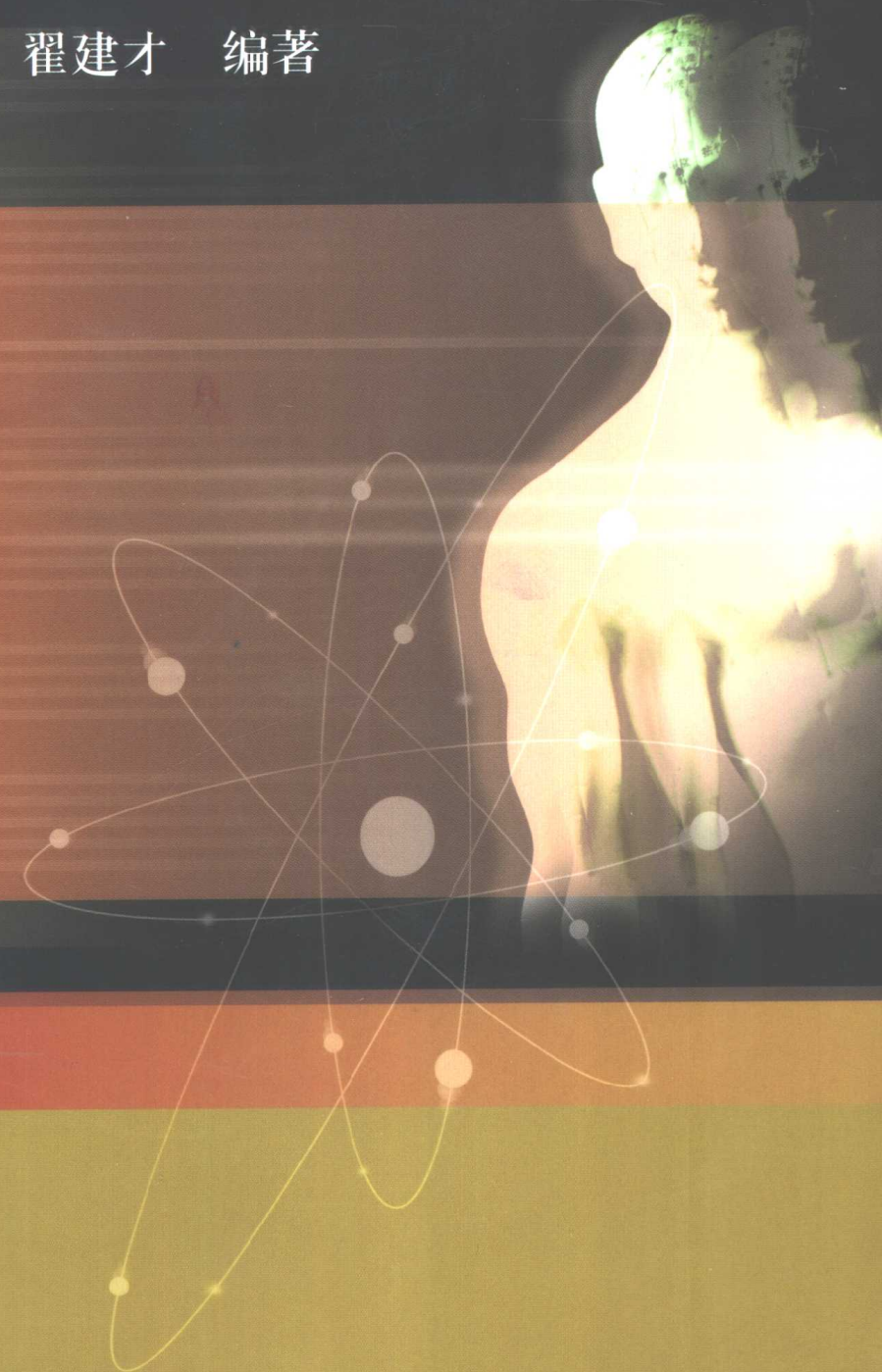


简明医用原子核物理学

翟建才 编著



原子能出版社

简明医用原子核物理学

翟建才 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

简明医用原子核物理学/翟建才编著. —北京:原子能出版社, 2004. 4
ISBN 7-5022-3117-X

I. 简… II. 翟… III. 核物理学:医用物理学 IV. R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 005182 号

内 容 简 介

全书共分为十一章。第一章和第二章简要介绍量子论和相对论的基本理论和解决问题的基本方法。第三章到第七章从原子核的基本性质和结构模型出发,介绍了核反应、核衰变以及核辐射与物质相互作用等有着重大应用背景的三大问题。作为原子核物理学与生物医学连接桥梁。第八章介绍了电离辐射的生物效应。以后的三章概括地介绍了一些必要的核物理实用技术相关领域,即核辐射剂量学、放射性测量学和医学照射计量学等。最后还给出了一个内容丰富的附录。本书尽管涉及面比较广,但都统一在一个逻辑框架之下,就是突出物理学思想本身。为此,书中不少内容是从新的分析角度加以介绍的;结构上把例题和练习题都放在每一章末尾,使其具有一定的独立性。根据作者的教学经验,这样做对培养学生的综合分析能力和实际应用能力会有所帮助。

本书可以作为放射医学、核医学、放射卫生学、放射治疗学和肿瘤学、放射诊断学、医学影像学等与原子核物理学联系密切、交叉紧密的一些医学门类的学生系统学习原子核物理学基础知识的教材;还可以作为需要较多、较系统的原子核物理学基础的非物理专业的研究生和本科生教材;也可作为需要深入了解和掌握核物理学基础理论、实验技能的医学工作者、研究人员以及教师的参考书。

简明医用原子核物理学

出版发行	原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)
责任编辑	赵志军
责任校对	冯莲凤
责任印制	丁怀兰 刘芳燕
印 刷	保定市印刷厂
经 销	全国新华书店
开 本	787 mm×1092 mm 1/16
字 数	353 千字
印 张	14.125
版 次	2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5022-3117-X
印 数	1—1000
	定 价 45.00 元

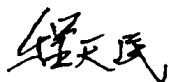
版权所有 侵权必究(如有缺页、倒装,请与出版社联系调换)

序

原子核物理学是物理学的一门重要学科,其学科任务是研究原子核的基本性质、结构、相互作用,以及转化的规律。原子核物理学的基本理论、实验技术等已经成为许多应用科学技术的重要组成成分。随着现代科技、特别是医学科学的发展,诸如放射医学、核医学、放射诊断和治疗学、医学影像学以及军事预防医学等与原子核物理学联系紧密的一些医学学科也得到了飞速进展。许多相关专业的医学工作者深感在教学和科研实践中,需要原子核物理学的基础理论知识和技能,但又缺乏与医学结合的、难度适中、突出实用的专著和教材。由第三军医大学物理学教授翟建才编著的《简明医用原子核物理学》正是为了适应这个需要而编写的。作者在清华大学受过核物理学和生物物理学的专业培养,具有长期在国防科研单位和军医大学从事相关专业的科研与教学的工作经历,能够较好地解决所需和所用的问题,并能够把自己在国内外著名大学做访问科学家期间对学科体系及教学思想的学习领会所得融合其中。

当然,医用核物理学的课程内容体系的建立本身就是一个大胆的探索,并需在实践中不断完善,重要的是迈出了可喜的第一步。相信今后会出现更多、更好的专著和教材来发展核物理学,并促进医学和理工学科的交叉和融合。

中国工程院院士、第三军医大学教授



2004年4月

前 言

原子核是物质结构的一个稳定的微观层次。和物质结构的其他层次一样,原子核也具有复杂的亚层次,以及复杂的运动和相互作用。原子核物理学是研究原子核的基本性质、结构、相互作用,以及转化规律的物理学分支。原子核物理学的基本理论、实验技术等已经成为许多应用科学技术的重要组成成分。

在大约 100 多年前当核物理还处于探索的开创初期,科学家们就已经通过核辐射的生物效应自然地把原子核物理学与生物医学联系在一起。随着现代医学的发展,诸如放射医学、核医学、放射卫生学、放射治疗学和肿瘤学、放射诊断学、医学影像学等与原子核物理学联系密切、交叉紧密的一些医学门类得到了飞速发展。许多相关专业的医学工作者通过长期的工作实践,深感加强原子核物理学基础的系统学习的必要,但是又苦于缺少难度适中、突出实用的教材。《简明医用原子核物理学》就是为了适应这个需要编写的一本教材。它既可以帮助此类专业的医学生在进入工作岗位之前能够获得系统而又实用的核物理学基础,又可以引导学生逐渐明确与核物理学基础理论、实验技能相关的医学应用领域。

英国物理学家 L. R. B. Elton 就曾经分析过核物理学的学科结构特点和教学困难所在。他说:“原子核物理学的困难在于它不是一门依据逻辑发展的学科,而是许多问题的集合。因而,不可能从一些基本原理出发来推导全部知识,这就使得它成为一门既难教又难学的科学。”我们认为,按照医学生的需要,组合一些必要的理论和实用工具,并把它们统一在一个简明的逻辑框架之下,配合一定数量的、有示范作用的例题的分析讲解和练习题、思考题,可能是一个能够突破难关的教学内容体系。

全书共分为 11 章。第一章和第二章简要介绍量子论和相对论的基本理论和解决问题的基本方法。第三章到第七章从原子核的基本性质和结构模型出发,介绍了核反应、核衰变以及核辐射与物质相互作用等有着重大应用背景的三大问题。作为原子核物理学与生物医学连接桥梁,第八章介绍了电离辐射的生物效应。以后的三章概要介绍一些必要的核物理实用技术相关领域,它们是核辐射剂量学、放射性测量学和医学照射计量学等。最后给出了一个内容丰富的附录。尽管涉及面比较广,但都统一在一个逻辑框架之下,这就是突出物理学思想。此外,在结构上我们把例题和练习题都放在每一章末尾,使其具有一定的独立性。根据我们的教学经验,这样做对培养学生的综合分析能力很有好处。

本书还可作为需要较多、较系统的原子核物理学基础的非物理专业的研究生和本科生教材,也可作为有这方面需要的医学工作者、电离辐射防护工作人员、核技术应用各个领域的研究者以及相关课程教师的参考用书。

本书的完成,得益于我的母校清华大学的老师的教诲和我曾工作和学习过的单位的领导和同志们的鼓励和帮助。特别要感谢第三军医大学的程天民院士和清华大学的陈泽民教授的

指导和帮助。感谢翟羽助教为本书制作了所有的插图。

医用原子核物理学的课程内容体系的建立本身就是一个大胆的探索,加之本人水平的限制,书中的不足和错误难免,欢迎大家批评指正。希望今后有机会再修订时,能让大家更满意一些。

翟建才

2003 年 10 月于重庆第三军医大学

目 录

绪论	1
第一章 量子物理学基础	4
第一节 黑体辐射	4
一、基本概念	4
二、辐射能量分布定律	5
三、Planck 的量子假设	6
第二节 量子论的建立	6
一、光量子理论	6
二、原子定态能级理论	8
三、物质波和波函数	10
第三节 量子力学概要	12
一、力学量算符(dynamical variable operator)	13
二、Schrödinger 方程	13
例题和习题	17
第二章 相对论力学概论	22
第一节 伽利略的相对论	22
一、参照系和坐标系	22
二、伽利略相对论原理	23
第二节 伽利略相对论受到挑战	24
一、麦克斯韦电磁场理论的冲击	24
二、洛伦兹变换	24
三、时间和空间的相对性	25
第三节 相对论力学	27
一、相对论质量和动量	27
二、相对论能量	28
三、相对论质量-动量-能量之间的关系	28
四、相对论中的质能关系	29
五、相对论的力	29
例题和习题	30
第三章 原子核的基本性质及核力	35
第一节 原子核的组成	35
一、质子和中子	35
二、原子核的半径	36

三、原子核的质量和结合能	36
第二节 原子核的自旋和宇称	37
一、核自旋	38
二、核磁矩	38
三、核的宇称、电四极矩	39
第三节 核力	39
一、核力的特性	39
二、核力的产生机制	41
例题和习题	42
第四章 原子核的结构模型	45
第一节 液滴模型和费米气体模型	45
一、结合能	45
二、液滴模型	45
三、Fermi 气体模型	47
第二节 壳层模型	48
一、幻数	48
二、单粒子壳层模型	49
三、强自旋-轨道耦合壳层模型	50
四、核壳层模型的应用	50
第三节 集体模型	52
一、核的形变	52
二、尼尔森's形变壳层模型和集体模型	53
例题和习题	54
第五章 原子核反应	56
第一节 原子核反应的基本理论	56
一、实验室坐标系与质心坐标系之间的物理量变换	56
二、反应截面的精细平衡原理和分波分析	59
三、原子核反应的基本模型	61
四、核反应方程和 Q 方程	63
第二节 原子核反应的基本类型	65
一、直接反应	66
二、复合核生成与衰变	66
三、原子核的裂变和聚变	66
第三节 原子核反应的基本过程	69
例题和习题	70
第六章 原子核的放射性衰变	73
第一节 放射性现象的发现和描述	73
一、放射性衰变的基本类型	73
二、放射性核素系	77

第二节 放射性衰变的基本规律	79
一、放射性衰变的动力学	79
二、放射性活度、比活度及放射性纯度、强度	82
三、衰变图(decay scheme)	82
例题和习题	84
第七章 射线与物质的相互作用	87
第一节 α 射线与物质的相互作用	87
一、射程与能量关系式	87
二、作用过程中的能量传递	88
第二节 β 射线与物质的相互作用	89
一、碰撞电离的射程与 β 射线能量的关系	90
二、 β 粒子与物质作用的能量损失	91
第三节 γ 射线与物质的相互作用	92
一、光电效应	93
二、康普顿效应	93
三、电子对效应	94
四、物质对 γ 射线的减弱和能量吸收	94
第四节 中子与物质的相互作用	96
一、实用中子源及中子的分类	96
二、中子与物质的相互作用	97
例题和习题	100
第八章 电离辐射的生物效应	103
第一节 细胞效应	103
一、电离辐射所引起的细胞变化	103
二、细胞对辐射的敏感性	104
第二节 基因效应和细胞的修复系统	106
一、基因效应	106
二、细胞的修复系统	107
第三节 全身照射和临床效应	109
一、全身照射	109
二、急性放射病综合征	109
三、造血系统综合征	111
第四节 电离辐射生物效应的动力学机制	112
一、随机效应和非随机效应	112
二、自由基作用	113
例题和习题	114
第九章 核辐射剂量与防护	116
第一节 基本剂量单位及其测定	116
一、吸收剂量	116

二、比释动能	117
三、照射量和照射量率	118
四、剂量当量	118
五、有效剂量当量	119
第二节 电离辐射剂量的估算和应用	120
一、 γ 放射源的源强	120
二、 α 和 β 辐射表面源和均匀分布源的剂量估算	121
三、内照射剂量评价的 MIRD 法	121
四、中子源的吸收剂量	132
第三节 电离辐射的安全与防护	134
一、辐射安全评价	134
二、电离辐射防护的基本原则和措施	135
例题和习题	136
第十章 放射性测量	142
第一节 放射性衰变的统计特性	142
一、核衰变的相关记录	142
二、Gauss 分布和 Poisson 分布	143
三、放射性测量结果的正确表达	143
第二节 放射性测量的非独立性	144
第三节 放射性测量的限度	146
一、探测下限和最小可探测活度	146
二、测量仪器的品质因数	147
第四节 放射性剂量的测量	148
一、气体电离型探测器	148
二、照射量和吸收剂量的测量	150
三、吸收剂量与照射量的换算	152
例题和习题	153
第十一章 医学辐射计量学基础	157
第一节 临床剂量学的测量和标定	157
一、通过照射量(率)计量吸收剂量的基本原理	157
二、用电离室测量吸收剂量的基本技术	159
第二节 医用辐射场的剂量学计量	159
一、深度效应	160
二、界面效应	161
三、形状不规则的辐射场的剂量估算	163
四、等剂量曲线的标绘	165
第三节 放射治疗计划的制定和介入疗法	167
一、放射治疗计划	167
二、放射性介入疗法的治疗计划	170

三、放射治疗中的辐射防护问题	174
例题和习题.....	176
附录 1 常用物理常数	179
附录 2 常见核素基本参数	181
附录 3 参考人基本参数	210
附录 4 人体的化学成分	210
附录 5 成年人主要器官的质量	211
附录 6 常用物质及元素的质量减弱系数	212
附录 7 常用物质及元素的质量吸收系数	213
主要参考文献.....	214

绪 论

物理学是研究物质结构和运动规律的自然科学基础学科。原子核物理学是研究原子核的性质、结构、相互作用及各种转化之间的规律性联系的物理学分支。原子核物理学的发展整整走过了一个世纪。法国科学家 H. Becquerel 在 1896 年发现了天然放射性现象,它其实是原子核变化的表现。真正能够揭示隐藏在放射性现象之下的微观世界的秘密的开创者应当首推英国的物理学家 E. Rutherford。他在 1911 年通过著名的 α 粒子散射实验验证了原子核的存在,1919 年又在用 α 粒子轰击氮原子核的实验中发现了质子,1920 年提出某种中性粒子和质子共同组成原子核的有科学预见性的猜测。1932 年年轻的英国物理学家 J. Chadwick 通过 α 粒子轰击金属铍而发现了中子,证实了 Rutherford 的猜测。同年,德国的物理学家 W. Heisenberg 和苏联的物理学家 D. Ivanenko 正式提出了原子核的结构模型。从此,原子核物理学走上了快速发展的坦途。

20 世纪的 40 年代对核物理学走向实际应用起到了催化作用。1942 年美国的核物理学家 E. Fermi 建立了世界上第一座原子反应堆;1944 年苏联物理学家 Veksler 建立了同步稳相粒子加速器;1945 年美国成功地爆炸了第一颗原子弹。从而开拓了核能源、高能物理以及核武器等领域的国际间的竞争与合作。50 年代以后,随着世界科学技术整体实力的提高,原子核物理学无论是在基础研究还是在应用研究两大领域都取得了很大的成功。目前,原子核物理学已经形成了基础研究的三大科学领域和应用研究的三大技术领域的庞大体系。

一、原子核物理学的研究领域

原子核物理学的基础研究基本上是根据研究手段主要采用扰动原子核系统的能量大小而划分为三个领域的。主要研究原子核的基本数据、核力、核反应的非平衡问题、原子核的高激发态、及部分多体问题的低能核物理学,或者叫做普通原子核物理学。我们所讲述的正是这个领域中的最基本的问题。

中能和高能核物理学研究的主要是核物理学与基本粒子物理学共同感兴趣的一些重要的、根本性的问题。比如,有关原子核内作用的本质、成分,原子核内的电荷分布、质量分布以及中子分布的不均匀性,原子核的运动形态,在中能和高能粒子的作用下原子核的结构和性质的转化规律,等等。

重粒子核物理学就是研究在使用重粒子轰击原子核的条件下,原子核所发生的独特的性质、结构、转化的规律和应用。已经发现,原子核在重粒子的作用下在低能和中能物理学中都表现比较稳定的质量数、原子序数、核自旋以及内能等都有大幅度的改变。

应用研究主要包括核能源和动力研究、核武器研究、核技术应用研究三大领域。原子核的重核裂变和轻核聚变都能释放出巨大的能量。地球上贮藏着丰富的核能原材料。如果解决了可以利用海水中的 ^3H 技术难题,可以说核能源是取之不尽的。这个领域主要研究核动力反应堆的研制和运行、热核反应装置的设计和安全经济地运行、以及原子电池的开发和研制等技术科学方面的问题。

自从美国在第二次世界大战后期使用原子弹对加速战争的胜利起到一定作用被世人所共睹以来,世界大国都先后在核武器的研制方面作了较大的投入。目前在传统的氢弹、原子弹的基础上,又先后出现了中子弹、贫铀弹、粒子束武器和 γ 射线-激光弹等所谓的新概念核武器。

至于核技术应用研究领域涉及面十分广泛。工业、农业、医药卫生、环境和健康保护等各个领域都有不少成功应用的例子。射线无损探伤、射线照相、辐照改性和射线测量等在工业领域有广阔的应用;辐照育种、辐照灭菌消毒等在现代化农业已有应用;中子活化分析、X射线荧光分析、放射性同位素示踪分析、中子散射和背散射分析、穆斯堡尔谱以及核能谱分析、同步辐射和正电子湮灭技术已经成为现代化的测试分析技术的重要常用手段。在生物医学领域除了广泛的应用各种核物理的测试分析技术之外,无论在基础研究还是在临床医学和预防医学的诊断、治疗、保健等方面都有着更为具体的内容。

X光透射和放射影像诊断技术应用已有近百年的历史,放射剂量防护和放射生物学的研究一直受到社会和科学界的重视,放射治疗技术伴随着其他生物医学工程技术的发展又增添了新的活力。概括起来,核技术的医学应用从核物理学的原理来划分,可分为核辐射能量的应用、射线的生物物理效应的应用以及放射性物质本身的核物理基本参数的测试所获得的有效信息的分析应用三个方面。当然在实际应用时,常常是综合性的应用。很显然,无论涉及哪个方面都缺少不了对原子核本身结构、性质、变化规律的认识和了解。

二、医用原子核物理学的课程简介

原子核物理学是现代物理学的重要内容,它基本上包括了20世纪物理学在理论物理学和实验物理学的许多重要成果。就从Nobel物理奖获得的项目数目这一个指标来看,直接和原子核物理学相关的就有30多项,如果再加上它的延伸和应用的项目就有一半之多。如果从全民教育的角度出发,原子核物理学的基础知识理应成为必要的学习内容。但是由于它是建立在近代数学工具和科学技术基础之上的,必不可免地包含了许多抽象的概念、复杂的符号公式体系、数量巨大的数据和知识背景的积累,从而给教学带来了很大的困难。但是作为医学的某些特殊专业,比如核医学、军事预防医学、放射诊断和治疗学、放射医学和放射卫生学、保健物理学(Health Physics)、医学影像学以及临床放射计量学等,原子核物理学就成了必修的专业基础课。用句俗话来说就成了一根必须要啃的硬骨头。我们本着不回避、重实用、少而精、多示范、突出物理学本身的基础作用,尽量说明与之相关的应用联结的教学思想,从庞杂而又抽象的原子核物理学体系中选取理论素材,再结合医学生实际所具备的数理基础,重新组织形成内容体系的骨干,再吸收保健物理学、辐射生物物理学、核医学和放射医学、放射生物学、电离辐射剂量学和临床放射治疗计量学等相关学科的内容充实到原子核物理学的理论体系中去,从而形成了这门简明医用原子核物理学的教材和课程。

本课程的教学内容的编排思路简单介绍如下:

原子核物理学研究的是我们直接感知范围以外的微观世界,需要特殊的研究工具,这包括理论、方法和手段等。建立于20世纪初期的量子论和相对论是一种崭新的理论工具。从方法学角度说来,正是由于这两种研究微观粒子和在接近光速运动的物理学工具的出现才可能有原子物理学和原子核物理学的真正意义上的诞生。因此作为理论基础,我们在开头的第一章和第二章十分概要地介绍量子论和相对论的基本理论和解决问题的基本方法。第三章到第七章是本课程的内容主体。从原子核的基本性质和结构模型的介绍出发,依次介绍核反应的机

制和基本类型、核衰变的机制和规律以及三种最基本的衰变特征、各种核辐射与物质相互作用的机制和实验规律等有着重大应用背景的三大问题。然后,作为原子核物理学与生物医学连接的桥梁,第八章简要地从能够独立存在的生命形式——细胞及临床症状的两方面介绍了电离辐射的生物效应。最后三章概要地介绍三个核物理医学应用必要的相关实用技术领域,它们是核辐射剂量学、放射性测量学和医学照射计量学等。考虑到学习和实际应用的备查需要,正文之后给出了一个内容比较丰富的附录。从前面的介绍可以看出,尽管课程内容涉及面比较广,有些是和原子核物理学交叉学科的研究任务,但都是统一在一个十分明确的逻辑框架之下,这就是突出原子核物理学的思想体系及其在交叉学科的体现和渗透。此外,考虑到医学继续教育课程的特点以及通常的物理学教材在讨论的内容后面安排针对性的例题的习惯对我们这门综合性实用型的课程特点不太适应,在篇章结构上我们把例题和练习题都放在每一章末尾,使其具有一定的独立性。

原子核物理学是一门建立在十分抽象的哲学和数学的工具上的现代物理学的分支,全面地认识和掌握它的确是有一定的困难。但是把它和医学应用的实际问题结合起来,它就显现出隐藏在难以接近的冷面孔下的物理学所固有的最接近生活、最热心地为实际需要服务的本性。只要我们学习那些为建立原子核物理学所做出贡献和努力的物理学家的不畏艰险、勇于探索的精神,坚持辩证唯物论的思想方法,在战略上藐视困难,在战术上重视困难,发扬我们在医学领域的知识和能力的优势,那就不仅能够对原子核物理学学有所得,而且能够在医学专业领域带来新的领悟和收获。

第一章 量子物理学基础

19 世纪末,物理学家们在庆贺“物理学的大厦已经基本建成”的伟大胜利的同时,也还存在着忧虑。正如英国的著名物理学家 Lord Kelvin 在 1900 年 4 月 27 日长篇讲话中所表述的:在物理学万里晴空的远处,出现了两朵“乌云”。一是迈克耳逊-莫雷实验给出的以太漂移实验验证的零结果,动摇了光波借助于以太作为传播媒介的理念和伽利略的相对性原理。二是对黑体辐射的研究结果,宣告了 Boltzmann 能量均分原理应用于固体比热的失效,引起人们对能量的连续性是普遍适用的常识的怀疑。

恰似自然界中的乌云孕育了冲破黑暗的闪电那样,正是物理学的那两朵乌云引起了物理学的极其深刻的变革。前者推动相对论的深入研究;后者导致了量子论的诞生。它们是近代物理学的两大理论支柱,也是现代科学技术的重要工具。本章和下一章将概要地介绍它们的基本思路和主要内容。

第一节 黑体辐射

人们早已注意到高温物体的发光和放热现象。按照分子动理论,构成物体的原子和分子都在不停地作热运动。通过频繁而剧烈的碰撞,总有一些原子和分子获得高于平均能量的概率而受到激发,随后再以电磁波的形式把盈余能量辐射出来重回基态。辐射波长在红外区段主要表现为放热;波长在可见光区段则主要表现为发光。

G. R. Kirchhoff 在 1859 年就发现,同一物体的辐射本领和吸收本领之间存在着联系。J. Stefan 和 W. Wien 等做了系列的实验研究。Kirchhoff 的学生 M. Planck 利用受迫振子在电磁阻尼作用下的模型找到振子平均能量的全新概念的表达式,于 1900 年 12 月 24 日宣告了对黑体辐射的量子论解释,开创了量子物理学时代。

一、基本概念

1. 热辐射

由于物体内部的原子和分子热运动的涨落而引起的辐射现象称为热辐射(thermal radiation)。太阳发光、燃料燃烧等是常见的热辐射。其实当一个物体发生热辐射的同时还会从周围的其他辐射源吸收辐射能。如果一个辐射体在向外辐射能量和从外面吸收辐射能达到一种动态平衡而使物体的温度保持不变,则称为热平衡辐射。一般来说,辐射入射到物体表面都会有部分被反射,并非全部都能进入或穿透物体。假定一个物体能够全部吸收所有入射的电磁辐射,则该物体称为黑体。黑体的热辐射称为黑体辐射。一个用不透明材料制成的表面粗糙的,只开有一个小孔的腔体可看作黑体,而从小孔发出的辐射可视为黑体辐射。

2. 辐射本领

辐射本领(radiation power) $M(\nu, T)$ 又称辐出度,是对物体表面单位面积辐射功率大小的

量度,单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在某一温度 T ,波长为 λ 的电磁辐射的辐射本领称为对应波长 λ 的单色辐射本领,记作 $M_\lambda(T)$ 。在温度 T ,对所有波长的总辐射本领

$$M(T) = \int_0^\infty dM_\lambda(T) = \int_0^\infty M_\lambda(T) d\lambda \quad (1-1)$$

J. Stefan 于 1879 年在总结实验数据的基础上,得到黑体辐射的总辐射本领

$$R(T) = \sigma T^4 \quad (1-2)$$

其中,Stefan 常数 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^4$ 。

1884 年 Boltzmann 从热力学理论导出同样的结果,表明理论体系和实验数据的相符。于是,式(1-2)又称为 Stefan-Boltzmann 公式。

二、辐射能量分布定律

热平衡下的辐射场,是均匀的、稳恒的和各向同性的,因此必然会存在一个普适的能量谱密度函数和物质无关。Kirchhoff 在 1859 年指出,该函数即为辐射体的辐射本领与吸收本领的比值,只和辐射的频率 ν (或波长 λ) 及温度 T 有关。由于黑体的吸收本领 $\alpha(\nu, T) = 1$,则黑体的辐射场能量谱密度函数 $\rho(\nu, T)$ 就和黑体辐射的辐射本领 $M(\nu, T)$ 相当。这也就是为什么我们要提出黑体模型以及研究黑体辐射规律的主要原因。图 1-1 给出 3 条不同温度下的黑体辐射的辐出度随波长的变化曲线。每条曲线下的曲边梯形面积就等于黑体在某波长区间内的总辐出度。图中的虚线表明最可几波长的连线,和下面的式(1-4)反映的规律的趋势相符。

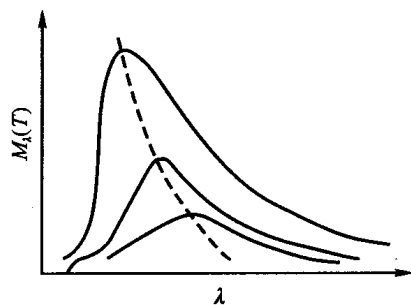


图 1-1 黑体辐射的辐出度曲线

1. Wien 位移定律

W. Wien 于 1893 年提出辐射能量分布定律:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\alpha}{c^3} \nu^3 e^{-\beta\nu/T} = \frac{4}{c} M(\nu, T) \quad (1-3)$$

并由此推导出:黑体的峰值对应的波长 λ_{peak} 与温度 T 成正比。在生产和生活中常常利用这个规律。比如对燃料的燃烧温度,经验提示蓝色焰火要比黄色的温度高,比红色燃烧区温度更高。有经验的炼钢工人和锻工就是通过观察钢水或锻件的颜色来判断它们的温度的。

可以把 λ_{peak} 和 T 之间的关系表示为

$$\lambda_{\text{peak}} \cdot T = b \quad (1-4)$$

式中的常数 $b = 2897.756 \mu\text{m} \cdot \text{K}$,整个关系式称为 Wien 位移定律。我们测得太阳连续的发射光谱的峰值波长为 $5.100 \times 10^{-7} \text{ m}$,从而初步估算太阳表面温度约为 5700 K 左右。

但是,式(1-3)只对温度较低、波长较短区段才能和实验结果相符。于是,促进了人们对 $\rho(\nu, T)$ 在所有波段精确表达形式的探求。

2. Rayleigh-Jeans 公式

1900 年之后,L. Rayleigh 和 J. H. Jeans 根据经典的能量均分原理及空腔内电磁辐射场的自由度就是电磁辐射在空腔壁外形成节点的驻波的可能方式数目的假设,而得到 $\rho(\nu, T)$ 的另一种表达形式:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT \quad (1-5)$$

式中, k 为玻耳兹曼(Boltzmann)常数, 全式称为 Rayleigh-Jeans 公式。它正好与式(1-4)互补。对于长波辐射, 理论值与实验结果符合较好; 但是对于高频段, $\rho(\nu, T)$ 是个发散函数。这表明在理论上的严重欠缺, 从而在物理学史上被称为“紫外灾难”。

三、Planck 的量子假设

作为 Kirchhoff 学生的 Planck 在 1899 年利用受迫阻尼电磁振子模型导出了单色辐射能量密度函数 $\rho(\nu)$ 的表达式:

$$\rho(\nu) = 8\pi\nu^2 \epsilon / c^3 \quad (1-6)$$

式中, ϵ 为电磁振子的平均能量。

Planck 将上述结果和 Wien 的能量分布定律表达式(1-3)进行比较, 并考虑到用内差法对长波区实验结果的拟合, 从而做了一个大胆的假设, 即黑体的腔壁是由无数个电谐振子组成, 能和腔内的辐射场交换能量。这些谐振子所具有的能量以及可与场交换的能量份额都是分立的, 不是任意取值的, 只可能取基本单元能量量子(quantum of energy) ϵ_0 的整数倍, 而 $\epsilon_0 = h\nu$ 。其中, h 称为普朗克(Planck)常量, $h = 6.626\ 076 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

最后, 经过一年多的工作于 1900 年 12 月 24 日作为量子论诞生标志的 Planck 公式公布于世了。

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1-7)$$

经过许多物理学家和当时的最精确的实验结果核对, 公式与实验结果完全相符。但是, 由于能量量子化的概念是和经典理论体系不相容的, 在提出后许多年都受到了物理学界的漠视。连 Planck 本人也曾试图能像先前的一些研究成果那样把“量子论”纳入经典物理理论体系的轨道, 但以失败而告终。在这之后, 1905 年 A. Einstein 在对光电效应研究过程中提出光量子的存在, 有力地支持了量子论; 接着 1912 年 N. Bohr 提出对原子轨道量子化的假设及 1914 年 J. Franck 和 G. Hertz 用电子碰撞原子的方法, 从实验中证实了量子化的原子能级的存在。这样 Planck 的量子论深刻含义才逐渐被人们所认识。为此, 他在 1918 年获得诺贝尔物理学奖。

大家都知道, 对于任何一个创新的理论体系, 不仅要求它能解释原有体系无法说明的那些物理事实, 还要求它能够作为一般形式下的特例包容那些已被实验事实证实的已有规律的形式, 甚至能预见新的实验事实。我们很容易利用 Planck 公式推导出 Wien 移位定理, Rayleigh-Jeans 公式以及 Stefan-Boltzmann 公式, 读者不妨自己试一试。

第二节 量子论的建立

1900 年 Planck 提出量子假设后的 20 多年内, 光量子理论及原子定态理论的相继建立和完善, 促进了量子论在近代物理学中地位的确立。

一、光量子理论

1. 光电效应

早在 1888 年, Hallwachs 就发现充了负电的金属板受到紫外光照射, 能在表面附近放电。