



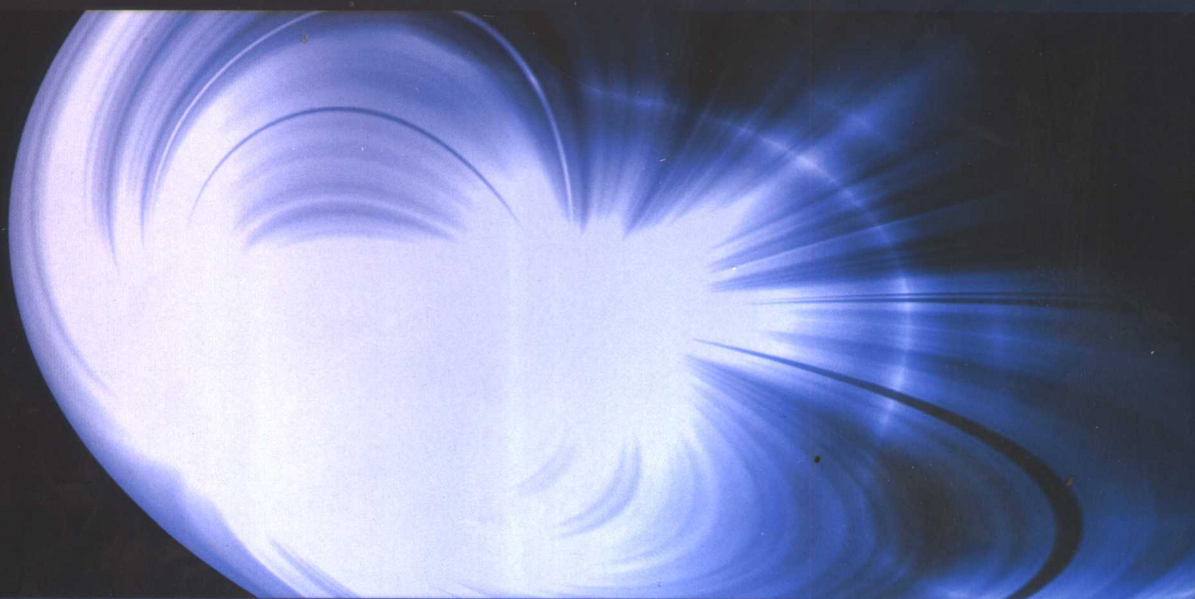
普通高等教育“十五”国家级规划教材

近代物理实验

(第三版)

北京大学物理学院

吴思诚 王祖铨 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

近代物理实验

(第三版)

北京大学物理学院
吴思诚 王祖铨 主编

高等教育出版社

内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,是在原书第二版(1995年)的基础上,总结近年来的教学实践经验,吸收物理科学和实验技术的一些新成果,对原有内容进行筛选、增补和修订而成的。在修订中,保持了原书的基础理论叙述清楚、物理图像清晰、便于钻研的基本风格,注意介绍近代物理实验研究中经常碰到的一些实验技术。在实验的选择上,作者注意与近代物理发展有密切关系的一些课程如量子力学等的配合,选取了在近代物理发展的一些重要领域中有代表性和基础性的实验,并吸收了教师在科学研究中的成果。全书包括原子分子物理、核探测技术及应用、激光与光学、真空技术和薄膜生长、X射线和电子衍射、磁共振、微波、低温物理、半导体物理等方面,共9个单元,40个实验。

本书可作为高等学校物理类专业本科生和其他专业本科生或研究生的近代物理实验课程教材,也可供从事实验物理的相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验/吴思诚,王祖铨主编. —3版. —北

京:高等教育出版社,2005.11

ISBN 7-04-017775-7

I. 近... II. ①吴...②王... III. 物理学—实验—
高等学校—教材 IV. 041—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 113893 号

策划编辑	刘伟	责任编辑	奚静平	封面设计	王唯	责任绘图	朱静
版式设计	胡志萍	责任校对	杨雪莲	责任印制	陈伟光		

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网址	http://www.hep.edu.cn
总机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landraco.com
经销	北京蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landraco.com.cn
印刷	涿州市星河印刷有限公司	畅想教育网	www.widedu.com
开本	787×1092 1/16	版次	1986年2月第1版
印张	28		2005年11月第3版
字数	680 000	印次	2005年11月第1次印刷
		定价	34.70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

物料号 17775-00

第一版序言

我国“近代物理实验”的教学实践是从1952年以后开始的。在实施新的物理系的统一教学计划后,在过去“近代物理实验”和“无线电实验”的基础上,参照和采用前苏联Г.Б.斯皮瓦克编写的《专门物理实验》一书的部分实验,建立了“中级物理实验”课程,以后各校都曾根据自己的条件和经验有所发展,到20世纪60年代中期已形成我国自己的“中级物理实验”的教学内容和方法。在20世纪60年代后期与20世纪70年代期间各校的中级物理实验室和教学均受到很大的破坏。1980年教育部在北京召开了综合大学物理系“近代物理实验”课程的设置和教材会议,讨论了“近代物理实验”在物理系整个实验教学中的地位 and 作用、实验的目的和要求,并提出迅速恢复和发展近代物理实验室和实验教学的具体要求和措施,希望加强校际交流以促进“近代物理实验”教学水平的尽快提高。教育部领导制定的“近代物理实验”教学大纲就是在1980年会议所提出的原则基础上产生的。从那时以后,各校均组织了师资和实验技术力量大力恢复和发展这门实验课程,而且在综合性大学和高等师范院校范围内已召开了三次全国性的“近代物理实验”教学经验交流会,促进了各校相互学习、取长补短,在实验室的建设、教学仪器的研制、教学内容及方法的改革和创新、师资和实验技术人员的培养等方面均取得前所未有的成绩。在这期间一些院校还编写了自己的“近代物理实验”教材,相互交流,但至今尚未出版一本正式的“近代物理实验”参考书。

“近代物理实验”是继“普通物理实验”和“无线电电子学实验”后一门重要的基础实验课程,在物理专业的整个实验教学中起着承上启下的作用。与普通物理实验不同,近代物理实验所涉及的物理知识面很广,具有较强的综合性和技术性。它在丰富和活跃学生的物理思考,锻炼他们对物理现象的洞察能力,引导他们了解实验物理在物理学发展过程中的作用,正确认识新物理概念的产生、形成和发展的过程,培养严谨的科学作风,学会近代物理中的一些基本实验技术和方法等方面都是非常重要的。可以说,“近代物理实验”是培养学生的独立工作能力,学习如何用实验方法研究物理现象和规律的关键性的一环。所以教师在近代物理实验的教学过程中,应当引导学生明确这门实验课程的目的、要求,注意实验中的物理思想、实验方法并加强实验技能的锻炼。

“近代物理实验”教学大纲所规定的教学指导思想和原则,经过这几年的教学实践证明它是正确的。但“近代物理实验”作为物理系教学计划中一门基础的实验课程,它的内容选择和各校所实施的物理专业教学计划中上面和下面的实验课程有密切关系。如何上下衔接取决于各校的具体情况和条件,它的实验内容和教学方法应当具有一定的灵活性。随着实验条件的改善和教学水平的提高,某些近代物理实验可能下放作为普通物理实验,而某些专门组实验可能下放作为近代物理实验,在实验内容的安排上应当没有死板的要求。如果说“近代物理实验”课程是一个培养学生的物理思想和实验工作能力及素养的教学过程,它的内容在一定时间内应保持相对稳

定,但又是不断变化的一种教学手段。

这本书把全部实验分为十大块,每块从培养学生的物理思想及实验工作能力和素养出发提出它的教学目的和要求。每块中包含的若干个实验都有选择的余地。参考和使用本书时,每一块要选择哪些实验作为教材可以根据教师所用的教学方法而有所不同,特别是因为各校条件不同更不应强求一律,只要学生按每块的具体的目的要求得到必需的训练;而且选择哪些块块也应当因条件而异。我认为,这本书应当是一本可以灵活运用的参考书,希望在兄弟院校参考使用和交流的基础上,在丰富近代物理实验的内容,进一步明确它的目的要求,创造更新的教学方法等方面都能有所前进,不断地把近代物理实验的教学完善起来。

虞福春

1984 年 1 月

编者的话

“近代物理实验”是继“普通物理实验”之后为物理系高年级学生开设的一门综合性较强的必修的实验课程,它与“普通物理实验”不同,近代物理实验所涉及的物理知识面很广,具有较强的综合性和技术性。它在丰富和活跃学生的物理思想,锻炼他们对物理现象的洞察能力,引导他们了解实验在物理学发展中的地位和作用,正确认识新物理概念的产生、形成和发展的过程,配合理论课来掌握近代物理主要领域中的新概念,培养严谨的科学作风,学习如何用实验的方法研究物理现象与规律,以及学习近代物理中的一些基本实验方法和技能等方面起到重要作用。

根据本课程在教学计划中的地位和作用,我们在选题中注意了以下几点:(1)配合与近代物理发展有密切关系的近代物理学的一些课程(如原子物理学、量子力学、固体物理等),安排了一些与课程内容有关的实验,其中不少是在 20 世纪近代物理学发展中起到里程碑作用的重要实验。做好这些实验对学生掌握近代物理主要领域中的新概念(如各种量子化现象、波粒二象性、量子隧穿现象和超导、相对论的动量与动能关系等),以及对于学会用实验的方法研究物理现象与规律和了解物理实验在物理学发展中的地位和作用是十分有帮助的。(2)在近代物理发展的一些重要领域(如核物理、激光和现代光学、凝聚态物理等),结合我校物理学科的设置情况,选取了那些在内容上能反映该领域基本的物理现象与规律,在实验方法与技术上有代表性的实验。对于这方面的选题,我们特别注意到尽量选取那些切合学生实际水平,不要求有太多专业知识的基础实验。(3)注意介绍近代物理实验研究中经常碰到的一些实验技术,如真空技术、核探测技术、低温技术、X 光与电子衍射技术、磁共振技术、薄膜生长技术、扫描隧穿显微镜、微弱讯号提取等。这些都有助于提高学生的实验工作能力和扩大知识面。为避免搞成纯技术性操作,在设计这方面的实验时,同时安排若干具有物理内容的实验课题,以提高学生理论联系实际、解决实际问题的能力。(4)在选题时注意吸收我校教师科学研究的成果。其中有些实验原理比较简单或重要性不如前面提及的实验,但是由于结合了科研工作已有的经验,可引导学生分析的问题较多,实验中供学生选择和扩展的余地较大。这样做也有利于节省经费,加快实验室的更新和建设。

根据教育部物理与天文学学科教学指导委员会关于物理学专业规范的规定,本课程为物理系学生的必修课,参考学时为 120 学时。平均每周课内 4 学时,课外 6 学时,本书每个实验的课内学时平均为 8 学时,因此每个学生一年只能完成 14 个左右的实验。本课程安排在三年级下学期和四年级上学期进行。在时间的安排上尽量做到在学习了近代物理学、量子力学、固体物理学等课程的有关章节后进行。对于非物理专业的学生和研究生,可以根据各专业的需要选修一定个数的实验。对实验特别有兴趣的学生,可以鼓励他们在规定的学时之外选做更多的实验或到实验室深入钻研某些实验。为了适应不同情况的需要,许多实验中除了基本必做的内容外,还附有若干选做的内容,便于灵活掌握。不同层次的学校也应有不同的要求。

本书是在原“近代物理实验”教材第一版(北京大学出版社,1986年)和第二版(北京大学出版社,1995年)的基础上,总结近年来教学实践经验,吸收近几年物理科学和实验技术的一些新成果,对原有内容进行筛选、增加和修改而成的。原教材的第一版在1992年第二届高等学校优秀教材评选中获全国优秀奖。本书保持了原书的基本风格,即在教材中力图把有关的基础理论叙述清楚以供参考。在原理的介绍中,尽量避免繁琐的数学推导,力求物理图像清晰,使学生在做实验之前对原理和方法有比较清楚的了解。为了更好的做到这一点,在本书中增加了“预习要求”。在实验操作部分,除了一些技术性较强的操作和某些特殊的实验,一般不罗列操作步骤,而让学生在掌握了实验原理和方法的基础上,根据实验要求和仪器说明书自己设计实验的步骤。为此在本教材中增加了实验过程中的思考题。

在每一单元的开头部分编写了一节引言,介绍该领域的概况、选题的原则、教学的目的要求以及本单元各个实验的基本内容。与第一版和第二版相比,引言中对于每一单元所需要的共同的原理、基础知识、测量方法、实验装置、安全知识等作了大幅度的删减,以减轻学生预习时的负担,而把精力更多地集中在如何做好每个实验和提高动手能力上。

此外,在这次修订中将第一版和第二版中的第三单元(激光、全息与光学信息处理)和第四单元(其他光学实验)合并为一个单元(激光与光学);在一些单元中删去一些已下放到普通物理实验课程或不常做的实验,而增加若干个新的实验;在测量的不确定度和数据处理方面,考虑到在前置课程“普通物理实验”中已经作了比较详细的介绍,本书不再重复,只对本课程中遇到的物理量的固有的统计涨落现象及相应的处理方法,在第二单元(核探测技术与应用)引言的附录中作了适当补充和介绍。

为了使学生在实验中有更多的动手机会并便于学生做各种试验,或改变条件来验证他们的各种想法,我们所用的实验装置不要求是最先进的、自动化程度最高的,以免削弱对学生动手能力的训练和培养。除了通用的测量设备外,有相当一部分是教员和实验室工作人员动手设计、加工组装而成的。这样的装置可以更大胆的放手让学生使用,学生也能从中学到更多的东西。

实验教学是一项集体的事业。从实验的建设、教材的编写到课程内容的不断完善与改进,都是广大教师和实验室工作人员多年辛勤劳动的结晶。参与本教材编写与修改的教师有(以姓氏笔画为序)王祖铨、冯庆荣、吕斯骅、邢峰、邢启江、吴思诚、季航、周赫田、周增均、荀坤、姚淑德、黄显玲、高巧君等。在此我们还要对长期以来致力于近代物理实验课程建设的黄飞虎、赵汝光、黄植文、周雅琴、朱生传、夏宗璜等老师表示衷心的感谢,他们所积累的教学经验对本书的编写帮助很大,本书部分实验也是在他们原来编写的基础上略作补充、修改而完成的。

本书难免有一些错误与不当之处,敬请读者批评指正。

编者
2005年5月

目 录

第一单元 原子、分子物理 1

- 1-0 引言 1
- 1-1 氢原子光谱的同位素移位 3
 - 附录 平面反射式闪耀光栅光谱仪 6
- 1-2 钠原子光谱的观测与分析 11
- 1-3 塞曼效应 18
- 1-4 X 射线标识谱与吸收 29
 - 附表 某些元素的标识发射谱线及吸收限波长与相应的能量 35
- 1-5 CO 埃氏带系光谱 35
- 1-6 振动拉曼光谱 41

第二单元 核探测技术及应用 56

- 2-0 引言 56
 - 附录一 放射性测量的不确定度 58
 - 附录二 常用核电子仪器的功能及其应用 59
 - 附录三 放射源的安全操作与防护 62
- 2-1 NaI(Tl)闪烁谱仪测定 γ 射线的能谱 65
- 2-2 符合测量 75
- 2-3 卢瑟福散射 83
- 2-4 康普顿散射 89
- 2-5 穆斯堡尔效应 95
- 2-6 用 β 粒子检验相对论的动量-动能关系 107
 - 附录 等效平均磁感应强度的计算 114

第三单元 激光与光学 115

- 3-0 引言 115
- 3-1 He-Ne 气体激光器放电条件的研究 116
- 3-2 He-Ne 气体激光器的模式分析 125

- 3-3 非线性晶体中的二倍频与和频 134
- 3-4 利用复合光栅实现光学微分处理 144
 - 附录一 复合光栅空间滤波作用的数学推导 152
 - 附录二 傅里叶变换的基本公式 153
- 3-5 用反射型椭圆仪测量折射率和薄膜厚度 155
- 3-6 晶体的电光效应及其应用 165
- 3-7 法拉第效应 180
 - 附录 测量法拉第旋转角的光电方法 190
- 3-8 单光子计数 191
- 3-9 光学双稳实验 208
 - 附录 会聚偏振光的干涉 214

第四单元 真空技术与薄膜制备 216

- 4-0 引言 216
- 4-1 高压强电离真空计的校准 224
 - 附录 高压强电离真空计电路工作原理 229
- 4-2 真空镀膜 230
- 4-3 用化学气相沉积法生长金刚石膜 244

第五单元 X 射线、电子衍射和结构分析 254

- 5-0 引言 254
- 5-1 X 射线多晶衍射仪 264
- 5-2 电子衍射 274
- 5-3 扫描电子显微镜 282
- 5-4 扫描隧穿显微镜 291

第六单元 磁共振 299

- 6-0 引言 299
- 6-1 核磁共振 300
 - 附表 一些原子核的自旋数、磁矩、

迴旋频率和共振信号的 相对灵敏度	315	8-0 引言	380
6-2 光泵磁共振	316	附录 使用低温液体的注意事项	383
附录一 二级塞曼效应及双量子 跃迁的观察	325	8-1 纯铜低温热导率的测量	383
附录二 角动量耦合及耦合磁矩的 矢量模型	327	8-2 10 K 以上温区超导体基本特性的 观察	389
6-3 脉冲核磁共振	329	第九单元 半导体物理实验	400
6-4 核磁共振成像	336	9-0 引言	400
第七单元 微波实验	344	9-1 硅的霍尔系数及电阻率的测量	402
7-0 引言	344	9-2 用电容-电压法测量半导体中的 杂质分布	412
7-1 体效应振荡器的工作特性和波 导管的工作状态	357	9-3 用热激活法测量肖特基势垒高度	426
7-2 用传输式谐振腔观测铁磁共振	363	附表	435
7-3 电子自旋共振	371	附表 1 常用物理常量	435
第八单元 低温物理实验	380	附表 2 里德伯表 $109737.31/(m+a)^2$	437

第一单元

原子、分子物理

1-0 引 言

本单元安排一组与“原子物理学”课程密切配合的实验.历史上研究原子结构的许多重要实验对近代物理学的发展起过重要的作用.

用其他粒子和原子直接碰撞,通过分析散射粒子的动量或能量变化获得与原子有关的信息是人们研究原子结构的重要手段之一.例如,1909年卢瑟福(E. Rutherford)根据原子对 α 粒子的散射结果建立了原子结构的核式模型;研究原子、分子的发射和吸收光谱也是人们认识原子、分子结构的重要途径.早在19世纪末和20世纪初,人们已开始了光谱方面的研究,积累了许多资料,但早期的工作主要是对已观察到的光谱进行分类,总结经验规律.20世纪初期对光谱现象和光谱规律的解释所作的努力曾是推动量子力学建立的重要原因之一.当时原子结构的核式模型已经确立,根据对黑体辐射和光电效应现象的研究已经提出能量不连续和光量子的概念,面对原子辐射的线状光谱规律及原子结构稳定性与经典辐射理论的尖锐矛盾,1913年玻尔(N. Bohr)提出了原子结构的量子理论.玻尔理论对当时已知的氢原子光谱线系(可见光范围的巴尔末系和红外区域的帕邢系)规律给出了很好的说明,并且预言了其他线系的存在.第二年(1914年)莱曼(T. Lyman)果然在紫外波段观察到莱曼系,定量测量与理论计算符合得很好.玻尔理论中关于原子内部能量不连续的概念在1914年被弗兰克(J. Franck)和赫兹(G. Hertz)从实验上直接证实.玻尔理论在说明氢原子光谱规律方面的成功引起了人们的注意,促进了光谱研究的发展.但是在复杂光谱和与谱线强度有关的其他问题上玻尔理论遇到极大困难,这些困难和玻尔理论本身在理论上存在的其它问题推动着该理论的进一步发展,导致量子力学的最后建立.

量子力学在原子物理学方面的应用把原子、分子的结构和它们的光谱规律紧密地联系在一起,使光谱成为人们研究原子、分子及其他物质结构的重要手段,光谱方面的研究工作更加蓬勃发展,积累了丰富的资料.20世纪60年代第一个激光器出现之后,人们依据丰富的光谱资料迅速地找到并实现了上万条激光谱线.激光的出现反过来又推动了光谱研究工作,发展了激光光谱学分支,激光已成为研究原子、分子及其他物质结构的强有力的工具.

安排原子物理方面的实验,目的在于通过实验从各方面加深对原子、分子结构的了解;学习研究原子、分子结构的基本方法,特别是光谱研究的方法.此外,这方面的实验中有不少是物理学发展史上著名的实验,做好这些实验对学习如何用实验手段重现物理现象、研究物理规律以及了解实验物理在物理学发展中的地位和作用是很有帮助的.我们根据目前条件安排了几个实验,用不同的方法从不同方面研究原子、分子结构的不同层次.

氢原子是最简单的原子,量子力学对氢原子光谱规律的解释获得了极大的成功.早年人们根据氢原子质量的测量预言:有质量为两个单位的重氢的存在.根据理论上的分析,原子质量的改变必然使里德伯常数发生变化,因此如果存在重氢的话,它的光谱线相对于氢的谱线应略有移动.1932年尤雷(H. C. Urey)利用光栅光谱仪观察到氢原子光谱线的同位素移位现象,把波长差的测量结果与根据理论计算的数值加以比较,二者符合得很好,从而肯定了重氢的存在(“氢原子光谱的同位素移位”实验).利用光谱线的同位素移位可以解释某些元素光谱线的细微结构,测量同位素对应谱线的相对强度可以知道同位素的丰度比.

原子在不同能级之间的跃迁对应于电子运动状态的变化.人们正是通过原子在不同能级之间跃迁产生的发射和吸收光谱来研究原子的结构,进而认识原子内部各种相互作用和运动的.原子内部的相互作用和运动是很复杂的,对于多电子原子,除了原子核与电子的相互作用,还存在着电子之间的相互作用.在“钠原子光谱的观测与分析”实验中,通过对碱金属原子光谱线系的分析,加深对原子实与外层电子之间相互作用的了解;通过对碱金属原子光谱双重结构的分析,加深对原子中电子的轨道运动和自旋运动相互作用的了解.在“塞曼效应”实验中,通过对处于磁场中的原子发射的光谱线的分裂和偏振状态的研究,可以加深对原子角动量空间取向量子化的了解.此外从塞曼效应的实验结果可以推断能级分裂的情况:根据光谱线分裂的数目可以知道量子数 J 的数值;根据光谱线分裂的间隔可以测量 g 因子的数值.因此,塞曼效应是研究原子结构的重要方法之一.当原子核具有自旋时,原子核自旋运动和核外电子的相互作用导致能级的超精细结构分裂,在外磁场中超精细结构能级又分裂为不同的塞曼能级,关于这方面的研究我们安排在第六单元,用磁共振的方法研究铷原子在外磁场作用下超精细结构能级的塞曼分裂.在“X射线标识谱与吸收”实验中,对不同元素的原子,用能量较高的X射线照射,使原子的内层电子激发或电离,从而在内壳层形成一个电子空位,处于较外层的电子跃入内层填补空位的过程中将发射标识X射线.对标识X射线谱进行分析可以识别不同的原子和研究原子内层能级的结构.通过这一系列的实验使我们对原子结构有一个从简单到复杂逐步深入的认识,并学到研究原子结构和原子内部各种运动所用的不同方法.

光谱分析也是研究分子结构和分子内部运动的重要途径.分子中除了电子的运动外,还存在着分子中各个原子的相对运动,即分子的振动以及分子作为整体的转动运动.与分子纯转动运动状态之间的跃迁对应的光谱在远红外波段;分子的纯振动光谱在近红外波段;而电子的跃迁光谱在可见及紫外波段.由于电子跃迁过程中伴随着振动能级和转动能级的变化,形成带状光谱,因此对这种光谱进行分析也可以得到有关分子结构和振动、转动的信息.在“CO埃氏带系光谱”实验中将分析带状光谱的振动和转动结构,使学生获得对分子带状光谱的感性认识,了解振动和转动结构的特点,并通过对带系的测量和有关常数的测定获得对分子振动的初步认识.

用某一波长的光照射样品,在散射光的光谱中除了有频率基本上没有变化的成分(瑞利散射)以外,还有频率略微改变的成分,其中有一类称为拉曼散射光谱.拉曼光谱是散射分子内部结构和运动状态变化的反映.对拉曼光谱中各个成分的波数变化进行测量并对偏振状态进行分析,可以得到有关分子结构和运动状态的信息.拉曼光谱技术不破坏分子结构并且采用可见光的光谱技术研究分子的运动,避免了红外测量技术的困难,因此拉曼光谱得到广泛地应用.激光的出现为拉曼光谱的研究提供了强有力的光源,使拉曼光谱的研究进展十分迅速,已有许多重要的新发展.本单元的实验中我们采用的是比较便宜的He-Ne激光器作为光源,用国产的单色仪、光

电接收器及单光子计数器组成简易的拉曼光谱实验装置,以典型样品 CCl_4 的振动拉曼光谱为例,学习拉曼散射基本原理和实验技术以及利用拉曼光谱研究分子结构和分子振动的方法。

通过以上的简单介绍我们可以看到,除了用其它粒子与原子碰撞、分析散射粒子的动量或能量以及用 X 射线照射原子的方法研究原子结构以外,在原子、分子结构研究中用得比较多的是光谱方法。因此根据不同观察对象正确选择各种分光仪器(特别是比较精密的光栅光谱仪、单色仪、标准具以及拉曼光谱实验装置等),熟悉它们的主要规格、使用和维护方法也是本单元的重要学习内容之一。

最后要说明的是,揭示原子结构核式模型的卢瑟福实验由于采用的是核探测技术,我们把它安排在第二单元。直接观察原子内部能量不连续性的弗兰克-赫兹实验由于原理和方法相对比较简单,已把它安排在普通物理实验中了,本单元不再重复。

1-1 氢原子光谱的同位素移位

早在 1900 年以前迈克耳孙(Michelson)等人就观察到在许多光谱多重线的分支中仍然还存在着精细结构,当时称它为超精细结构。由于那时已知道存在着元素的不同同位素,光谱线的超精细结构被认为是不同的同位素发射的谱线。但后来发现,在单一的同位素的光谱线中也存在着超精细结构。1924 年泡利(Pauli)认为光谱线的超精细结构与原子核的某种性质有关,这个假设后来被进一步的实验所证实。如今我们知道,同位素的存在和原子核的自旋运动对光谱线的超精细结构都有贡献。但是现在“超精细结构”一词通常只限于用来描述单一同位素的光谱线由于原子核的自旋引起的复杂结构,而不同的同位素的光谱差别称为“同位素移位”。氢原子光谱的同位素移位可以准确计算,正是用光谱的方法最先证明重氢的存在。

早年在测定氢原子的质量时,用化学分析方法和质谱方法得到的结果略有不同:用化学分析方法得到的氢原子和氧的同位素 ^{16}O 的质量比为 1.007 99/16;而用质谱方法得到的结果为 1.007 78/16。1931 年 Birge 和 Menzel 提出一个假设来解释两种方法测量结果的差别。他们认为,在氢中含有质量为两个单位的重氢 ^2H (即氘),在自然界的氢中,重氢的含量为四千万分之一,用化学分析方法测得的结果是 ^1H 和 ^2H 两种同位素混合的平均质量与 ^{16}O 的质量比;而用质谱方法得到的是 ^1H 与 ^{16}O 的质量比。他们还指出可以用光谱的方法通过观察巴耳末线系谱线的伴线来发现重氢。1932 年 Urey 等人用 3 米凹面衍射光栅拍摄巴耳末线系的光谱,果然观察到在 H_α , H_β , H_γ 和 H_δ 的短波一侧均有一条弱的伴线。测量这些伴线的波长并与计算结果比较,在实验误差的范围内是一致的,从而证实了重氢的存在。后来测定,在自然界中重氢的含量只有 0.015 6%,还不到五千万分之一。

本实验学习用光栅光谱仪测量氢和氘的光谱,并通过测量氢和氘谱线的波长求出质子与电子的质量比。

一、原理

一般说来,元素光谱线的同位素移位的定量关系是很复杂的。对于重核,中子数目的增加除

了增大原子核的质量以外,还会使原子核的半径发生变化,它们对同位素的光谱都有影响^[1]. 只有像氢原子这样的系统,同位素移位才可以用简单的公式计算. 氢原子中只有一个电子,电子和原子核绕二者的质心运动,原子核质量的改变导致折合质量的改变,从而使得里德伯常量的数值发生变化,由此可以计算同位素移位的大小.

假设电子的质量为 m_e , 氢核是一个质子,其质量为 m_p , 氘核比氢核多一个中子,其质量近似为 $2m_p$. 因此氢原子和氘原子的里德伯常量分别为

$$R_H = R_\infty \frac{m_p}{m_p + m_e} \quad (1-1-1)$$

$$R_D = R_\infty \frac{m_p}{2m_p + m_e} \quad (1-1-2)$$

其中

$$R_\infty = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^3 c} = 109\,737.31 \text{ cm}^{-1}$$

对于巴耳末线系,氢和氘的谱线计算公式分别为

$$\tilde{\nu}_H = \frac{1}{\lambda_H} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (1-1-3)$$

$$\tilde{\nu}_D = \frac{1}{\lambda_D} = R_D \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (1-1-4)$$

对于相同的 n , 由式(1-1-1)~式(1-1-4)可得

$$\Delta\lambda = \lambda_H - \lambda_D = \frac{\frac{1}{R_H} - \frac{1}{R_D}}{\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}} = \frac{R_\infty \left(\frac{1}{R_H} - \frac{1}{R_D} \right)}{R_\infty \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)} \approx \frac{\frac{m_p + m_e}{m_p} - \frac{2m_p + m_e}{2m_p}}{\frac{1}{\lambda}} = \frac{m_e}{2m_p} \lambda \quad (1-1-5)$$

从而得

$$\frac{m_p}{m_e} \approx \frac{\lambda}{2\Delta\lambda} \quad (1-1-6)$$

上式中的 λ 是用 R_∞ 代替 R_H 或 R_D 计算得到的 λ_H 或 λ_D 的近似值, 用式(1-1-6)计算 m_p/m_e 的数值时, λ 可取 λ_D 的数值.

对 n 的每一个数值($n = 3, 4, 5, \dots$), 从实验上测得氢和氘的对应谱线的波长 λ_H 和 λ_D , 用式(1-1-6)可算得 m_p/m_e 的一个数值, 对所有可能测得的谱线对皆如此处理, 最后可求得 m_p/m_e 的平均值.

二、实验装置

1. 光谱仪 氢和氘的巴耳末线的前几对谱线的波长差仅为一点几个埃, 为了把它们的谱线分开, 必须使用分辨率较高的光栅光谱仪, 例如国产的 WPG-100 或 WPG-200 平面反射式闪耀光栅光谱仪, 它们的线色散分别为 8Å/mm 和 4Å/mm , 能够把氢和氘的谱线分开. 关于平面反射式闪耀光栅光谱仪的原理、主要性能指标和使用方法, 请参阅本实验的附录和仪器说明书.

2. 光源 本实验采用 GY-13 型氢-氙混合气体放电管, 经过聚光可以使光谱仪的入射狭缝得到较强的照明. 由于放电管有一定寿命, 因此除了对光和拍谱或观察测量以外, 应尽量减少放电管的点燃时间.

3. 拍摄铁谱的装置(使用摄谱方法时使用).

三、实验内容

如果采用的光谱仪是摄谱仪, 必须利用仪器附属的哈特曼光阑在同一底片上分别拍摄铁光谱和氢-氙放电管的光谱. 拍摄方法、底片处理和波长测量方法与普通物理光学实验的方法、步骤相同^[3]; 如果使用的光栅光谱仪采用电荷耦合器件接收光谱并连接计算机进行处理、控制和显示, 可根据仪器说明书, 利用计算机荧光屏显示的结果直接测量谱线的波长和谐线的相对强度.

对能观察到的氢、氙谱线对都要一一测量它们的波长. 根据每一线对的测量结果, 按照式(1-1-6)计算质子和电子的质量比, 并对不同线对的计算结果加以平均, 与公认值 $m_p/m_e = 1836.152$ 比较.

四、预习要求

1. 了解造成光谱的同位素移位的原因.
2. 了解利用氢原子光谱的同位素移位测量质子与电子质量比的原理.
3. 如果你是第一次使用平面反射式闪耀光栅光谱仪, 请仔细阅读本实验的附录并搞清楚以下问题:

- (1) 光栅光谱仪的分光原理、色散特点和决定光谱仪分辨率的因素.
- (2) 和棱镜光谱仪相比, 反射式光栅光谱仪有哪些优点?
- (3) 和透射光栅相比, 反射式闪耀光栅有什么不同, 有什么优点?

五、思考题

(一) 实验过程思考题

1. 如何布置照明光路?
2. 对不同波段的谱线, 改变哪些因素才能得到强度合适、分辨清楚适于测量的谱线?
3. 如何测量波长?

(二) 实验报告思考题

1. 利用式(1-1-6)计算 m_p/m_e 的数值时, 是否要把空气中测得的谱线波长修正为真空中的波长?

参考文献

- [1] G. 赫兹保. 原子光谱与原子结构. 北京: 科学出版社, 1959. 第五章

[2] 褚圣麟. 原子物理学. 北京: 人民教育出版社, 1979. 第二章第 2.4 节

[3] 张毓英, 邵义全, 陈怀琳, 让庆澜. 光学实验. 北京: 电子工业出版社, 1989

附录 平面反射式闪耀光栅光谱仪

与棱镜光谱仪不同, 平面光栅光谱仪采用平面反射式闪耀光栅作为分光元件, 各种光谱仪的光路布置不完全相同, 下面以一种典型光路布置为例介绍光栅光谱仪的原理. 这种典型光路如图 1-1-1 所示: (a) 为侧视图, (b) 为俯视图.

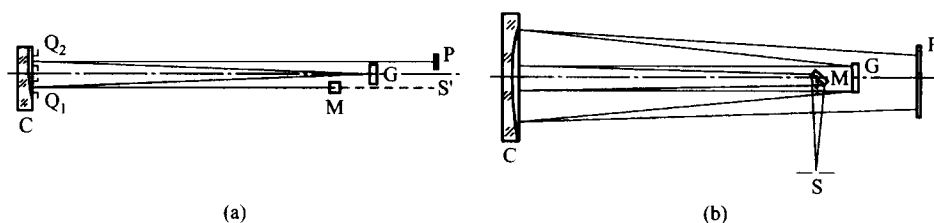


图 1-1-1 平面光栅光谱仪典型光路

从图 1-1-1(b) 可以看出, 平面镜 M 的作用是使入射光转折 90° , 因此在侧视图 1-1-1(a) 中, 狭缝 S 的等效位置为 S' , S' 位于凹面镜 C 的焦面上. 由狭缝 S 进入的光, 经平面反射镜 M 反射至凹面镜 C 的下方 Q_1 (图中 Q_1 与 Q_2 为限制杂光的光阑), 通过凹面镜反射后成为平行光束射到平面光栅 G 上, 经过光栅的衍射, 分解为不同方向的单色平行光束射至凹面镜上方 Q_2 , 然后经凹面镜聚焦在光谱平面 P 上. 光栅 G 放置在一平台上, 可以绕通过光栅刻线的铅垂轴转动, 以改变平行光束相对于光栅平面的入射角, 从而改变观测的光谱范围.

从图 1-1-1(a) 还可以看出, S' 的中心与光谱平面 P 的中心是对称的, 整个光路也是对称的. 这种光路的优点在于采用同一球面反射镜作为准直镜及聚焦镜, 无色差. 此外, 由于光路结构的对称性, 彗差与像散都可以减小到理想的程度, 使得在较长的谱面范围内谱线清晰、均匀.

光栅是光谱仪的核心部分, 它的分光原理及主要性能如闪耀、色散、分辨率等问题简介如下:

(一) 平面反射光栅的构造与光栅方程

目前最广泛应用的是平面反射光栅. 它是在玻璃基版上镀上铝层, 用特殊的刀具刻画出许多平行而且间距相等的槽面. 图 1-1-2 是垂直于光栅刻槽的断面放大图. 我国大量生产的平面反射光栅每毫米的刻槽数目为 600 条、1200 条、1800 条和 2400 条等, 例如 WPG-100 和 WPG-200 型摄谱仪配备的光栅为每毫米 1200 条, WGD-8A 型光谱仪配备的光栅为每毫米 2400 条. 由于铝在近红外区和可见区域的反射系数都比较大, 而且几乎是常数, 此外在紫外区域铝的反射系数比金和银都要大, 加上它比较软, 易于刻画, 所以通常都用铝来刻制反射光栅. 下面将要说明, 在铝层上刻画出适当的槽形, 就能把光的能量集中到某一衍射级, 克服透射光栅光谱线强度微弱的缺点. 此外, 制造透红外区和紫外区的棱镜有各种困难, 如石英在红外区域色散太小, 氯化钠晶体易受潮等等, 而反射光栅则不存在这些问题. 铝制的反射光栅几乎在红外、可见和紫外区域都能用, 而且, 用一块刻制好的光栅 (称原刻光栅或母光栅) 可以复制出多块 (称复制光栅), 复制出的好光栅还可以复制, 复制的方法也简单. 由于有这些优点, 反射光栅在分光仪器中得到越

来越多的应用. 光栅刻槽细密, 切忌用手触摸或用任何东西擦拭光栅表面. 若光栅长期不用, 要加上防尘罩, 放在干燥器皿中.

在图 1-1-2 中, 光栅刻线的重复周期 d 称为光栅常数(通常所给的是每毫米刻线数, 可根据它求出 d), 衍射槽面的宽度为 a . 衍射槽面与光栅平面的夹角为 θ , 称为光栅的闪耀角, 它的意义将在下面说明. 当平行光束入射到光栅上, 由于槽面的衍射以及各个槽面衍射光的相干叠加, 不同方向的衍射光束强度不同. 考虑槽面之间的干涉, 当满足光栅方程

$$d(\sin i \pm \sin \beta) = m\lambda \quad (1-1-7)$$

时, 光强将有一极大值, 或者说将出现一亮条纹. 式中 i 及 β 分别是入射光及衍射光与光栅平面法线的夹角, 即入射角与衍射角; $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, 它表示干涉级; λ 是出现亮条纹的光的波长. 式(1-1-7)中当入射线与衍射线的光栅法线同侧时取正号, 异侧时取负号.

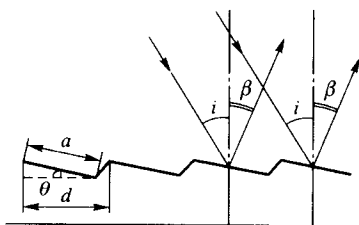


图 1-1-2 光栅刻槽断面示意图

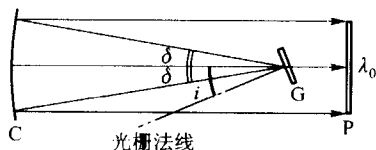


图 1-1-3 Littrow 型光路示意图

由式(1-1-7)可知, 当入射角 i 一定时, 不同的波长对应不同的衍射角, 从而本来混合在一起的各种波长的光, 经光栅衍射后按不同的方向彼此分开排列成光谱, 这就是衍射光栅的分光原理. 我们把成像于谱面中心的谱线波长称为中心波长. 图 1-1-1 的光路中, 对中心波长 λ_0 而言, 入射角与衍射角相等, $i = \beta$ (图 1-1-3), 这种特殊而又通用的布置方式称为 Littrow 型. 因此对中心波长 λ_0 有

$$2d \sin i = m\lambda_0 \quad (1-1-8)$$

从图中可看到, 谱面上成像于中心波长 λ_0 两侧的谱线, 衍射角为 $\beta = i \pm \delta$, 正负号分别与右侧及左侧对应, 因此相应有

$$d[\sin i + \sin(i \pm \delta)] = m\lambda \quad (1-1-9)$$

一般 δ 的最大值不超过 5° .

(二) 光栅的闪耀

对于棱镜光谱仪而言, 入射光束经过棱镜分光以后, 某一波长的单色光的能量除了被棱镜表面反射及被棱镜吸收的那一部分外, 全部集中到某一确定的方向, 因此一般说来光谱线比较强. 光栅则不同, 入射光中某一波长的单色光, 经过光栅衍射后能量被分配到各级的光谱中去, 而能量的分配方式与光栅的型式及各种几何参数有关. 如前所述, 能量的分配是单槽衍射与槽间干涉的综合结果. 光栅方程只是给出各级干涉极大的方向, 由式(1-1-7)可知, 光栅方程只包含光栅常数 d 而与槽面形状无关, 各级干涉极大的相对强度决定于单槽衍射强度分布曲线. 大家熟知的多缝透射光栅有很大的缺点, 即入射光的能量大部分集中在没有色散的零级光谱上, 其余能量又分散在其他各级光谱上, 而我们往往只利用其中一级, 因此谱线很弱. 反射式闪耀光栅的基本

出发点在于把单缝衍射的主极强方向从没有色散的零级转到有色散的某一级的方向上去,以增大该级光谱的谱线强度.图 1-1-2 所示的反射光栅,每个衍射槽面的作用和单缝相同.可以证明:槽面衍射的主极强方向,对于槽面来说正好是服从几何光学反射定律的方向.因此,当满足光栅方程(1-1-7)的某一波长的某一级衍射极大的方向正好与槽面衍射主极强方向一致时,从这个方向观察到的光谱特别亮,就好像看到表面光滑的物体反射的耀眼的光一样,所以这个方向称为闪耀方向.下面分析闪耀的条件.

我们把图 1-1-2 重新画出,入射光线、衍射光线与光栅法线、槽面法线的几何关系,如图 1-1-4 所示.对光栅平面的法线而言,入射角、衍射角分别为 i 及 β (图中画出入射光线与衍射光线在光栅法线同侧的情形).显然,光栅法线与槽面法线之间夹角等于光栅的闪耀角 θ ,因此,对衍射槽面而言,入射角为 $i - \theta$,反射角为 $\theta - \beta$.根据上面分析,实现闪耀的条件是 $i - \theta = \theta - \beta$.从而有

$$i + \beta = 2\theta \quad (1-1-10)$$

因此,对某一波长而言,实现闪耀时, i, β, λ 除了满足光栅方程(1-1-7),还必须同时满足式(1-1-10).

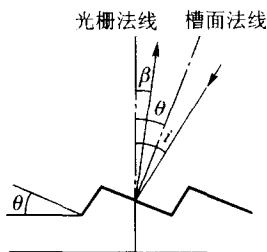


图 1-1-4 入射光线、衍射光线与光栅法线、槽面法线的几何关系

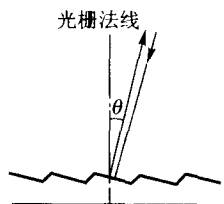


图 1-1-5 中心波长的入射与衍射方向

按照 Littrow 方式布置的光栅,对于中心波长有 $i = \beta$,代入式(1-1-10)得到 $i = \theta$,亦即对于光栅平面而言,入射角 i 等于光栅的闪耀角,此时入射光及衍射光均垂直于衍射槽面,如图 1-1-5 所示.把 $i = \beta = \theta$ 代入光栅方程,得

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (1-1-11)$$

只要 i, β, λ 同时满足式(1-1-7)和式(1-1-10),对波长 λ 而言也就满足闪耀条件,但通常却是把满足式(1-1-11)的波长称为闪耀波长.由于 m 可以取 $m = 1, 2, 3, \dots$,因此对一块确定的光栅(d, θ 一定)仍然有第一级闪耀波长,第二级闪耀波长,……各种数值,但习惯上在说明光栅的规格时,闪耀波长通常指的是第一级闪耀波长.例如 WPG-100 型摄谱仪配备的两块光栅的闪耀波长分别为 300 nm 和 570 nm,而 WGD-8A 型光谱仪配备的光栅的闪耀波长为 250 nm.

由于 $d \approx a$ (见图 1-1-2),对满足闪耀条件的波长为 λ 的某一级光谱来说,同一波长的其他衍射级(包括零

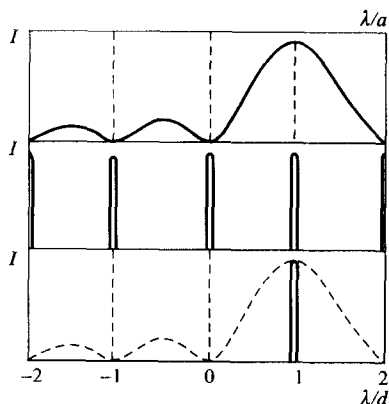


图 1-1-6 不同级光谱的强度分布