹曼熵并说明了熵增加原理。这种讲法最能揭露熵概念的微观本质,也便于理解熵概念的推广应用。

电磁学按照传统讲法,讲述电磁学的基本理论,包括静止和运动电荷的电场、运动电荷和电流的磁场、介质中的电场和磁场、电磁感应、电磁波等。

光学以电磁波和振动的叠加的概念为基础,讲述了光电干涉和衍射的规律。光的偏振讲述了电磁波的横波特征。然后,根据光电波动性在特定条件下的近似特征——直线传播,讲述了几何光学的基本定律及反射镜和透镜的成像原理。

以上力学、热学、电磁学、光学各部分的内容基本上都是经典理论,但在适当地方穿插了量子理论的概念和结论以便相互比较。

量子物理是从波粒二象性出发以定态薛定谔方程为基础讲解的。介绍了原子、分子中电子的运动规律以及狭义相对论的知识。狭义相对论的讲解以两条基本假设为基础,从同时性的相对性这一“关键的和革命的”(杨振宁语)概念出发,逐渐展开得出各个重要结论。这种讲解可以比较自然地使学生从物理上而不只是从数学上弄懂狭义相对论的基本结论。关于教学要求中的扩展内容,如基本粒子和宇宙学的基本知识是在“今日物理趣闻 A”和“今日物理趣闻 C”栏目中作为现代物理学前沿知识介绍的。

本书除了 5 部分的基本内容外,还开辟了“今日物理趣闻”栏目,介绍物理学的近代应用与前沿发展。

本书各章均配有习题,以帮助学生理解和掌握已学的物理概念和定律或扩充一些新的知识。这些题目有易有难,绝大多数是实际现象的分析和计算。题目的数量适当,不以多取胜。也希望学生做题时不要贪多,而要求精,要真正把做过的每一道题从概念原理上搞清楚,并且用尽可能简洁明确的语言、公式、图像表示出来,需知,对一个科技工作者来说,正确地书面表达自己的思维过程与成果也是一项重要的基本功。

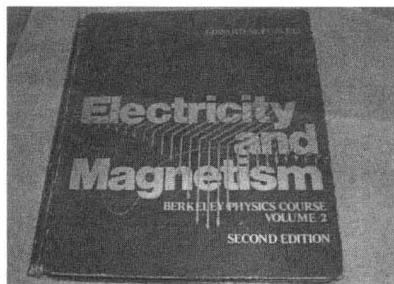
本书在保留经典物理精髓的基础上,特别注意加强了现代物理前沿知识和思想的介绍。本书内容取材在注重科学性和系统性的同时,还注重密切联系实际,选用了大量现代科技与我国古代文明的资料,力求达到经典与现代,理论与实际的完美结合。

本书在量子物理中专门介绍了近代(主要是 20 世纪 30 年代)物理知识,并在其他部分适当介绍了物理学的最新发展,同时为了在大学生中普及物理学前沿知识以扩大其物理学背景,在“今日物理趣闻”专栏中,分别介绍了基本粒子、混沌——决定论的混乱、大爆炸和宇宙膨胀、能源与环境、等离子体、超导电性等专题。这些都是现代物理学以及公众非常关心的题目。本书所介绍的趣闻有的已伸展到最近几年的发现,这些“趣闻”很受学生的欢迎,他们拿到新书后往往先阅读这些内容。

物理学很多理论都直接联系着当代科技乃至人们的日常生活。教材中列举大量实例,既能提高学生的学习兴趣,又有助于对物理概念和定律的深刻理解以及创造性思维的启迪。本书在例题和习题部分引用了大量的实例,特别是反映现代物理研究成果和应用的实例,如全球定位系统、光盘、宇宙探测、天体运行、雷达测速、立体电影等。同时还大量引用了我国从古到今技术上以及生活上的有关资料,例如古籍《宋纪要》关于“客星”出没的记载,北京天文台天线阵,长征火箭,神舟飞船,天坛祈年殿,黄果树瀑布,阿迪力走钢丝,本人抖空竹,1976 年唐山大地震,1988 年特大洪灾,等。这些例子体现了民族文化,可以增强学生对物理的“亲切感”,而且有助于学生的民族自豪感和责任心的提升。

物理教学除了“授业”外,还有“育人”的任务。为此本书介绍了十几位科学大师的事迹,简要说明了他们的思想境界、治学态度、开创精神和学术成就,以之作为学生为人处事的借鉴。在此我还要介绍一下我和帕塞尔教授的一段交往。帕塞尔教授是哈佛大学教授,1952 年因对核磁共振研究的成果荣获诺贝尔物理学奖。我于 1977 年看到他编写的《电磁学》,深深地为他的新讲法所折服。用他的书讲述两遍后,于 1987 年冒然写信向他请教,没想到很快就收到他的回信(见附图)和赠送给我的教材(第二版)及习题解答。他

这种热心帮助一个素不相识的外国教授的行为使我非常感动。



帕塞尔《电磁学》(第二版)封面



本书作者与帕塞尔教授合影(1993年)

HARVARD UNIVERSITY

DEPARTMENT OF PHYSICS

LYMAN LABORATORY OF PHYSICS
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS 02138

November 30, 1987

Professor Zhang Sanhui
Department of Physics
Tsinghua University
Beijing 100084
The People's Republic of China

Dear Professor Zhang:

Your letter of November 8 pleases me more than I can say, not only for your very kind remarks about my book, but for the welcome news that a growing number of physics teachers in China are finding the approach to magnetism through relativity enlightening and useful. That is surely to be credited to your own teaching, and also, I would surmise, to the high quality of your students. It is gratifying to learn that my book has helped to promote this development.

I don't know whether you have seen the second edition of my book, published about three years ago. A copy is being mailed to you, together with a copy of the Problem Solutions Manual. I shall be eager to hear your opinion of the changes and additions, the motivation for which is explained in the new Preface. May I suggest that you inspect, among other passages you will be curious about, pages 170-171. The footnote about Leigh Page repairs a regrettable omission in my first edition. When I wrote the book in 1963 I was unaware of Page's remarkable paper. I did not think my approach was original -- far from it -- but I did not take time to trace its history through earlier authors. As you now share my preference for this strategy I hope you will join me in mentioning Page's 1912 paper when suitable opportunities arise.

Your remark about printing errors in your own book evokes my keenly felt sympathy. In the first printing of my second edition we found about 50 errors, some serious! The copy you will receive is from the third printing, which still has a few errors, noted on the Errata list enclosed in the book. There is an International Student Edition in paperback. I'm not sure what printing it duplicates.

The copy of your own book has reached my office just after I began this letter! I hope my shipment will travel as rapidly. It will be some time before I shall be able to study your book with the care it deserves, so I shall not delay sending this letter of grateful acknowledgement.

Sincerely yours,

Edward M. Purcell
Edward M. Purcell

EMP/cad

帕塞尔回信复印件

他在信中写道“本书 170—171 页关于 L. Page 的注解改正了第一版的一个令人遗憾的疏忽。1963 年我写该书时不知道 Page 那篇出色的文章,我并不认为我的讲法是原创的——远不是这样——但当时我没有时间查找早先的作者追溯该讲法的历史。现在既然你也喜欢这种讲法,我希望你和我一道在适当时机宣扬 Page 的 1912 年的文章。”一位物理学大师对自己的成就持如此虚心、谦逊、实事求是的态度使我震撼。另外他对自己书中的疏漏(实际上有些是印刷错误)认真修改,这种严肃认真的态度和科学精神也深深地教育了我。帕塞尔这封信所显示的作为一个科学家的优秀品德,对我以后的为人处事治学等方面都产生了很大影响,始终视之为楷模追随仿效,而且对我教的每一届学生都要展示帕塞尔的这封信对他们进行教育,收到了很好的效果。

本书的撰写和修订得到了清华大学物理系教师的热情帮助(包括经验与批评),也采纳了其他兄弟院校的教师和同学的建议和意见。此外也从国内外的著名物理教材中吸取了很多新的知识、好的讲法和有价值的素材。这些教材主要有:新概念物理教程(赵凯华等),Feynman Lectures on Physics, Berkeley Physics Course(Purcell E M, Reif F, et al.), The Manchester Physics Series(Mandl F, et al.), Physics(Chianian H C.), Fundamentals of Physics(Resnick R), Physics(Alonso M et al.)等。

对于所有给予本书帮助的教师和学生以及上述著名教材的作者,本人在此谨致以诚挚的谢意。清华大学出版社诸位编辑对第三版杂乱的原稿进行了认真的审阅和编辑,特在此一并致谢。

张三慧

2008年1月

于清华园

目 录

CONTENTS

第 11 章 静电场	1
11.1 电荷	1
11.2 库仑定律与叠加原理	4
11.3 电场和电场强度	6
11.4 静止的点电荷的电场及其叠加	8
11.5 电场线和电通量	12
11.6 高斯定律	15
11.7 利用高斯定律求静电场的分布	17
习题	21
第 12 章 电势	22
12.1 静电场的保守性	22
12.2 电势差和电势	24
12.3 电势叠加原理	26
* 12.4 电势梯度	29
12.5 电荷在外电场中的静电势能	31
* 12.6 电荷系的静电能	31
12.7 静电场的能量	34
习题	35
第 13 章 静电场中的导体	37
13.1 导体的静电平衡条件	37
13.2 静电平衡的导体上的电荷分布	38
13.3 有导体存在时静电场的分析与计算	40
13.4 静电屏蔽	42
习题	43

第 14 章 静电场中的电介质	44
14.1 电介质对电场的影响	44
14.2 电介质的极化	45
14.3 D 的高斯定律	48
14.4 电容器和它的电容	50
14.5 电容器的能量	53
习题	55
第 15 章 稳恒磁场	57
15.1 磁力与电荷的运动	57
15.2 磁场与磁感应强度	58
15.3 毕奥-萨伐尔定律	61
15.4 安培环路定理	66
15.5 利用安培环路定理求磁场的分布	68
15.6 与变化电场相联系的磁场	71
习题	73
第 16 章 磁力	75
16.1 带电粒子在磁场中的运动	75
16.2 霍尔效应	77
16.3 载流导线在磁场中受的磁力	79
16.4 载流线圈在均匀磁场中受的磁力矩	80
16.5 平行载流导线间的相互作用力	82
习题	83
 日物理趣闻 F 等离子体	85
F.1 物质的第四态	85
F.2 等离子体内的磁场	87
F.3 磁场对等离子体的作用	88
第 17 章 磁场中的磁介质	90
17.1 磁介质对磁场的影响	90
17.2 原子的磁矩	91
17.3 磁介质的磁化	94
17.4 H 的环路定理	96
17.5 铁磁质	98

习题	101
第 18 章 电磁感应	102
18.1 法拉第电磁感应定律	102
18.2 动生电动势	104
18.3 感生电动势和感生电场	107
18.4 互感	108
18.5 自感	109
18.6 磁场的能量	111
18.7 麦克斯韦方程组	112
习题	115
 日物理趣闻 G 超导电性	117
G.1 超导现象	117
G.2 临界磁场	118
G.3 超导体中的电场和磁场	119
第 19 章 光的干涉	121
19.1 杨氏双缝干涉	121
19.2 相干光	124
19.3 光程	127
19.4 薄膜干涉(一)——等厚条纹	128
19.5 薄膜干涉(二)——等倾条纹	132
19.6 迈克耳孙干涉仪	133
习题	134
第 20 章 光的衍射	136
20.1 光的衍射和惠更斯-菲涅耳原理	136
20.2 单缝的夫琅禾费衍射	138
20.3 光学仪器的分辨本领	141
20.4 光栅衍射	143
20.5 X 射线衍射	146
习题	148
 日物理趣闻 H 全息照相	150
H.1 全息照片的拍摄	150

H.2	全息图像的观察	152
H.3	全息照相的应用	153
第 21 章	光的偏振	154
21.1	光的偏振状态	154
21.2	线偏振光的获得与检验	156
21.3	反射和折射时光的偏振	158
21.4	双折射现象	160
	习题	164
今日物理趣闻 I	液晶	165
I.1	液晶的结构	165
I.2	液晶的光学特性	166
第 22 章	狭义相对论基础	169
22.1	牛顿相对性原理和伽利略变换	169
22.2	爱因斯坦相对性原理和光速不变	172
22.3	同时性的相对性和时间延缓	173
22.4	长度收缩	178
22.5	洛伦兹坐标变换	180
22.6	相对论速度变换	182
22.7	相对论质量	184
22.8	相对论动能	185
22.9	相对论能量	186
22.10	动量和能量的关系	188
	习题	189
第 23 章	波粒二象性	190
23.1	黑体辐射	190
23.2	光电效应	193
23.3	光的二象性 光子	195
23.4	康普顿散射	197
23.5	粒子的波动性	200
23.6	概率波与概率幅	203
23.7	不确定关系	206
	习题	209

第 24 章 薛定谔方程	211
24.1 薛定谔得出的波动方程	211
24.2 无限深方势阱中的粒子	214
24.3 势垒穿透	217
24.4 谐振子	221
习题	222
第 25 章 原子中的电子	224
25.1 氢原子	224
25.2 电子的自旋与自旋轨道耦合	230
* 25.3 微观粒子的不可分辨性和泡利不相容原理	235
25.4 各种原子核外电子的组态	237
习题	241
数值表	242
习题答案	244

静 电 场

作为电磁学的开始,本章讲解静止电荷相互作用的规律。在简要地说明了电荷的性质之后,就介绍了库仑定律。由于静止电荷是通过它的电场对其他电荷产生作用的,所以关于电场的概念及其规律就具有基础性的意义。本章除介绍用库仑定律求静电场的方法之外,特别介绍了更具普遍意义的高斯定律及应用它求静电场的方法。对称性分析已成为现代物理学的一种基本的分析方法,本章在适当地方多次说明了对称性的意义及利用对称性分析问题的方法。无论是概念的引入,或是定律的表述,或是分析方法的介绍,本章所涉及的内容,就思维方法来讲,对整个电磁学(甚至整个物理学)都具有典型的意义,希望读者细心地、认真地学习体会。

11.1 电荷

物体能产生电磁现象,现在都归因于物体带上了电荷以及这些电荷的运动。通过对电荷(包括静止的和运动的电荷)的各种相互作用和效应的研究,人们现在认识到电荷的基本性质有以下几方面。

1. 电荷的种类

电荷有两种,同种电荷相斥,异种电荷相吸。美国物理学家富兰克林(Benjamin Franklin, 1706—1790年)首先以正电荷、负电荷的名称来区分两种电荷,这种命名法一直延续到现在。宏观带电体所带电荷种类的不同根源于组成它们的微观粒子所带电荷种类的不同:电子带负电荷,质子带正电荷,中子不带电荷。现代物理实验证实,电子的电荷集中在半径小于 10^{-18} m的小体积内。因此,电子被当成是一个无内部结构而有有限质量和电荷的“点”。通过高能电子束散射实验测出的质子和中子内部的电荷分布分别如图11.1(a),(b)所示。质子中只有正电荷,都集中在半径约为 10^{-15} m的体积内。中子内部也有电荷,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。

带电体所带电荷的多少叫电量。谈到电量,就涉及如何测量它的问题。一个电荷的量值大小只能通过该电荷所产生的效应来测量,现在我们先假定电量的计量方法已有了。电量常用 Q 或 q 表示,在国际单位制中,它的单位名称为库[仑],符号为C。正电荷电量

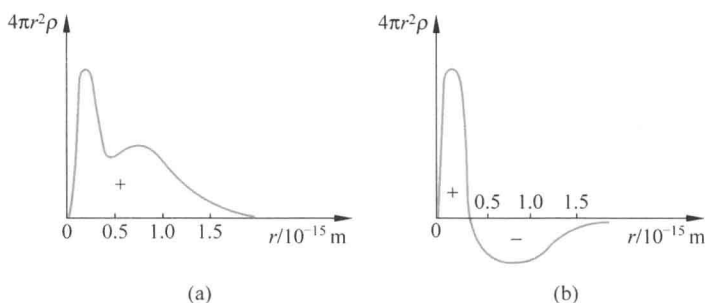


图 11.1 质子内(a)与中子内(b)电荷分布图

取正值,负电荷电量取负值。一个带电体所带总电量为其所带正负电量的代数和。

2. 电荷的量子性

实验证明,在自然界中,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,常以 e 表示。经测定

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

电荷具有基本单元的概念最初是根据电解现象中通过溶液的电量 and 析出物质的质量之间的关系提出的。法拉第(Michael Faraday, 1791—1867 年)、阿累尼乌斯(Arrhenius, 1859—1927 年)等都为此做出过重要贡献。他们的结论是:一个离子的电量只能是一个基本电荷的电量的整数倍。直到 1890 年斯通尼(John Stone Stoney, 1826—1911 年)才引入“电子”(electron)这一名称来表示带有负的基元电荷的粒子。其后,1913 年密立根(Robert Anolvews Millikan, 1868—1953 年)设计了有名的油滴试验,直接测定了此基元电荷的量值。现在已经知道许多基本粒子都带有正的或负的基元电荷。例如,一个正电子,一个质子都各带有一个正的基元电荷。一个反质子,一个负介子则带有一个负的基元电荷。微观粒子所带的基元电荷数常叫做它们各自的电荷数,都是正整数或负整数。近代物理从理论上预言基本粒子由若干种夸克或反夸克组成,每一个夸克或反夸克可能带有 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的电量;然而至今单独存在的夸克尚未在实验中发现(即使发现了,也不过把基元电荷的大小缩小到目前的 $1/3$,电荷的量子性依然不变)。

本章大部分内容讨论电磁现象的宏观规律,所涉及的电荷常常是基元电荷的许多倍。在这种情况下,我们将只从平均效果上考虑,认为电荷连续地分布在带电体上,而忽略电荷的量子性所引起的微观起伏。尽管如此,在阐明某些宏观现象的微观本质时,还是要从电荷的量子性出发。

在以后的讨论中经常用到点电荷这一概念。当一个带电体本身的线度比所研究的问题中所涉及的距离小很多时,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。由此可见,点电荷是个相对的概念。至于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。当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。

3. 电荷守恒

实验指出,对于一个系统,如果没有净电荷出入其边界,则该系统的正、负电荷的电量的代数和将保持不变,这就是**电荷守恒定律**。宏观物体的带电、电中和以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部运动的结果。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。

现代物理研究已表明,在粒子的相互作用过程中,电荷是可以产生和消失的。然而电荷守恒并未因此而遭到破坏。例如,一个高能光子与一个重原子核作用时,该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这叫**电子对的“产生”**);而一个正电子和一个负电子在一定条件下相遇,又会同时消失而产生两个或三个光子(这叫**电子对的“湮灭”**)。在已观察到的各种过程中,正、负电荷总是成对出现或成对消失。由于光子不带电,正、负电子又各带有等量异号电荷,所以这种电荷的产生和消失并不改变系统中的电荷数的代数和,因而电荷守恒定律仍然保持有效^①。

4. 电荷的相对论不变性

实验证明,一个电荷的电量与它的运动状态无关。较为直接的实验例子是比较氢分子和氦原子的电中性。氢分子和氦原子都有两个电子作为核外电子,这些电子的运动状态相差不大。氢分子还有两个质子,它们是作为两个原子核在保持相对距离约为 0.07 nm 的情况下转动的(图 11.2(a))。氦原子中也有两个质子,但它们组成一个原子核,两个质子紧密地束缚在一起运动(图 11.2(b))。氦原子中两个质子的能量比氢分子中两个质子的能量大得多(一百万倍的数量级),因而两者的运动状态有显著的差别。如果电荷的电量与运动状态有关,氢分子中质子的电量就应该和氦原子中质子的电量不同,但两者的电子的电量是相同的,因此,两者就不可能都是电中性的。但是实验证实,氢分子和氦原子都精确地是电中性的,它们内部正、负电荷在数量上的相对差异都小于 $1/10^{20}$ 。这就说明,质子的电量是与其运动状态无关的。

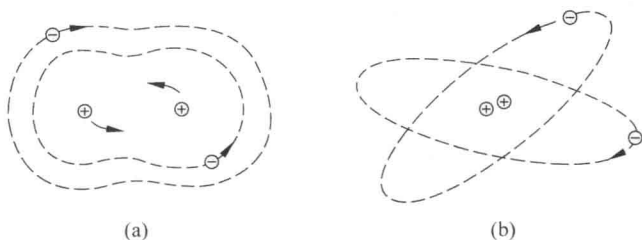


图 11.2 氢分子(a)与氦原子(b)结构示意图

还有其他实验,也证明电荷的电量与其运动状态无关。另外,根据这一结论导出的大

^① 近年来不断有电荷不守恒的实验报道。电子衰变时只能产生中微子,所以电子的衰变就意味着电荷不守恒。有人做实验测知电子的平均寿命要大于 10^{23} 年,这已大大超过宇宙年龄(10^{10} 年),所以实际上电子还是不衰变。在 $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + \text{中性粒子的过程中有中子衰变的过程}$ 。有人分析此实验结果时得出中子的电荷不守恒,但这种电荷不守恒的衰变概率与电荷守恒的衰变概率之比为 7.9×10^{-21} 。这说明在这一过程中即使电荷守恒破坏了,也只是很微小的破坏。

量结果都与实验结果相符合,这也反过来证明了这一结论的正确性。

由于在不同的参考系中观察,同一个电荷的运动状态不同,所以电荷的电量与其运动状态无关,也可以说成是,在不同的参考系内观察,同一带电粒子的电量不变。电荷的这一性质叫电荷的相对论不变性。

11.2 库仑定律与叠加原理

在发现电现象后的 2000 多年的长时期内,人们对电的认识一直停留在定性阶段。从 18 世纪中叶开始,不少人着手研究电荷之间作用力的定量规律,最先是研究静止电荷之间的作用力。研究静止电荷之间的相互作用的理论叫静电学。它是以 1785 年法国科学家库仑(Charles Augustin de Coulomb, 1736—1806 年)通过实验总结出的规律——库仑定律——为基础的。这一定律的表述如下:相对于惯性系观察,自由空间(或真空)中两个静止的点电荷之间的作用力(斥力或吸力,统称库仑力)与这两个电荷所带电量的乘积成正比,与它们之间距离的平方成反比,作用力的方向沿着这两个点电荷的连线。这一规律用矢量公式表示为

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \mathbf{e}_{r_{21}} \quad (11.1)$$

式中, q_1 和 q_2 分别表示两个点电荷的电量(带有正、负号), r_{21} 表示两个点电荷之间的距离, $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 表示从电荷 q_1 指向电荷 q_2 的单位矢量(图 11.3); k 为比例常量,依公式中各量所选取的单位而定。 $\mathbf{F}_{21}$ 表示电荷 q_2 受电荷 q_1 的作用力。当两个点电荷 q_1 与 q_2 同号时, $\mathbf{F}_{21}$ 与 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 同方向,表明电荷 q_2 受 q_1 的斥力;当 q_1 与 q_2 反号时, $\mathbf{F}_{21}$ 与 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 的方向相反,表示 q_2 受 q_1 的引力。由此式还可以看出,两个静止的点电荷之间的作用力符合牛顿第三定律,即

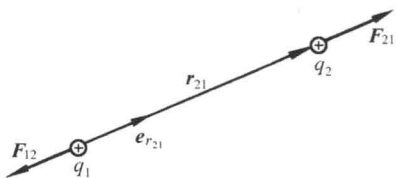


图 11.3 库仑定律

$$\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12} \quad (11.2)$$

式(11.1)中的单位矢量 $\mathbf{e}_{r_{21}}$ 表示两个静止的点电荷之间的作用力沿着它们的连线的方向。对于本身没有任何方向特征的静止的点电荷来说,也只能是这样。因为自由空间是各向同性的(我们也只能这样认为或假定),对于两个静止的点电荷来说,只有它们的连线才具有唯一确定的方向。由此可知,库仑定律反映了自由空间的各向同性,也就是空间对于转动的对称性。

在国际单位制中,距离 r 用 m 作单位,力 F 用 N 作单位,实验测定比例常量 k 的数值和单位为

$$k = 8.9880 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

通常还引入另一常量 ϵ_0 来代替 k ,使

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

于是,真空中库仑定律的形式就可写成

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^2} \mathbf{e}_{r_{21}} \quad (11.3)$$

这里引入的 ϵ_0 叫真空介电常量(或真空电容率),在国际单位制中它的数值和单位是

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

在库仑定律表示式中引入“ 4π ”因子的作法,称为单位制的有理化。这样做的结果虽然使库仑定律的形式变得复杂些,但却使以后经常用到的电磁学规律的表示式因不出现“ 4π ”因子而变得简单些。这种作法的优越性,在今后的学习中读者是会逐步体会到的。

实验证实,点电荷放在空气中时,其相互作用的电力和在真空中的相差极小,故式(11.3)的库仑定律对空气中的点电荷亦成立。

库仑定律是关于一种基本力的定律,它的正确性不断经历着实验的考验。设定律分母中 r 的指数为 $2+\alpha$,人们曾设计了各种实验来确定(一般是间接地) α 的上限。1773年,卡文迪许的静电实验给出 $|\alpha| \leq 0.02$ 。约百年后麦克斯韦的类似实验给出 $|\alpha| \leq 5 \times 10^{-5}$ 。1971年威廉斯等人改进该实验得出 $|\alpha| \leq |2.7 \pm 3.1| \times 10^{-16}$ 。这些都是在实验室范围($10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ m}$)内得出的结果。对于很小的范围,卢瑟福的 α 粒子散射实验(1910年)已证实小到 10^{-15} m 的范围,现代高能电子散射实验进一步证实小到 10^{-17} m 的范围,库仑定律仍然精确地成立。大范围的结果是通过人造地球卫星研究地球磁场时得到的。它给出库仑定律精确地适用于大到 10^7 m 的范围,因此一般就认为在更大的范围内库仑定律仍然有效。

令人感兴趣的是,现代量子电动力学理论指出,库仑定律中分母 r 的指数与光子的静质量有关:如果光子的静质量为零,则该指数严格地为2。现在的实验给出光子的静质量上限为 10^{-48} kg ,这差不多相当于 $|\alpha| \leq 10^{-16}$ 。

例 11.1

氢原子中电子和质子的距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。求此二粒子间的静电力和万有引力各为多大?

解 由于电子的电荷是 $-e$,质子的电荷为 $+e$,而电子的质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$,质子的质量 $m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$,所以由库仑定律,求得两粒子间的静电力大小为

$$F_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 8.1 \times 10^{-8} \text{ (N)}$$

由万有引力定律,求得两粒子间的万有引力

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

由计算结果可以看出,氢原子中电子与质子的相互作用的静电力远较万有引力为大,前者约为后者的 10^{39} 倍。

① 单位 $\text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ 就是 F/m , F (法) 是电容的单位,见第 14 章。