



新世纪高等院校物理专业教材

近代物理实验教程

JINDAI WULI SHIYAN JIAOCHENG

张伟风 主编

河南大学出版社
开封

近代物理实验教程

JINDAI WULI SHIYAN JIAOCHENG

主 编:张伟风

副主编:黄明举 刘向阳 苏 磊

河南大学出版社

· 开封 ·

图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验教程/张伟风主编. —开封:河南大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-81091-967-8

I. 近… II. 张… III. 物理学—实验—教材 IV. 041—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 029956 号

责任编辑 张 震

责任校对 张 震

封面设计 王四朋

出 版 河南大学出版社

地址:河南省开封市明伦街 85 号

邮编:475001

电话:0378—2825001(营销部)

网址:www.hupress.com

排 版 郑州市今日文教印制有限公司

印 刷 河南郑印印务有限公司

版 次 2009 年 12 月第 1 版

印 次 2009 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 22.5

字 数 548 千字

印 数 1—2000 册

定 价 40.00 元

(本书如有印装质量问题请与河南大学出版社营销部联系调换)

内 容 简 介

本书是根据普通高等学校“近代物理实验”课程教学大纲编写的,内容包括:原子物理、原子核物理、现代光学与光谱技术、光(声)电效应技术与应用、磁共振技术、微弱信号检测技术、真空技术与应用、低温技术与应用、微波技术与应用以及综合性高级物理实验.全书共分10章,44个实验项目,除经典物理实验外,同时有选择地介绍了一部分当前新开发的科研项目,形成了一个全新的实验课程体系.本书着重阐述实验的物理思想和方法,注重培养学生的实验能力和科学素养,在内容安排和阐述形式上加强对学生创新思维和综合能力的培养,调动学生学习的主动性和创造性,提高学生的综合实验能力和创新意识.

本书可作为普通理工科大学物理专业或相关专业“近代物理实验”课程的教学用书,也可作为从事实验教学的教师和工程技术人员的参考用书.

前 言

“近代物理实验”是为物理类及相关专业高年级学生开设的一门综合性较强的专门实验课程。该课程以一些著名经典实验和在近代物理实验技术中有广泛应用的典型实验为教学内容,它不仅能使学生掌握如何用实验方法观察物理现象、研究物理规律,更能使学生了解近代实验技术在许多科学研究领域与工程实践中的广泛应用的情况,还有助于开阔学生的视野,培养他们理论联系实际、严谨认真的科学精神。教学实践表明,该课程的开设对培养学生的学习兴趣非常重要,也是培养学生实践动手能力和创新意识的重要环节。

河南大学近代物理实验室曾经是河南省最为出色、最先进的专业基础实验室之一,在20世纪七八十年代,已能开出教学大纲要求的所有实验项目,最多开出实验项目达30多个。近年来,随着高等教育投入力度的加大和省部共建项目资金的资助,近代物理实验室在实验项目数量和实验室建设规模上都得到了一定的发展。在这样的平台下,我们积极进行实验教学改革,改进教学方法,推进近代物理实验教学的现代化建设;不断更新教学内容,建立了实验课程的新体系,也进行了教材的探索与建设。在吸收兄弟院校经验的基础上,我们对所用教学讲义进行了多次修订、补充,从而逐步形成本教材,力求使其能够适应现代教学的需要和新世纪高等教育发展趋势。

本教材内容涵盖了原子物理、原子核物理、现代光学与光谱技术、光(声)电效应技术与应用、磁共振技术、微弱信号检测技术、真空技术与应用、低温技术与应用、微波技术与应用和一些综合性、创新性高级物理实验,在内容安排上不但继承了以往教材选用著名实验、融合现代科学技术等优点,还体现了加强对学生创新思维和综合能力的培养,调动学生学习的主动性和创造性,提高学生的综合实验能力和创新意识。同时,作者还在我院和兄弟院校常用的科研仪器中开发了一部分新的近代物理实验项目,形成了一个全新的综合性、创新性实验课程体系。

本书编写人员是河南大学和郑州轻工业学院正在担任或曾经担任过近代物理实验课的教师,他们在近代物理实验教学实践和改革中积累了丰富的教学经验。本书是集体智慧和辛勤劳动的结晶,张伟风教授、黄明举教授做了组织和统编工作,并由尹国盛教授主审。感谢历年来使用“近代物理实验讲义”的师生和兄弟院校的同行对本书编写提出的宝贵意见。在编写过程中我们还参阅了兄弟院校的近代物理实验教材和讲义,在此一并致谢。该教材的出版受到河南大学教材建设基金的资助,感谢河南大学教务处和出版社领导的支持和帮助。

由于编写时间紧迫,编者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,期望得到广大教师、学生和各位读者的批评指正。

编者

2008.10 于河南大学

目 录

绪 论	1
第一章 原子物理实验	5
实验 1.1 夫兰克-赫兹实验	6
实验 1.2 塞曼效应实验	11
实验 1.3 激光拉曼散射光谱	18
实验 1.4 密立根油滴实验	23
实验 1.5 钠原子光谱的拍摄与分析	27
实验 1.6 氢、氘原子光谱	31
第二章 原子核物理实验	34
实验 2.1 G-M 计数器和核衰变的统计规律	35
实验 2.2 穆斯堡尔效应	42
实验 2.3 正电子湮没寿命谱的测量	48
第三章 现代光学与光谱实验	53
实验 3.1 半导体泵浦激光原理	54
实验 3.2 He-Ne 激光器的模式分析	61
实验 3.3 光学多通道分析	67
实验 3.4 多功能光栅光谱仪吸收光谱分析	70
实验 3.5 黑体测量	78
实验 3.6 偏振光现象	82
实验 3.7 激光全息技术实验	87
实验 3.8 光学信息处理	91
附实验一 空间滤波	97
附实验二 假彩色编码(θ 调制)	100
实验 3.9 椭圆偏振法测量薄膜厚度和折射率	103
第四章 光(声)电效应技术及应用实验	112
实验 4.1 法拉第效应	113
实验 4.2 电光效应	116
实验 4.3 声光效应	125
实验 4.4 LD/LED 的 $P-I-V$ 特性曲线测试	134
实验 4.5 光电探测原理实验	143
实验 4.6 光电倍增管特性参数的测试	154
实验 4.7 四探针法测电阻率	161

第五章 磁共振技术实验	166
实验 5.1 脉冲核磁共振实验	170
实验 5.2 微波电子顺磁共振	178
实验 5.3 微波铁磁共振	184
实验 5.4 光泵磁共振	189
第六章 微弱信号检测技术	198
实验 6.1 单光子计数	200
实验 6.2 相关器的研究及其主要参数测量	204
实验 6.3 锁相技术	210
实验 6.4 表面光电压谱技术	217
第七章 真空技术与应用实验	226
实验 7.1 电子衍射	236
实验 7.2 等离子体辉光放电特性测量	243
实验 7.3 真空镀膜	250
第八章 低温技术与应用实验	258
实验 8.1 高温超导材料临界温度测量	262
实验 8.2 变温霍尔效应测量	267
第九章 微波技术应用实验	277
实验 9.1 反射式速调管工作特性与波导管工作状态研究	289
实验 9.2 微波技术综合实验	292
附实验一 微波实验测试仪器调整及应用	293
附实验二 圆极化波的产生与检测	299
附实验三 圆极化波的反射和折射	301
第十章 综合性物理实验	305
实验 10.1 铁电材料性能测试与分析	305
实验 10.2 压电陶瓷的电学性能分析	317
实验 10.3 晶体 X 射线衍射与材料结构分析	331
实验 10.4 ZnO 薄膜制备、结构和光电性质表征	337
附录 1 基本物理常量 1998 年平差值	347
附录 2 中华人民共和国法定计量单位	348

绪 论

物理学是一门以实验为基础的学科,实验教学是培养合格物理工作者必不可少的组成部分,也是培养学生严谨的科学态度和良好的实验素质的必要环节.理工科大学生在校期间有很多教学内容是在实验室里完成的.在这样丰富的时间内,怎样做好实验?如何科学合理的利用这些时间,从而实现最大的收获?如何才能从实验中学到有用的知识和实用技能,培养自己的思维方法?下面结合实验教学自身的特点,提出一些具体认识,供同学们参考.

1. 要以正确的态度认识实验

(1) 实验在科学发展中的地位和作用

美国有句谚语:“实验是打开科学大门的钥匙.”科学实验是研究自然现象和规律以及改造客观世界的基本手段.自然科学的研究包括理论与实验两个方面,科学技术发展的历史经验表明,科学实验和科学理论是相互依赖、相互促进、相辅相成的.一方面,科学实验是发展理论的源泉和检验科学理论的重要标准;另一方面,科学理论又能指导和促进科学实验.著名的物理学家海森伯(Werner Heisenberg, 1901~1976)曾说:“显而易见,不论在哪里,实验方面的研究是理论认识的必要前提,而且理论方面的主要进展,只是在实验结果的压力下而不是依靠思辨来取得的.另一方面,实验结果向前发展的方向,应该总是由理论的途径来实现.”美籍华裔物理学家黄克孙也曾说:“过去的300多年里,物理学的伟大成就,是实验和理论密切结合的果实.”

实验科学的先驱、意大利的达·芬奇(Leonardo Da Vinci, 1452~1519)曾说:“科学如果不是从实验中产生,并以一种清晰的实验结束,便是毫无用处的、充满谬误的,因为实验乃是确实性之母.”日本科学家武谷三男曾说:“自然科学以实验为生命.”英国的罗吉尔·培根(Roger Bacon, 1214~1292)非常重视实验活动,他曾说:“一个真正的学者应当依靠实验来弄懂自然科学、医学、炼金术和天上地下的一切东西”.法国生物学家巴斯德(Louis Pasteur, 1821~1895)曾说:“科学家一旦离开实验室,就像战场上缴了械的士兵.”美籍著名华裔物理学家丁肇中在1976年获得诺贝尔物理学奖时曾发表一篇演说,其中提到:“我是在旧中国长大,因此想借这样一个机会向发展中国家的青年强调实验工作的重要性,中国有句谚语:‘劳心者治人,劳力者治于人.’这种思想很落后,对发展中国家的青年害处很大,由于有这种思想,很多这些国家的学生都倾向于理论研究,从而回避实验工作.事实上,自然科学理论不能离开实验的基础,特别是物理学,它是在实验中产生的.我希望由于我的这次获奖,能够唤起发展中国家的学生们对实验的兴趣,从而注意实验工作的重要性.”

实验方法由于其自身的优点,使它成为愈来愈多的研究人员探索自然现象和研究客观规律的重要实践活动.在现代科学研究中实验的手段越来越显示出其重要作用,这在诺贝尔奖的发放中得到了体现.以物理学奖为例,从1901年至1978年获奖的项目中,属于实验技术或基本是从事实验性工作的项目约占60%,理论性的项目约占40%.从许多实例当中都可以看出,实验研究在科学技术的发展中有着重要的地位和作用.

(2) 实验是理工科教学的重要组成部分

现在,虽然大家已经普遍意识到实验是非常重要的一项实践性教学环节,但是很多学生

还没有认识到其在整个理工科教学中的重要性. 在学生们中间经常会有议论:“实验课真没意思, 学好学不好都没关系, 理论课才是最重要的.” 那么到底应该怎样去认识实验教学呢?

实验教学在理工科教学中具有非常重要的地位, 实验教学和理论讲授相互配合, 会有利于学生对物理概念和原理的深入理解和掌握. 通过观察实验现象形成的概念, 将是深刻的、生动的、终生难忘的. 实验教学对于培养学生的能力和科学作风是必要的, 也是很有效的措施. 在实验室这个环境里, 学生可以取得科学知识, 培养科学兴趣和态度, 掌握科学实验方法, 发展科学思维能力, 通过实验来研究问题、导出定律、验证理论等, 所以从重视实验到对实验产生兴趣, 对做好实验是至关重要的. 另外, 实验教学还有其独特的优越性, 每一个实验都不只是包含单一方面的理论知识, 而是多方面知识点的融合, 做好实验, 不但可以锻炼实验素质和技能, 还能培养综合运用知识认识问题、解决问题的能力.

(3) 实验与科学研究以及将来工作的关系

大家已普遍认为, 没有实验就没有现代科学技术, 更谈不上科学技术的成果与发展.

实验教学为科学研究准备了必要的技术基础和科学素养, 实验课堂上进行的训练、动手能力的培养, 对从事科研活动以及毕业后的工作是至关重要的. 据初步统计, 理工科学生中60%以上毕业后从事实验性工作, 而真正从事纯理论研究的是少数, 由此可见, 大学生在校期间重视实验、做好实验对于今后的发展是非常重要的.

(4) 实验教学与人才培养、国家发展的关系

国家的发展关键是科学技术的发展, 而科学技术的发展要求有一定科学经验和素质、知识储备雄厚、动手能力强的大批人才, 培养这样的人才是离不开实验室和实验教学的. 过去甚至现在某些中学广泛采用题海战术, 这样导致很多学生在进入大学学习之前就已经存在对实验的认识不足的现象, 使他们养成了做实验不如看实验、看实验不如背实验的习惯. 实验课上不去动手, 不去勤思考, 而去背书, 做实验成了纸上谈兵, 实验教学完全失去了它应有的价值. 结果培养出来的学生动手能力差、综合素质低, 完全不符合高校高素质创新型人才的培养目标, 更不能担当起国家发展的重任.

总之, 实验研究和理论研究都是科学研究的重要手段, 任何轻视实验或轻视理论的思想都是错误的. 要做好实验, 一定要对实验有正确的认识, 要像学习理论课一样认真对待, 在实验课堂上发挥学习的主动性和创造性, 变“要我做”成为“我要做”, 主动克服困难, 认真思考, 在实验中学到更多的知识、培养更强的能力.

2. 认真做好实验的预习环节

一般的实验教学分为预习、实验操作和写出实验报告三个大的环节, 那么, 如何对待实验预习, 应该怎样去做呢? 预习是为正式的实验操作准备, 所以应该做到:

(1) 认真阅读实验教材、参考书并查阅相关的图书、资料, 事先对实验内容作一个全面的了解, 有时还需要查看仪器的说明书、操作规程及其他参考资料, 把实验的基础知识和背景知识弄清楚, 明白实验的目的、要求、原理、仪器、方法、注意事项以及需要解决的问题等.

(2) 有条件的学生可以到实验室进行预习, 了解仪器设备性能, 可以在教师同意后进行试操作, 通过预习明确“做什么、怎么做、为什么”等问题.

(3) 写出预习报告. 拟定出实验步骤, 把要观测的实验内容写清楚, 把要测量的实验数据绘成表格, 设计好, 一并写在预习报告上.

3. 认真做好实验的操作环节

这一过程是让学生进入实验室进行正式的观测和操作,在这一环节里学生应该在教师的指导下主动地、自觉地、有创造性地去获取知识和实验技能,通过实验探索研究问题的方法,培养细致、踏实、一丝不苟、严肃认真和实事求是的科学态度以及勇于克服困难、坚韧不拔的工作作风。

(1) 认真观察

实验是一个综合的教学过程,它是观察、分析、测量、交流、推论五个方面的综合.观察是一个感知过程,它通过看、听、触、尝、嗅等直接感知客观事物,在实验中要培养良好的观察习惯,逐步提高观察能力.事实表明,透过现象快速看到本质,准确无误地观察实验的真实情况,不是一件轻而易举的事情,有些人对一些异常现象视而不见、听而不闻,而有些人却从中获得了新的发现和发明.

(2) 养成良好的测量习惯

在实验中,为了更好地进行观测,最好先观察后测量,先练习后测量,先粗测后细测,养成一个良好的测量习惯.

(3) 注重基本内容,明确重点

每一个实验根据教学大纲要求都提出了需要重点掌握的内容,比如基本知识、基本方法和基本技能,这些是需要重点掌握的,要始终明确实验的重点知识和重要内容.

(4) 发挥学习的主观能动性和创造性

做好实验,教师的指导固然重要,但更为重要的是学生要有发现问题、研究问题的主动态度,对待实验要有信心、耐心和细心,要逐步摆脱对教师的依赖,改变过去严格按照实验教材中的步骤看一步做一步的实验方法.学生要培养自己勇于动手、勤于思考的习惯,做到善于分析思考、学会提出问题.

(5) 不单纯追求实验结果和数据,学会分析实验

做实验一般需要实验数据,在很多学生的心目中有老师的所谓“标准数据”,然而,不要以为实验的目的就是为了做出和“标准数据”一致的结果.有很多学生满足于自己的结果和“标准数据”或理论计算一致,认为这样实验就圆满成功,而当两者的差别较大时,就感到失望,认为实验一点也没有进展,就会抱怨仪器设备,甚至会拼凑数据或涂改实验数据和结果,这是很不可取的.实验中要学会分析实验,不论数据好坏,都要认真分析,查找原因.分析实验包括分析实验方法、仪器设备、人为因素、操作技能、测量次数和周围环境等因素对测量结果的影响.当自己的数据和老师或其他同学的不一致时,可能是自己错,也可能仪器有问题,或者出现其他意外的原因,这时一定要认真检查自己的操作过程和实验记录,必要时可以重复多做几次,一定要找出问题,要有耐心,认真细致,严肃对待.

(6) 养成良好的实验习惯

实验室工作的基本素质和素养是在实验的过程中逐渐培养和锻炼形成的,那么一开始进入实验室的时候就一定要注意养成良好的实验习惯.比如,记录观测结果应该用正规的记录本,不能用随手带的教材或纸张,这样既不规范,又容易丢失数据,用记录本可以完整地把实验过程的所有现象和结果都记录下来,也便于分析和查找问题.记录数据要准确简明,有条有理,自始至终认真对待,如实记下观测数据、简单过程和出现的一切不正常的或自己认为有意义的现象,以便写实验报告时分析讨论,数据记录最好清楚明了,还要注明单位.

(7) 严格遵守实验室规则,注意安全

一旦进入实验室就一定要按照学生实验守则严格要求自己,以严肃的态度、严格的要求、严密的观测进行实验,保证实验顺利进行.如果实验室中有电、机械、化学、温度、压力、辐射等可能发生危险的仪器,一定要按照实验操作规程,不能疏忽大意,避免人身事故和损坏仪器事件的发生.

4. 认真对待实验报告

实验报告是整个实验的全面总结,是完成实验过程的一个必要环节,通过实验报告可以客观公正地评价自己的实验结果,使实验过程在头脑中更加清晰.因此写实验报告应该实事求是,严肃认真,不能敷衍了事,更不能伪造数据或抄袭他人的结果.实验结束后应尽早写出实验报告,这样做不但数据完整准确,也便于对实验的分析与讨论.

(1) 写实验报告要采用统一的实验报告纸,字体要端正,语句要简练,用语要确切,图表要按照统一要求绘制,使整个实验报告清晰明了.

(2) 写实验报告一定要按照统一的格式书写,应该包括实验名称、实验目的、实验仪器、实验原理、实验步骤、数据处理与结果讨论,还要包括实验过程中涉及的计算公式、观测和记录的数据以及绘制的图表等内容.

(3) 实验报告最后一定要有结果分析与讨论.这是培养学生从实验现象中观察和分析问题能力的重要方面,可以分析讨论的内容很多,比如:

① 弄清实验的原理和实验方法;掌握仪器的性能;实验目的的完成情况,如果没有完成实验目的应分析原因.

② 实验误差的分析与讨论.分析都有哪些误差来源,哪些是主要的,哪些是次要的,系统误差表现在哪里,如何减少或消除这些误差.

③ 改进实验的设想.改进实验的测量方法甚至是对仪器设备自身的改进、改造.实验教材中的实验步骤是否合理,如果不合理,提出修改意见.对实验教师的业务素质、教学能力、教学方法、教学效果等是否满意,如果不满意,应向老师提出自己的希望和要求.

④ 实验过程中发现异常现象,应正确地对待和处理,包括:实验过程中遇到了哪些困难,通过哪些途径克服了困难等.

⑤ 实验自身涉及了哪些重要的物理现象和物理理论,通过参阅哪些资料可弄清实验的来源、发展过程以及涉及的仪器设备.

⑥ 通过做实验使学过的哪些理论知识得到了进一步的理解和巩固,实验自身的原理和方法对自己有哪些启示,有没有具体的实用价值等.

(4) 写实验报告一定要养成严肃、科学、实事求是、一丝不苟的态度,这是培养学生科研素质的重要方面,也是锻炼学生语言表达能力的方法,写实验报告就是写科技论文和技术报告的训练的必要环节.

总之,在校理工科大学生要重视实验教学的地位和作用,认真对待实验的每一个环节,养成良好的实验习惯,培养实验室工作的基本素质和素养以及扎实的实验能力和科学意识,为以后的发展奠定坚实的基础.

(刘向阳)

第一章 原子物理实验

预备知识

原子物理是研究原子的结构、运动规律及相互作用的物理学分支,研究内容主要有原子的电子结构、原子的能级结构和光谱规律、原子之间或原子与其他物质相互作用。

1897年汤姆孙(Joseph John Thomson, 1856~1940)发现电子并确认它是各种原子的共同组成部分之后,中性原子内正、负电荷的质量和分布成为摆在物理学家面前的首要问题. 1904年汤姆孙提出原子的正电荷和质量均匀分布于原子内、电子镶嵌在其中的“葡萄干圆面包模型”. 1911年卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871~1937)分析 α 粒子散射实验结果与汤姆孙原子模型存在明显歧异,提出原子的核式结构模型,认为原子的正电荷和质量分布在原子中心很小的核内. 根据经典电动力学,在原子的核式结构模型中,电子绕核加速运动,将不断向外辐射能量,电子将最终塌缩于原子核,因而原子是不稳定的;而且电子绕核运动应发出连续谱也与实际上原子的线状光谱不符. 这些事实表明,研究宏观现象确立的经典电动力学不适用于研究原子内部的微观过程,需要进一步探索原子内部运动规律,从而建立适合于微观过程的理论. 1913年玻尔(Niels Bohr, 1885~1962)在卢瑟福的原子核式结构模型基础上,结合原子光谱的经验规律,应用量子概念,提出原子结构的新假设,建立玻尔理论,成功地解决了原子的稳定性问题,并说明了原子光谱的规律性,成为原子理论发展的重要里程碑. 1924年德布罗意(De Broglie, 1892~1987)提出微观粒子具有波粒二象性,不久被实验证实,1926年薛定谔(Erwin Schrödinger, 1887~1961)、海森伯(Werner Karl Heisenberg, 1907~1976)、玻恩(Max Born, 1892~1987)、狄拉克(Paul Dirac, 1902~1984)等人建立解释微观粒子运动规律的量子力学. 量子力学的建立为解决原子问题提供了锐利的武器,量子力学在阐明原子现象的种种问题中逐步发展和完善,开创了近代物理的新时代. 20世纪30年代可称为原子物理的时代,原子物理学取得了丰硕的成果,原子能级的结构和能级的精细结构、原子在外场中的能级结构、原子光谱规律、原子的电子壳层结构以及原子的深层能级结构和X射线标识谱等问题相继圆满解决,所获得的关于原子结构的知识成为了解分子的结构、固体的性质以及说明许多宏观现象和规律的基础.

原子光谱提供了原子内部结构的丰富信息. 事实上研究原子结构的原子物理学和量子力学就是在研究分析阐明原子光谱的过程中发展和建立起来的. 原子是组成物质的基本单元,原子光谱的研究对于分子结构、固体结构的研究具有重要意义.

本单元由夫兰克-赫兹实验、塞曼效应实验、激光拉曼散射光谱实验、密立根油滴实验、钠原子光谱的拍摄与分析实验、氢氘原子光谱实验等组成,这些实验是物理学的发展史上的里程碑,为人类认识物质的微观结构及其他众多学科的发展提供了必要的理论基础和实验方法. 学习这些实验,是为了学习和研究光谱技术和原子结构的基本原理、实验方法、分析方法及其在多学科领域的应用.

实验 1.1 夫兰克-赫兹实验

前言

1911年,卢瑟福根据 α 粒子散射实验,提出了原子的核式结构模型.1913年,玻尔将普朗克量子假说运用到原子核式结构模型,提出了与经典理论截然不同的两个重要概念:原子定态能级和能级跃迁.电子在不同能级之间跃迁时伴随电磁波的吸收和辐射,电磁波频率的大小取决于原子所处两定态能级间的能量差,并满足普朗克频率定则.随着英国物理学家埃万斯对光谱的研究,玻尔理论被确立.但是任何重要的物理规律都必须得到至少两种独立的实验方法的验证.1914年,德国物理学家夫兰克(James Franck, 1882~1964)和赫兹(Gustav Hertz, 1887~1975)在多年研究气体电离的基础上,用慢电子与稀薄气体中原子碰撞的方法(与光谱研究相独立),简单而巧妙地直接证实了原子能级的存在,并且实现了对原子的可控激发,从而为玻尔理论提供了有力的证据.1920年,夫兰克及其合作者对原先的装置做了改进,测得了亚稳能级和较高的激发能级,进一步证实了原子能级的存在.这是量子物理发展史上理论与实验相互作用的又一个极好的例证.1925年,由于两人的卓越贡献,他们获得了当年的诺贝尔物理学奖.夫兰克-赫兹实验至今仍是探索原子内部结构的主要手段之一,在近代物理实验中仍把它作为传统的经典实验.

实验目的

(1) 学习夫兰克-赫兹实验的物理思想,了解夫兰克和赫兹在研究原子内部能量问题时所采用的基本实验方法.

(2) 掌握电子与汞原子碰撞和能量交换过程的微观图像和影响这个过程的主要物理因素.

(3) 测量汞原子的第一激发电势,证实原子能级的存在;进一步理解玻尔理论.

实验仪器

本实验采用 FH-1A 型夫兰克-赫兹实验仪一套:包括加热炉、夫兰克-赫兹管及微电流测量放大器.

实验原理

1. 玻尔理论

玻尔的原子理论模型认为:原子是由原子核和以核为中心沿不同半径的轨道旋转的一些电子构成的.对于不同的原子,这些轨道上的电子数分布各不相同,不同轨道上的电子能量亦不同.原子的总能量为原子核与核外电子相互作用的势能和电子绕核运动的动能之和.电子运动轨道半径越小体系的能量越小,电子的轨道半径越大,体系的能量越大.当某一原子的电子从低能量的轨道跃迁到较高能量轨道时,我们就说该原子进入受激状态.如图 1.1-1 所示,如果电子是从轨道 I 跃迁到轨道 II,我们就说原子进入第一激发态,如果从轨道 I 跃迁到轨道 III 则原子进入第二激发态.

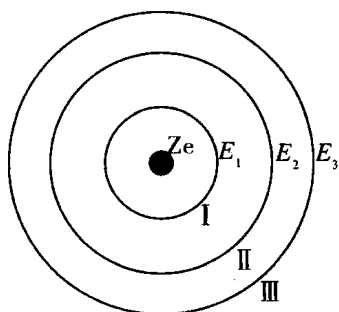


图1.1-1 原子轨道能级示意图

玻尔理论的前提是玻尔提出的两条基本假设：

(1) 定态假设：原子只能处在一些不连续的定态中，其中每一状态相应于一定的能量值 $E_i (i=1, 2, 3, \dots)$ 。

(2) 频率定则：当原子从一个定态跃迁到另一个定态时，就吸收或辐射一定频率的电磁波（能量），频率的大小决定于原子所处两定态之间的能量差，并满足以下关系

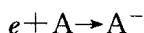
$$h\nu = \Delta E = E_n - E_m \quad (1.1-1)$$

其中 h 为普朗克常数，1986 年推荐值为 $h = (6.6260755 \pm 0.0000040) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

2. 电子与原子的相互作用

电子与原子的相互作用可以有如下几种形式：亲和、弹性碰撞与非弹性碰撞等，由此产生激发、电离、复合与光电效应等。

(1) 亲和：电子 e 进入原子 A 的作用势区时，被原子捕获而形成负离子 A^- ，即



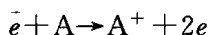
这种现象多发生在亲和势较大的电负性原子，如氧、氯等；而对电正性的原子，如汞或其他金属原子、惰性气体原子，这种现象往往不会发生。

(2) 电子与原子的碰撞：电子与原子的碰撞有弹性碰撞与非弹性碰撞，其能量关系可用如下公式表示

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}MV'^2 + \Delta E \quad (1.1-2)$$

式中 m 和 M 分别为电子和原子的质量， v 和 v' 分别为电子碰撞前、后的速度； V 和 V' 则分别为原子在碰撞前、后的速度； ΔE 为原子的内能项，当 $\Delta E = 0$ 时，为弹性碰撞； $\Delta E \neq 0$ 时，为非弹性碰撞，当 $\Delta E > 0$ 时，为第一类非弹性碰撞；而 $\Delta E < 0$ 时则称之为第二类非弹性碰撞。

(3) 电离：当电子的能量足够大时，可使原子 A 的价电子脱离束缚形成正离子 A^+ 而电离，即



式中 \bar{e} 表示具有较大能量的电子。

(4) 复合：正离子 A^+ 与慢速运动的电子碰撞时， A^+ 可以与电子复合而成为中性原子 A ，但与快速电子碰撞时，由于相互作用的时间很短，发生复合的可能性较小。

(5) 光电效应：处于激发态的原子退激时，辐射出频率为 ν 的光量子，这些光量子打到金属极板时会发生光电效应，从金属极板中打出速度为 V 的电子，能量关系为

$$\frac{1}{2}mV^2 = h\nu - \varphi \quad (1.1-3)$$

其中 φ 为金属的逸出功, h 为普朗克常数.

3. 实验设计思想

原子状态的改变通常在两种情况下发生,一是当原子本身吸收或发射电磁辐射时,二是当原子与其他粒子发生碰撞而交换能量时.能够变更原子所处状态的方法有多种,如光照、电磁辐射、电子与原子碰撞等;而这些方法中,能提供各种不同能量的最简便的方法是用电子碰撞原子.电子的能量可以利用调节加速电压 U 的方法随意控制,因而可以进行各种传递能量的实验测量,进行完整的实验研究.

由玻尔理论可知,处于正常状态的原子发生状态改变时,它所需要的能量不能少于该原子从正常状态跃迁到第一激发态时所需要的能量,这个能量称为临界能量 E_0 .当电子与原子碰撞时,如果电子能量小于临界能量,则发生弹性碰撞,原子不能吸收电子的能量,电子碰撞原子前后的能量几乎不变,而只改变运动方向.如果电子能量大于临界能量,则发生非弹性碰撞,这时电子给予原子跃迁到第一激发态所需要的临界能量使原子的状态发生改变,其余的能量仍由电子保留.

如果加速电场的电压等于 U ,则电子经过加速后具有的能量为 eU .当 U 值较小时,此时电子能量 eU 小于临界能量 E_0 ,电子和原子只能发生弹性碰撞;当加速电压等于 U_0 时电子具有的能量 eU_0 恰好等于临界能量 E_0 ,此时原子从基态跃迁到第一激发态, U_0 就称为第一激发电位.继续增加 U 时,电子具有的能量就逐渐上升到足以使原子跃迁到更高的激发态(第二、第三激发态等).最后,到某一值 U_I 时,电子能量足以使原子电离, U_I 就称为电离电位.

一般情况下,原子在激发态所处的时间不长就自动回到基态,并以电磁辐射的形式放出以前所获得的能量,其频率 ν 可以由下述关系求得

$$h\nu = eU_0 \quad (1.1-4)$$

所以,当电子的能量等于或大于第一激发能时,原子从基态被激发到激发态,很快再从激发态回到基态,辐射出光子,即原子发光.受激原子所辐射的光的光谱成分与原子的受激程度有关,受激到不同激发态,产生不同的光谱,即与轰击的电子能量有关.

本实验使用充有汞的夫兰克-赫兹管,使电子和汞原子碰撞并进行观察和测量,实验装置如图 1.1-2 所示.在玻璃容器 M 中,充以要测量的气体(汞蒸气).电子由阴极 K 发出,在阴极 K 和栅极 G 之间加一电场对电子加速使其获得能量;又在栅极 G 与接收极(板极) A 之间加一恒定的反向电压(拒斥电压).当电子经过加速碰撞后通过 KG 空间进入 GA 空间时,如果仍然具有较大的能量,就能冲过反向电场而到达 A 极,检流计中便有电流.如果电子在 KG 空间与原子碰撞后损失了大量的能量使原子激发,而自身剩下的能量很小,则通过栅极 G 后不足以克服拒斥电压,就不能到达板极 A ,那么也就没有电流通过检流计.若发生这种情况的电子很多,检流计中的电流就要明显降低.在实验过程中,逐渐增加 U_{KG} 并观察检流计中电流 I_A 的变化,就可得到检流计电流 I_A 随加速电压 U_{KG} 变化的伏安特性曲线如图 1.1-3 所示.

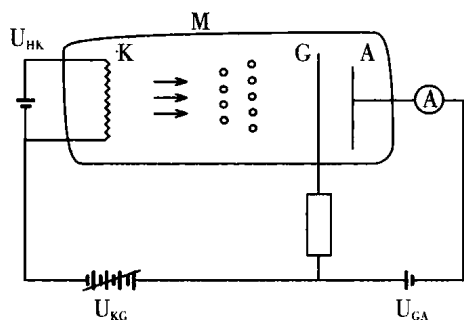


图 1.1-2 实验原理图

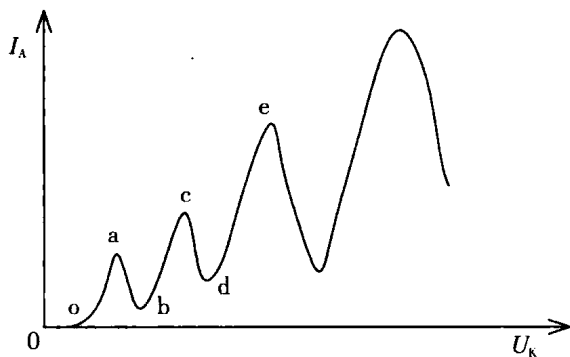


图 1.1-3 汞的伏安特性曲线

由图 1.1-3 可知,随着加速电压 U_{KG} 的不断增大,A 极电流起初上升,加速电压到达某一确定数值时,电流突然下降;不久又上升,然后又下降,并且每次突然下降时的电压间隔都是相同的,其值等于汞原子的第一激发电位.曲线第一上升段 oa 是实验开始时的情形,此时加速电压 U_{KG} 刚开始升高, $eU_{KG} < E_2 - E_1$ (E_1 为原子基态能量, E_2 为原子第一激发态能量),电子在运动过程中只能与原子发生弹性碰撞,电子不损失能量.随着电压的升高,A 极电流 I_A 也随之增加.当加速电压 U_{KG} 等于或稍大于原子的第一激发电位 U_0 时,在栅极 G 附近,电子的动能达到了原子的第一激发能 $E_2 - E_1$,电子与原子发生非弹性碰撞而把能量交给了原子,使之跃迁到第一激发态,电子本身能量大大减少,无法通过反向拒斥电场 GA,致使板极电流 I_A 急剧下降,产生了曲线第一下降段 ab 的突变.随着 U_{KG} 的增加,电子获得的能量随之增加,与汞原子发生非弹性碰撞后剩下的能量也逐渐能克服反向拒斥电压而到达 A 极,板极电流 I_A 又开始增加,如 bc 段所示.当 $U_{KG} = 2U_0$ 时,又造成 cd 段所示的板极电流第二次下降.同理,只要 $U_{KG} = nU_0$ ($n=1, 2, 3, \dots$), I_A 都会明显下降,从而在 I_A-U_{KG} 图上出现一系列的极大(小)值之间的相邻峰(谷),其对应的电势之差即为汞原子的第一激发电位.

应当注意,从实验中得到的 I_A-U_{KG} 图中可以看到,与第一峰值相应的加速电压并不完全等于汞原子的第一激发电位,而比它稍小.这主要是由于仪器上接触电位的存在,它使曲线沿电压轴向左移动了一段距离.极大(小)值出现的峰(谷)都具有一定的宽度,这是因为从阴极发射出电子的能量服从一定的统计分布规律.另外,电子与原子的碰撞有一定的几率,当大部分电子在栅极前与原子发生碰撞时,总有一些电子“逃避”了碰撞,到达了板极 A,因而曲线上的 I_A 在低谷处也没有下降到零.总之,原子被激发到不同状态时,要吸收一定数值的能量,这些数值不是连续的;即原子对电子能量的吸收是有选择性的,只能吸收特定的能量,它表明原子内部能量是量子化的,亦即证实了原子能级的存在.此外,原子处在激发态是不稳定的,它回到基态时要以光辐射的形式释放能量.

实验内容

测量不同加速电压时安培表电流的大小,作图分析电流变化的原因以及影响电流的因素.

实验步骤

1. 预热和调整

(1) 将装有充汞的弗兰克-赫兹管的温控加热炉接通电源,选择一定的炉温(由实验室

定),调好温控旋钮,预热 15~30 min,以得到合适的汞蒸气密度.

(2) 同时接通微电流测量放大器电源,进行预热.将仪器的“栅压选择”开关拨向“DC”然后将“栅极电压 U_{KG} ”旋钮逆时针旋至最小.预热 20 min 后,将“工作状态”拨向“R(激发)”,对电流表进行“零点”和“满度”校准.调零与满度之间略有牵连,故需反复调节.

(3) 把“栅极电压 U_{KG} ”旋钮旋至最小,“栅压选择”和“工作状态”拨向“O”,用随机所附专用连接线测量加热炉面板上各电压(不能让 G、K、H 接反或短路!).

2. 测量汞原子的第一激发电势 U_0 .

(1) 将“工作状态”开关拨向“R(激发)”,再调节加热炉的温控开关,使炉温升至 180 °C,待其稳定后,即可进行激发电势测量.

(2) 先进行全面观察.暂将“倍率”拨到“ $\times 10^{-6}$ ”档或“ $\times 10^{-5}$ ”档,缓慢增加 U_{KG} 的值,全面观察一次 I_A 的变化情况.注意要及时更换倍率以适应电流变化.

(3) 测量 I_A-U_{KG} 曲线.使 U_{KG} 从零起缓慢增加,记录下电流 I_A 及对应 U_{KG} 的电压值,特别地,应认真找到并读出 I_A 的峰谷值及对应的各个 U_{KG} 值,为便于作图,在各峰谷值附近应多测几个点.记下各测试条件.

(4) 分别改变炉温(如 160 °C、220 °C)或稍许改变拒斥电压的大小,再测几条不同条件下的 I_A-U_{KG} 曲线.

注意事项

(1) 在测量过程中,当 I_A 迅速增大时或夫兰克-赫兹管出现强烈蓝光时,要立即减小 U_{KG} 至零.

(2) 加热炉外壳温度较高,注意避免灼伤.

(3) 由于炉内温度场不均匀,温度计的水银泡必须与夫兰克-赫兹管的栅极中段相齐.

(4) 实验完毕,须将“栅压选择”和“工作状态”开关置“O”,“栅极电压 U_{KG} ”旋至最小,暂不拆除 K、H、G 连接线,不要切断微电流放大器的电源;先切断加热炉电源,使其快速冷却之后,才能切断放大器及各种连线,以延长夫兰克-赫兹管寿命.

思考题

1. 本实验是如何证实原子内部存在能级的?
2. 计算实验中汞原子所辐射的波长.
3. 讨论灯丝电压、夫兰克-赫兹管温度以及拒斥电压对实验曲线的影响.

参考资料

1. 胡镜寰,刘玉华.原子物理学.北京:北京大学出版社,1999
2. 褚圣麟.原子物理学.北京:高等教育出版社,1979
3. 杨福家.原子物理学.北京:高等教育出版社,1999

(李新营)