

基础性、拓展性通识课程系列教材

顾问 ◎ 刘沛林 总主编 ◎ 张登玉 副总主编 ◎ 罗文 刘余香

量子物理学

编著 ◎ 高峰



华东师范大学出版社

基础性、拓展性通识课程系列教材

顾问 ◎ 刘沛林 总主编 ◎ 张登玉 副总主编 ◎ 罗文 刘余香

量子物理学

编著 ◎ 高峰



华东师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

量子物理学/高峰编著. —上海:华东师范大学出版社,
2015.7

ISBN 978-7-5675-3807-8

I. ①量… II. ①高… III. ①量子论—高等学校—教材 IV. ①O413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 152547 号

高等学校教材

量子物理学

编 著 高 峰
项目编辑 姚 望
审读编辑 赵金土
装帧设计 孔薇薇

出版发行 华东师范大学出版社
社 址 上海市中山北路 3663 号 邮编 200062
网 址 www.ecnupress.com.cn
电 话 021-60821666 行政传真 021-62572105
客服电话 021-62865537 门市(邮购)电话 021-62869887
地 址 上海市中山北路 3663 号华东师范大学校内先锋路口
网 店 <http://hdsdcbs.tmall.com>

印 刷 者 常熟市大宏印刷有限公司
开 本 787×1092 16 开
印 张 17.25
字 数 331 千字
版 次 2015 年 8 月第 1 版
印 次 2015 年 8 月第 1 次
书 号 ISBN 978-7-5675-3807-8/O·264
定 价 31.00 元

出 版 人 王 焰

(如发现本版图书有印订质量问题,请寄回本社客服中心调换或电话 021-62865537 联系)

内 容 简 介

本书是以 2010 年教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理学类专业教学分委员会编制的“高等学校物理学本科指导性专业规范”为依据,结合我们多年的课程教学实践及教研教改经验编写而成。全书共分为 12 章,内容包括从经典物理学到量子物理学、原子的半经典理论、量子力学基本原理、定态问题、量子力学的算符理论、跃迁问题、散射问题、碱金属原子、全同粒子体系、原子与磁场的相互作用、原子核物理、量子信息与量子计算简介等。教材编写力求简明扼要、突出物理概念、难度适中。

本书可作为高等学校物理学专业和相关专业本科生的教学用书,也可供物理工作者或其他专业技术人员参考。

“二十世纪给物理学带来了相对论和引力理论,量子论和原子壳层理论,以及有关原子核的进一步知识和基本粒子的初步理论。从我们的观点来看,量子论好像是这些进步中最重要的。其重要性体现在它的成就上:它解决了物质和原子结构的问题,并且将化学的基本概念转化为物理学的一部分。其重要性还体现在它的深度上:它迫使我们改变那种描述自然的方式,从而使我们能够对原子作出物理解释。”

F. Hund

物理学作为一门最基础的自然科学,它的发展动力深深地根植于人类对真理的非功利的追求。历史的发展将越来越有力地证明,正是这种非功利的追求给人类带来最大的收益。20 世纪发生的主要源于物理学进展的技术革命,就是最有说服力的例子。在新世纪里,无论是制造业还是服务业,也无论是材料、信息、能源、交通、环境等技术部门,都在呼唤着新的技术革命。认真考察就会发现,19—20 世纪多数变革都基于物理学的进展。在 21 世纪,毫无疑问它们仍然是技术进步的主要源泉。亲爱的读者,在你开始学习量子物理学时,作者谨将上面一段著名物理学家洪德(F. Hund)的话送给您。

前言

进入 21 世纪以来,我国高等教育迅速发展,大学本科教育已由精英教育逐渐向大众化教育转变,教育教学理念、方法手段也都发生了巨大变化,能力培养在高等教育过程中越来越受到重视。对于物理学专业学生而言,除通识理论知识以外,不仅要学习物理学专业知识,还要学习电子电工及较多的高等数学知识,课程门数多,学习任务特别繁重。面对新的教育形势,为了减少必修课程门数,有更多时间加强学生综合素质的培养,我们对传统的普通物理学和理论物理学课程结构进行了优化整合。在微观世界里,所有客体都遵循量子力学规律,原子和原子核也不例外,因此将原子物理学与量子力学整合是符合科学逻辑的。基于这些情况,根据 2010 年教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理学类专业教学分委员会编制的“高等学校物理学本科指导性专业规范”,并结合作者多年来从事原子物理学与量子力学的教学经验写成了本书。

全书共分为 12 章,主要介绍初等量子力学理论(原子与原子核物理被认为是量子力学的应用)。第一章为从经典物理学到量子物理学,介绍原子的基本状况、经典物理学所面临的困难和量子概念的提出。第二章为原子的半经典理论,主要介绍玻尔理论及其局限性。第三章为量子力学基本原理,介绍薛定谔的量子力学基本原理,通过学习这一章,读者应明白量子力学基本原理其实并不难理解,后续的所有理论都是以这一章为基础的。第四章为定态问题,包括一维势阱、简谐振子和氢原子三类典型的能够严格求解的定态问题及不能严格求解时的近似方法。第五章为量子力学的算符理论,读者应明白这一章是量子力学的普遍理论,薛定谔的量子力学理论体系只不过是本章的一个特例,学好了这一章就等于基本上学好了量子力学。第六章为跃迁问题,利用量子力学基本原理研究粒子在不同状态之间的跃迁概率。第七章为散射问题,主要介绍散射的基本概念、分波法和波恩近似。第八章为碱金属原子,主要包括原子实的极化和轨道贯穿及利用轨道和自旋耦合理论处理碱金属原子光谱的精细结构。第九章为全同粒子体系,前面所介绍的量子力学理论只能处理单个粒子,本章介绍如何利用量子力学基本原理处理最简单的多粒子体系,主要包括全同粒子体系的基本特性、两电子体系的波函数、电子组态与原子态、泡利原理、电子壳层构造。第十章为原子与磁场的相互作用,主要介绍外磁场对原子的作用、顺磁共振、塞曼效应等。第十一章为原子核物理,主要介绍原子核的基本情况、原子核结构模型、原子核的放射衰变、原子核反应、核科学与技术,希望读者通过本章的学习能初步掌握原子核物理、核技术

应用及辐射防护的相关知识。第十二章为量子信息与量子计算简介,本章仅介绍量子信息和量子计算的基本概念、密度算符、量子纠缠态、量子计算机的物理实现及量子位与环境的相互作用,想要深入学习的读者可以去阅读相关著作。

人们通常认为传统的原子物理学强调以实验为基础,而量子力学则以理论的普遍性和系统性为根本。但我们不能忘记实践是检验真理的唯一标准,任何物理理论都必须经得起实验的检验。因此,作者提醒读者应仔细阅读本书所介绍的几个重要实验的实验目的、实验原理及实验方法。

在写作本书的过程中,作者主要从三个方面进行了努力:1. 试图用简洁明确的语言阐明量子物理学的基本原理,并力求突出物理思想;2. 注重整个理论体系的科学性、逻辑性和条理性,尽力使章、节之间环环相扣;3. 在内容的选取上力求做到难度适中,既能满足读者初步了解量子物理学的需要,又能基本满足大部分读者报考硕士研究生的需要。

全书教学参考用时为 90 课时,若教学时间不够,打“*”号的章节可以选讲或不讲。

作者衷心感谢四川大学物理科学学院邹鹏程教授。早年作者在四川大学学习时,有幸聆听了邹教授讲授的量子力学,从而使作者较全面地把握了量子物理学理论体系。

作者始终不会忘记已故去的父亲,他在世时一直勉励我要做一名对人类有用的物理学工作者,还有我其他的亲人们,没有他们的热情支持和鼓励,本书是难以与读者见面的。

作者也深深地感谢衡阳师范学院物理与电子信息科学系张登玉教授、游开明教授、汪新文博士、邓艳红博士,他们仔细阅读了本书初稿并提出了许多宝贵的建议。作者还要特别感谢我的博士导师南华大学核科学技术学院院长肖德涛教授对本书提出的有益见解。同时,作者也对华东师范大学出版社的同志为本书的出版所做出的努力致以诚挚的谢意!

由于作者水平有限,成书时间仓促,书中错误和不当之处在所难免,真诚地盼望读者提出宝贵意见,以便作者今后修改。

作者
2015 年 5 月

目录

第一章 从经典物理学到量子物理学	1
§ 1.1 经典物理学的发展	1
§ 1.2 原子的基本状况	3
§ 1.3 经典物理学的困难与量子	6
第二章 原子的半经典理论	15
§ 2.1 光谱与光谱线系	15
§ 2.2 氢原子光谱	16
§ 2.3 玻尔理论	18
§ 2.4 玻尔理论的实验验证	22
* § 2.5 玻尔理论的推广	25
第三章 量子力学基本原理	35
§ 3.1 德布罗意假设	35
§ 3.2 状态的描写及其意义	40
§ 3.3 薛定谔方程	44
§ 3.4 态叠加原理	48
§ 3.5 概率守恒与粒子数守恒	49
本章结束语	50
第四章 定态问题	52
§ 4.1 定态薛定谔方程	52
§ 4.2 一维势阱	54
§ 4.3 隧道效应	59
§ 4.4 简谐振子	64
§ 4.5 氢原子	68
§ 4.6 定态微扰论	75
§ 4.7 变分法	82
第五章 量子力学的算符理论	85
§ 5.1 态空间与算符	85
§ 5.2 力学量的算符表示	90
§ 5.3 算符的本征方程	92

§ 5.4	力学量算符的性质	94
§ 5.5	力学量的测量	96
§ 5.6	算符具有共同本征态系的条件和不确定关系 ...	99
§ 5.7	量子力学的矩阵表示	100
§ 5.8	角动量算符	107
§ 5.9	态和算符的表象	117
* § 5.10	算符随时间的演化	123
第六章	跃迁问题	128
§ 6.1	跃迁的一般概念	128
§ 6.2	跃迁概率公式	129
§ 6.3	周期性微扰下的跃迁	132
§ 6.4	电偶极跃迁	134
§ 6.5	自发跃迁	136
* 第七章	散射问题	139
§ 7.1	散射截面	139
§ 7.2	分波法	142
§ 7.3	玻恩近似	146
第八章	碱金属原子	150
§ 8.1	碱金属原子的光谱	150
§ 8.2	原子实的极化和轨道贯穿	153
§ 8.3	碱金属原子光谱的精细结构	155
§ 8.4	氢原子光谱的精细结构	160
第九章	全同粒子体系	163
§ 9.1	全同粒子体系的特性	163
§ 9.2	两电子体系的波函数	166
§ 9.3	电子组态与原子态	168
§ 9.4	泡利原理	174
§ 9.5	原子的电子壳层构造	176

第十章 原子与磁场的相互作用	180
§ 10.1 原子的磁矩	180
§ 10.2 外磁场对原子的作用	181
* § 10.3 顺磁共振	184
* § 10.4 塞曼效应	186
第十一章 原子核物理	190
§ 11.1 原子核的基本性质	190
§ 11.2 核力	194
§ 11.3 原子核结构模型	198
§ 11.4 原子核的放射衰变	202
§ 11.5 原子核反应	209
* § 11.6 核科学与技术简介	218
* 第十二章 量子信息与量子计算简介	227
§ 12.1 绪论	227
§ 12.2 经典信息论简介	228
§ 12.3 密度算符	232
§ 12.4 量子纠缠态	237
§ 12.5 量子计算机的物理实现	240
§ 12.6 量子位与环境的相互作用	248
附录一 常用物理常数表*	263
附录二 元素周期表	264
主要参考文献	265

第一章 从经典物理学到量子物理学

在我们这个时代,科学技术正以一种神奇的速度向前发展着,它每迈出新的一步都开辟出一个新的前景。物理学行走在其他学科的前列,领先跨入未知世界。

为了探索自然界的一些秘密,物理学家们必须拥有高分辨率的仪器,以便进行精确而有说服力的实验;同时,成千上万名理论物理学家,部署着向科学进军的阵地,研究从实验中获得的数据。然而,战斗并不是在黑暗中进行的,强大的物理学理论光芒照亮了整个战场,现代物理学的强大探照灯就是相对论和量子力学。量子力学是与20世纪一起来到人间的,它的生日是:1900年12月14日,就在这一天,德国物理学家普朗克(M. Planck)在柏林科学院物理学会的一次会议上,作关于尝试克服黑体辐射困难的报告中提出了量子思想。

§ 1.1 经典物理学的发展

1.1.1 普劳特的原子概念

人类对自然界的认识是不断发展的。在古代,人们知道房屋是由小石块组成的,而小石块又被风吹雨打变成更小的颗粒。物质的这种分解到底有没有止境呢?有没有不能再分解的那种小的颗粒呢?古希腊杰出的唯物主义哲学家伊壁鸠鲁和德谟克利特的回答是有的,在他们看来,不可分的物质颗粒是不变的,它们是永恒的,而且是处于经常的运动中的,它们仅仅在形态、大小、位置和次序上有所不同。其他一些性质如声、色、味等则非它们所固有。他们还认为,人类的灵魂也是由这些小颗粒组成的,这些微粒是火焰般的、球形的、极易运动的。这些微粒被取名为原子。

那么,原子是什么样的呢?它可能是一个坚实而不可能穿透的球体,但也可能不是这样。在古代,这个问题是无法回答的。其次,原子又有多少不同的品种呢?希腊哲学家亚里士多德就认为很可能有四种:水、空气、土和火。整个世界由这四种元素构成,而这四种元素本身又被认为是由原子组成的。但关于原子的概念仅是一个天才的猜想,它既非来自某种观察,又没有任何实验依据,谁也没有见过。就这样,原子很快就被人们忘得一干二净。

直到 19 世纪初拿破仑重新划分欧洲国家疆域的那个有趣年代,在为数不多的几个宁静的实验室中,在人们看来似乎是固有的概念又被重新考虑,原子概念也就这样被重新想起。1815 年,英国化学工作者普劳特发表了一种观点:有一种微小的粒子,它参与多种多样的化学反应,而其自身不被破坏或重建,这就是原子。就在同一时期,英国的托马斯·扬(T. Young)和法国的菲涅耳(A. J. Fresnel)奠定了光的波动学说基础,挪威的阿贝尔和法国的伽洛瓦为现代数学大厦奠定了基础,法国的拉瓦锡和英国人道尔顿以事实证明化学能创造奇迹,而著名的法国科学家拉格朗日为经典力学创立了完整而优美的形式。他们的工作为 19 世纪后半期精密科学的繁荣开辟了道路。不过,从那以后,人们发现在这种完美的形式中原子却没有安身之地了。

1.1.2 牛顿创立的经典力学

1687 年,牛顿(I. Newton)的《自然哲学的数学原理》一书在伦敦出版(在那个年代,自然科学必须用哲学这个名称才能面世),牛顿从物体运动的所有分散的研究中,总结出了一个统一而和谐的理论体系。在这本著作中,他首次创造性地提出了经典力学的三个基本原理,这就是牛顿运动三定律。

“牛顿是踩着前人的肩膀站起来的”,这话一点不假。其实,早在文艺复兴时期,伟大的思想家列奥纳多·达·芬奇、伽利略、荷兰数学家西门·斯蒂文以及法国人布莱兹·帕斯卡等都曾经专门研究过尔后形成的经典力学基础的问题,并作出过重大贡献。

1.1.3 完美的经典物理学

到 19 世纪,物理学的研究范围扩大到了热、光、电和磁等领域,并相继创立了热力学、光学、电动力学等学科,它们与牛顿力学一起共同筑起了经典物理学大厦。直到 19 世纪 80 年代,经典物理学几乎没有遇到过什么重大的障碍,很顺利地向前发展,已经形成了非常完整的理论体系。于是,一部分物理学家宣称:经典物理学是物理学的最终理论,自然界所发生的各种物理现象,都可以用经典物理学中的定律作出圆满的解释。所有的新发现都能很好地套进这个模子中,不会超出这个范围。他们断言,以后对于物理学的研究,实际上是不会有有多大进步的,今后的工作只能是把实验和计算做得更精确而已。建立在经典物理学基础上的这种绝对严谨的宇宙秩序,使所有的物理学家都感到十分满意。每当发现宇宙中的某些新事物丝毫不差地符合这一理论时,他们都感到无比的欣慰。

§ 1.2 原子的基本状况

化学上已经阐明自然界中的物质都是由各种元素构成的,而原子是组成元素的最小单元。这就是说,每种元素都有其相应的原子类型,这些原子的结构和性质是不同的,质量也不一样。原子破裂以后,就不再是原来的元素了。

1.2.1 原子的质量和大小

1. 原子的质量。要想直接称量一个原子的绝对质量是不可能的,在物理和化学上一般采用原子质量的相对值。通常,人们将碳在自然界中存量最丰富的一种同位素的质量确定为 12 个单位(称为原子质量单位,用 u 表示, $1 u = 1.660\,54 \times 10^{-27} \text{ kg}$) 作为原子质量的标准,其他原子的质量就可以通过与 ^{12}C 比较而得到。这样定出的值叫做原子量,通常用 A 表示。原子量也可以由化学方法测得,如氧元素的原子量为 15.999。

原子量也可以定义为一摩尔原子的以克为单位的质量数,即

$$A = mN_A \quad (1.2.1)$$

式中 N_A 称为阿伏加德罗常数,表示 1 mol 原子的物质中所含原子的个数。按照阿伏加德罗定律,各种元素的 N_A 都是一样的。原子量不是一个原子的质量, m 才是一个原子的质量绝对值。 N_A 的数值可根据电磁学中的法拉第定律求得,通用的值为

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

所以,只要知道了某种元素的原子量,就可以根据(1.2.1)式求出这种原子的质量绝对值。

2. 原子的大小。要精确算出原子的大小是很复杂也是很困难的,但我们可以根据一些理论大致估算出原子的大小。下面介绍几种估算原子大小的方法。

(1) 我们知道,晶体中的原子是按一定规律整齐地排列的,设晶体内的原子是互相接触的球体,因为

$$\text{单位体积中的原子数} \left(\frac{n}{V} \right) = \frac{\text{晶体密度}}{\text{一个原子的质量}}$$

所以, $\frac{V}{n}$ 就是每个原子的体积 V_A , $\sqrt[3]{V_A}$ 就是原子的线度。

(2) 根据气体分子运动论,分子的平均自由程

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2}N\pi r^2}$$

式中的 λ 和 N (单位体积中的分子数) 可由实验定出。因此, 对于简单分子 (只由一个原子构成), 半径 r 就近似为原子的半径。

(3) 根据范德瓦尔斯方程

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

可由实验确定 b , 再由

$$b \approx 4 \times \text{分子所占体积}$$

即可算出分子半径。对于简单分子, 分子半径就是原子半径。

到目前为此, 不论用哪种方法, 所算得的各种原子的半径相差不大, 其数量级都是一样的, 都为 10^{-10} m 。

1.2.2 原子的内部结构

1. 原子的组成

19 世纪末, 英国剑桥大学著名的卡文迪许实验室领导人汤姆生 (J. J. Thomson) 在完成英国科学促进会交给他的一个实验问题时发现了电子的存在, 并且求得了电子的质量。1910 年密立根 (R. A. Millikan) 用“油滴实验”第一次较精确地测定了电子的电荷值 e , 并提出一条规律: 自然界中任何电荷只能是 e 的整数倍。这条规律到现在都还没有被打破, 尽管有许多人曾试图寻找分数电荷, 但始终没有成功。自然界中的电荷为什么会如此, 这是物理学至今仍未解决的一个谜。现在普遍使用的电子质量和电荷值分别为

$$m_e = 9.109\,382\,91 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = 1.602\,176\,565 \times 10^{-19} \text{ C}$$

20 世纪初, 人们已经知道电子是一切原子的组成部分之一, 它的质量只占原子质量的很小部分。电子所带的是负电荷, 而原子是电中性的, 这就意味着原子中必定存在有相应的带正电的部分, 这一部分负担了原子质量的绝大部分。根据这一点, 历史上有许多人对原子中正负电荷的分布问题进行了分析和研究, 提出了各种有关原子的结构模型。其中较为引人注意的是汤姆生本人提出的所谓“静模型”, 他把原子设想为一个带正电的有质量的球体, 其中正电荷和质量均匀分布在球内, 电子则嵌在其内, 就像一只西瓜。但是, 后来的许多实验事实都无法用该模型来解释, 如莱纳德

(P. Lenard)1903 年在研究电子在金属表面上的散射实验中发现原子是“十分空虚的”。

2. α 粒子散射实验

1909 年,为了弄清原子内部的状况,汤姆生的学生卢瑟福(E. Rutherford)决定带领自己的助手盖革(H. Geiger)和学生马斯登(E. Marsden)用 α 粒子(He 原子核,质量等于 $7300m_e$,带电荷为 $2e$)来轰击原子,这就是著名的 α 粒子散射实验。

卢瑟福 α 粒子散射实验装置如图 1.2.1 所示。实验发现 α 粒子穿过箔片后的散射现象是相当显著的,虽然入射粒子束中有许多粒子仍然保持原来的运动方向,但也有不少粒子偏折了很大角度。这个结果令卢瑟福非常吃惊,在他的记叙中说“这就像一枚 15 英寸的炸弹打在一张纸上又被反弹回来一样”。简单分析一下就能看出,这样的结果与汤姆生模型是不相符的:因为电子的质量很小,相对原子中的正电部分来说,它对 α 粒子的作用可以忽略不计,若原子序数为 Z ,根据高斯定理,当 α 粒子与原子中心距离 r 大于原子半径 R 时, α 粒子所受到的库仑力为

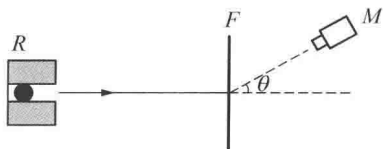


图 1.2.1 α 粒子散射实验示意图。

R — α 粒子源, F —金属箔薄膜,
 M —装有显烁屏的显微镜

$$F_a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2} \quad (1.2.2)$$

而当 $r < R$ 时, α 粒子所受到的库仑力为

$$F_a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e}{r^2} \left[\frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3} \frac{4}{3}\pi r^3 \right] \quad (1.2.3)$$

从以上两种情况可看出, α 粒子所受最大库仑力的位置是在 $r = R$ (即掠射)处。通过进一步精确计算发现,即使 $r = R$,此力也无法使 α 粒子经过箔片后偏转较大角度。

3. 原子的核式结构模型

卢瑟福对 α 粒子散射实验的结果进行了近两年的分析,终于在 1911 年提出原子的核式结构模型:原子的大部分质量和全部正电荷集中在原子中心很小的区域,电子则分布在该区域之外。这个带正电荷的小区域称为原子核。

为了定量解释 α 粒子散射实验结果,卢瑟福推导出了一个公式(后来被称为卢瑟福散射公式),即

$$d\sigma = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{Ze^2}{Mu^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (1.2.4)$$

式中 Z 为原子序数, M 为 α 粒子的质量, v 为 α 粒子的速度, $d\sigma$ 为 α 粒子被散射到 $\theta \sim \theta + d\theta$ 之间所对应的立体角内每个原子的有效散射截面(又称为微分截面), 在物理上它表示 α 粒子被散射的概率。

卢瑟福的 α 粒子散射实验和散射理论为人们揭开了原子的神秘面纱, 使人们正确地认识了原子的结构。现代的原子结构模型如图 1.2.2 所示。

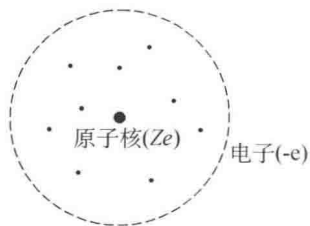


图 1.2.2 原子结构示意图

原子的大小为最外层电子运动范围所包围的区域, 线度为 10^{-10} m

卢瑟福简介



1871 年 8 月 30 日出生于新西兰南岛的尼尔森市泉林村, 父亲是农民和工匠, 母亲是一位乡村教师。1895 年, 24 岁的卢瑟福来到剑桥大学成为汤姆生的学生。1898 年在卡文迪许实验室研究生毕业后, 由汤姆生推荐, 到加拿大的麦吉尔大学任物理学教授。1907 年返回英国出任曼彻斯特大学的物理系主任, 后接任汤姆生的卡文迪许实验室主任之职。1908 年获得诺贝尔化学奖。1937 年 10 月 19 日因病在剑桥逝世, 与牛顿和法拉第一起安葬在西敏寺中, 享年 66 岁。

§ 1.3 经典物理学的困难与量子

到 19 世纪末, 尽管完美的经典物理学大厦已经建立, 但是物理学家们却发现问题很多。令人难以捉摸的热辐射现象, 神奇的光电效应, 不守规矩的低温下固体的比热等等, 经典物理学都无能为力。庞大的经典物理学的圣殿出现了裂缝, 整个圣殿开始倒塌。在无数新发现的轰击下, 经典物理学逐渐失去了往日的光芒, 相对论和量子论开始熠熠生辉。

1.3.1 黑体辐射——普朗克“能量子”假设

经典物理学首先碰到的难题是黑体辐射问题, 许多物理学家从各个不同方面入手, 运用经典物理理论始终没法完满地解释这个问题, 理论与实验结果总是不符。

由热辐射理论可知: 任何物体都能向外发射电磁波, 也能吸收或反射物体发射来的电磁波, 这种现象被称为热辐射。如果一个物体辐射出去的能量等于它所吸收的能

量,称这物体处于热平衡状态。

为了研究热辐射的规律,人们假设出这样一个物体:能将入射到它上面的所有辐射全部吸收,这种物体被称为理想黑体或绝对黑体(简称黑体)。用吸收特性很好的材料做一空腔,在空腔上开一个小孔,并将其内壁做得粗糙不平且涂黑,这就是一个较为理想的黑体了,如图 1.3.1 所示。电磁波进入小孔后,在空腔内经过多次反射,几乎被全部吸收,辐射出去的可能性就非常小了。

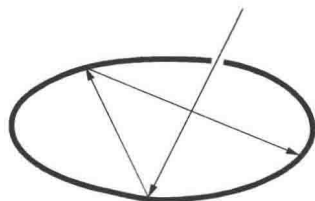


图 1.3.1 黑体示意图

人们将仪器对准小孔进行测量,得到如下结果:

1. 热平衡时,单位波长间隔内从小孔辐射出去的能量密度只与波长和温度有关,而与空腔的形状和材质无关,即 $U = U(\lambda, T)$;

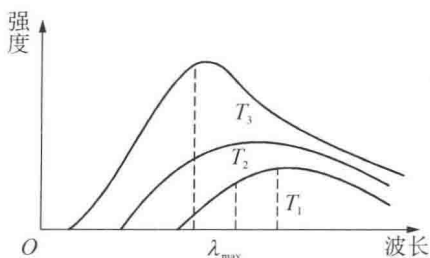


图 1.3.2 黑体辐射强度与波长的关系图

2. 来自小孔的辐射强度与波长的关系如图 1.3.2 所示。1893 年,德国物理学家、诺贝尔奖获得者维恩(W. Wien)得出了辐射能量分布曲线峰值对应的波长 $\lambda_{\max}$ 与空腔的温度 T 的关系:

$$\lambda_{\max} T = b \quad (1.3.1)$$

式中 b 为常量,且 $b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。此式称为维恩位移定律。1896 年,维恩用经典热力学方法算出了分布曲线的数学表达式

$$\rho_\nu d\nu = c_1 \nu^3 \exp(-c_2 \nu/T) d\nu \quad (1.3.2)$$

式中 ρ_ν 是 $\nu \sim \nu + d\nu$ 间小孔辐射能量密度。可是后来研究发现,维恩公式(1.3.2)在短波区与实验结果相符,而在长波区则差别很大。

1900 年,英国物理学家瑞利(J. W. Rayleigh)和金斯(J. H. Jeans)根据经典电磁学和能量均分定理也推出了一个公式

$$\rho_\nu d\nu = \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2 d\nu \quad (1.3.3)$$

式中 c 为真空中的光速, k 是波尔兹曼常数。但这个公式在长波区与实验结果相符,而在短波区,则相差甚远。不仅如此,按照(1.3.3)式,还存在一件很不愉快的事情:随着辐射波长的减小,辐射能密度将无止境地增大,这在当时被称为“紫外灾难”。

“紫外灾难”给了当时的物理学以致命的打击,同时也成为新理论诞生的导火线。为了摆脱热辐射理论的困境,许多物理学家作过勇敢的尝试,德国物理学家普朗克也