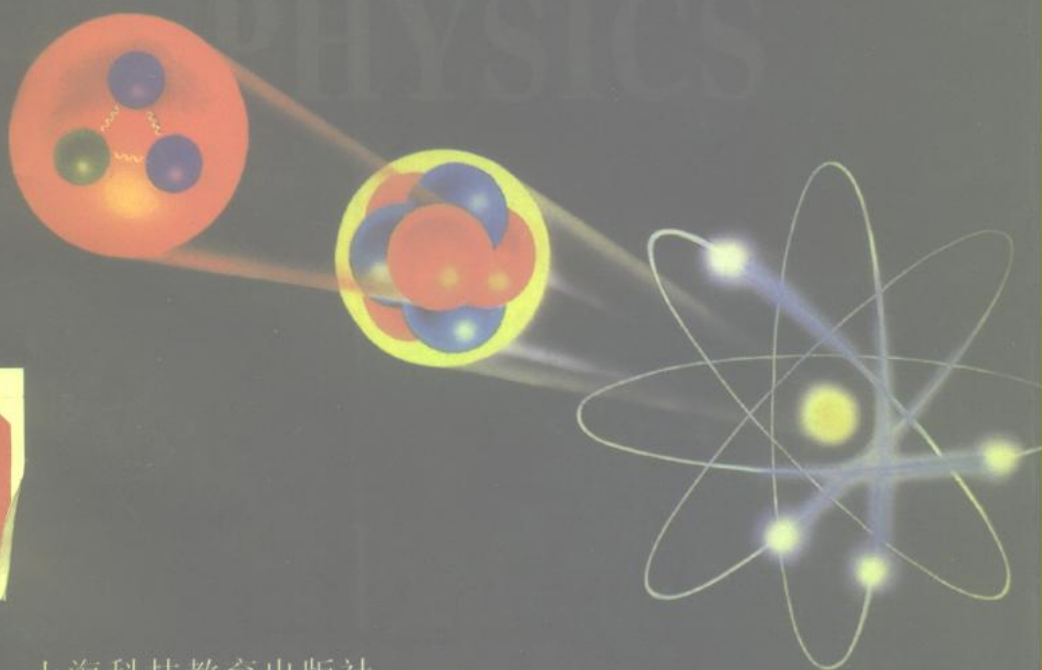


近代实验物理

吴祥兴 忻贤堃 主编

MODERN
EXPERIMENT
PHYSICS



上海科技教育出版社

429202

0+-33

W/96

近代实验物理

吴祥兴 忻贤堃 主编

上海科技教育出版社

近代实验物理

吴祥兴 忻贤堃 主编

上海科技教育出版社出版发行

(上海冠生园路 393 号 邮编 200233)

各地新华书店经销 上海师范大学印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 17.25 字数 430000

1998 年 10 月第 1 版 1998 年 10 月第 1 次印刷

印数 1—1100

ISBN 7-5428-1454-0/0 · 137

定价: 25.00 元

序

《近代实验物理》是作者基于多年从事物理实验教学的经验,根据国家教委颁发的《近代物理实验教学大纲》的要求,贯彻教改的精神编写出来的。作者在过去的教学中深感近代物理实验中不少内容与相关的理论课程脱节,一般的实验原理说明不足以使学生透彻了解实验的要求和内涵,影响教学效果,因此需要有比较系统的理论作为铺垫。作者还指出有些经典的物理实验,在物理发展史上占有重要地位,实验的思想反映出物理先辈精妙的构思,这些实验往往能起到丰富和活跃学生的物理思维的作用,在教学中应加以重视。我很赞成这样的想法。说到底,物理学是一门实验科学。物理学是通过实验观察现象,研究物质的相互作用,通过实验确定量的关系,找出规律,归纳出理论,并通过实验来检验理论,以客观地认识事物的本质。正是由于物理学广泛地研究了物质的相互作用和运动规律,从中发展了许多实验的方法,测量的手段,开拓了许多应用前景,由此发展为许多技术学科门类。物理学构成了现代技术科学的重要基础,或者说许多物理学的分支已经发展演变为新的技术学科,例如半导体、微电子、光谱分析、激光、核能、加速器、空间技术等等,可以开列出一长串和物理学相关的技术学科。因此掌握好近代物理实验是非常有意义的。

本书选编了三十多个实验,涉及近代物理七八个门类,体现了物理的广泛性。体现了作者的指导思想。其中就有如密立根油滴实验这样经典的物理实验,也有一些已经发展为相关技术学科中的常规测量技术,例如晶体晶轴的确定,以及真空技术,半导体技术和光谱分析技术中的一些测量技术,已都是常规方法。作者为了

使学生做实验之前有较完整的基础知识,因此每一个实验或一组实验,都有相对完整的介绍,这是本书的一个特点。作者还建议,对没有条件给学生做实验的学校,可增加演示和讲解,启发学生多观察,多思考,多讨论。我想根据作者的想法,在有条件的地方还可以组织参观近代物理中的重大实验装置,如同步加速器、核反应堆、激光核聚变等,使学生领略到近代物理实验的风采。要知道近代物理实验采用了规模宏大的高技术手段,为了进行实验要实施重大的工程建设,以便对物质作更深层次的认识。

不过,本书必竟是一本实验的教材。如何培养学生通过近代物理实验,提高学生物理实验的思想和技能,是实验教学中的重要课题。在我接触到的一些考研研究生的考生中,发现不少考生基础不错,对所提问题的原理上能说清,但一问到具体的实验装置、测量手段、仪器量程等就说不清楚,毫无数量、尺度上的概念,因此实验教学中要提倡学生对实验装置、仪器量程、调整精度等多一些摸索,加强学生实验中数量、大小的概念。另外实验结果的处理也是很重要的一环,本书第十章讲了实验的误差和数据处理,很有必要,由于计算器和计算机的普及,学生常有一种错觉,计算器给出的一长串数据,就觉得算得很精确,缺乏误差的概念。因此似乎仪器的精度愈高愈好,我想在这方面给学生正确的训练是很必要的。还有一个方面也要指出的,随着数字技术的发展,测量技术也发展很快,测量手段可以不断更新。因此实验内容不变,使用的仪器可根据学校的条件配备。例如光谱分析用的摄谱仪采用感光胶片,记录谱线,用光度计测量谱线强度,用阿贝比长仪测波长。现在光谱分析仪器可以用光电接收器接收光谱信号,转换成电信号,量化后直接和计算机相联。因此有条件的时候让学生及时了解现代化仪器的发展。当然,作为学生实验不要追求过多的自动化。自动化程度一高,往往冲淡学生对物理实验的理解。

最后,我想说物理专业的人才也许具有最大的潜在优势。因为

现代技术科学在学科不断交叉分化中发展,不断涌现新的学科,但许多新的学科其基础仍是物理学。因此高素质的物理专业人才可塑性较大,容易适应新的学科。可见如何提高学生的物理素质,提高实验技能,掌握物理实验的方法,领悟其精神,这实在是提高物理专业人才素质的重要内容之一。作者奉献的这本教材,确是提高近代物理实验教学水平的一项有益的尝试。

中国科学院院士、中国科学院

上海技术物理研究所研究员

匡定波

1996年7月

前 言

“近代物理实验”课程是高等师范院校和理工科大学物理系的一门专业必修课。它是继普通物理实验和电子学实验以后，理论起点更高、综合性和技术性更强的一门实验课程。它对于开拓高年级学生的近代物理知识面，学习近代物理各主要领域中具有代表性和典型性的实验方法和技术，以及运用近代实验方法和技术研究物理现象和物理规律，从而提高分析问题和解决问题的实际能力等方面具有重要作用。

教材是教学要求和教学内容的载体，必须要与学生的学习基础相适应。由于近代物理学涉及的领域广泛，学生在做许多实验时往往并不具备相应的基础知识，因此在一些教材中过于简单的实验原理叙述就会与学生原有的知识基础脱节，致使学生在学习中碰到较多困难，做完实验以后，对近代物理相关的分支学科的研究对象、方法及理论要点等还是不甚清楚；此外，我们觉得在近代物理的发展历史上曾起过重大作用的一些著名实验虽已显得古老和简单，但它们对于丰富和活跃学生的物理思想，培养他们对物理现象的观察能力和分析能力，引导他们了解物理实验在物理概念和理论体系的产生、形成和发展过程中的作用，仍然有着极其重要的意义。但是现有的一些教材往往忽略了这一点，没有将一些受条件、设备和时间限制但又十分重要的实验纳入教学内容，这对于从纵深角度了解近代实验物理的发展不能不说是一个缺憾。鉴于以上这些考虑，我们在加强课程建设和深化教学改革的过程中，着手编写了现在这本书。

取名为《近代实验物理》，意在突出实验的物理概念、物理思

想和物理方法,我们的初衷是力图使本书具有以下特点:其一,充分考虑读者(学生)原有的知识水平,着重于对实验物理基础作较详细的论述,为读者学习和研究新的物理领域在理论和方法上作具有相当广度和深度的铺垫;对于在前期课程中已学过的有关内容也着力于加深与提高;其二,实验选题以该实验在近代物理学发展历史上的地位和作用,以及涉及的理论和方法是否具有代表性和典型意义为原则,不过多拘泥于一般学校有否这方面的实验条件或是否适于学生动手操作,力求使近代实验物理课程具有相对独立的结构体系;其三,对于实验方法,着重于总体的一般描述,不受各校、各单位现有仪器设备特异性的限制;其四,全书三十余个实验选题中的大部分选自国家教委统一编制的《近代物理实验教学大纲》,但是也适当充实一些较新的前沿课题或属于专门化实验的选题,如:高温超导和光折变相位全息存贮, MIS 结构的高频 C-V 特性等。

作为教学改革的尝试,建议在使用本教材时以较多的学时用作课堂教学与讨论,以利于学生弄清物理概念、物理思想和物理方法。对于不适宜作为学生实验的内容,建议以适当的演示和讲解去启发学生多观察、多思考、多讨论,不要轻易放弃这些内容,因为它们对于读者(学生)了解近代物理学发展的历史和人们对自然规律的认识过程,提高分析能力和科学素质还是很有益处的。

本书的编写是按照统一的要求和提纲,由吴祥兴、忻贤堃、魏乐汉、陆剑虹、刘炳璋、宋允升、曹光慈、徐怀方、忻云龙等同志分别执笔的。全书由吴祥兴、忻贤堃修改统稿。由于本书的编写以多年的教学实践为基础,而这基础又是与先后在上海师范大学近代物理实验室工作过的教学、研究人员的努力分不开的,因此我们认为本书是集体劳动的成果,也是我们实验室工作的阶段性总结。本书的编写得到了中国科学院院士、中国科学院上海技术物理研究所匡定波研究员,原上海师范大学校长朱鸿鹑教授,同济

大学物理系顾牡教授等多位专家的指导和帮助,他们分别审阅了编写提纲和书稿,提出了宝贵的修改意见,匡定波院士还在百忙中为本书作序。上海科技教育出版社的领导和编辑人员为本书的出版做了大量的工作,在此一并致以诚挚的谢意。

《近代实验物理》的编写是我们在深化教学改革、加强课程建设、提高教学质量这一目标下的一项探索性实践。由于编者水平有限,时间仓促,错误与不妥之处在所难免,诚请有关专家和广大读者批评指正。

吴祥兴 忻贤堃

1996年7月

目 录

第一章 量子理论的实验基础	1
引 言	1
§ 1.1 黑体的热辐射	5
§ 1.2 电子电荷的测定	13
§ 1.3 光电效应	24
§ 1.4 氢原子光谱	34
§ 1.5 夫兰克-赫兹实验	55
§ 1.6 电子衍射	64
第二章 固体物理实验选题	82
引 言	82
§ 2.1 金属的热电子发射及钨功函数的测量	83
§ 2.2 无机晶态半导体	91
§ 2.3 单晶体的光图象定向	103
§ 2.4 劳厄法确定单晶体的晶轴方向	113
§ 2.5 德拜粉末相法确定晶格长度	125
§ 2.6 晶体缺陷的检测	136
§ 2.7 能带论初步	139
§ 2.8 半导体的电导及电阻率的测量	149
§ 2.9 变温霍耳效应	154
§ 2.10 实际 p-n 结的电流-电压方程	164
§ 2.11 用电容-电压法测量半导体的杂质浓度分布	173
§ 2.12 MIS 结构的高频 C-V 特性	182
§ 2.13 高温超导体基本特性测量	198

第三章 高分辨率光谱	213
引 言	213
§ 3.1 塞曼效应	214
§ 3.2 谱线的展宽	222
§ 3.3 光栅光谱仪	226
§ 3.4 法布里-珀罗干涉仪	242
§ 3.5 塞曼效应实验	254
第四章 射线探测技术与方法	259
引 言	259
§ 4.1 气体射线探测器(G-M 计数管)	268
§ 4.2 闪烁计数器和 γ 单道测量	277
§ 4.3 固体粒子探测器(半导体 α 谱仪)	282
§ 4.4 符合测量	287
第五章 散射实验及穆斯堡尔效应	295
引 言	295
§ 5.1 卢瑟福 α 粒子散射	300
§ 5.2 康普顿散射	305
§ 5.3 穆斯堡尔效应和穆斯堡尔谱	311
第六章 磁共振	335
引 言	335
§ 6.1 磁共振的宏观经典理论	337
§ 6.2 磁共振的量子描述	347
§ 6.3 核磁共振	353
§ 6.4 电子顺磁共振	359

第七章 近代光学实验选题	368
引 言	368
§ 7.1 全息摄影及其应用	370
§ 7.2 用反射椭偏仪测量薄膜的折射率及厚度	377
§ 7.3 拍频法光速测量	388
§ 7.4 法拉第效应	396
§ 7.5 光致折射效应与全息存储	402
第八章 微波技术基础	415
§ 8.1 微波基本知识	415
§ 8.2 微波的基本测量	441
第九章 真空及微弱信号检测	450
引 言	450
§ 9.1 真空的获得与测量	451
§ 9.2 真空镀膜	462
§ 9.3 锁相放大器原理及其应用	479
第十章 实验误差及数据处理	493
引 言	493
§ 10.1 随机误差与概率统计	494
§ 10.2 直接测量数据处理的一般过程	514
§ 10.3 间接测量的误差	519
§ 10.4 最小二乘法	523
§ 10.5 系统误差	530
附 表 常用物理常数	537

第一章 量子理论的实验基础

引 言

经典物理学从 16 世纪末创建以来,经历了近 300 年的不断发展,至 19 世纪末,达到了它全盛的“黄金时代”。经典物理学建立了完整的三大理论体系:物体的机械运动,包括质点、质点组、刚体和连续介质(包括弹性介质和流体)服从牛顿力学;热运动服从热力学和经典统计物理;电磁运动(包括光)服从经典电动力学。由于经典物理学的巨大成功,当时不少的物理学家认为,物理学的大厦已经建成,物理世界的重要规律都已发现,物理学上一些基本的、原则的问题都已经解决,今后的工作只是提高实验精度,在测量数据的小数点后面多添加几位有效数字而已。正如 1900 年著名的英国物理学家开尔文(威廉·汤姆孙)在一篇展望 20 世纪物理学的文章中宣称的:“在已经基本建成的科学大厦中,后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了。”

然而,即使在当时,经典物理大厦也不是天衣无缝的。就在开尔文的同一篇文章中说出了他的担心:“但是,在物理学晴朗天空的远处,还有两朵小小的令人不安的乌云。”这两朵乌云,指的就是当时经典物理学无法解释的热辐射实验和迈克耳孙-莫雷实验。开尔文的担心是很有道理的。几乎就在经典物理达到全盛的同时,19 世纪末和 20 世纪初,物理学发展到了深入研究微观现象的新阶段。物理学上的新发现层出不穷,其中电子的发现、X 射线的发现和放射性现象的发现最具重要意义,因而被称为世纪之交物理学的三大发现。三大发现为人们观察微观物质新世界打开了一扇窗

户,大大地拓展了人们的视野。“两朵小小的令人不安的乌云”又向经典物理的观念和理论提出了尖锐的质疑,促使众多的物理学家走出经典物理的大厦,改变旧观念,探索新理论,寻求新方法,最终引发了一场物理学革命的暴风骤雨。

1900年,法国物理学家普朗克为了解释黑体辐射能量谱的实验规律,解救经典物理的“紫外灾难”,首先提出了振子能量量子化的概念,写下了量子理论的第一篇章。而迈克耳孙-莫雷实验和其他实验一起,否定了经典电磁理论的以太假说,为1905年爱因斯坦建立狭义相对论开辟了道路。近代科学史上著名的20世纪物理学大革命就此拉开序幕。

量子理论和相对论是近代物理学的两大支柱,而早期量子论又是近代量子力学发展过程中不可逾越的重要阶段。无论是早期量子理论还是近代量子力学甚至现代粒子物理等科学理论,其建立的基础和检验其正确与否的标准都是科学实验。在原子物理、量子力学的发展史上大致有三类最重要、最有名的实验:第一类是证实光量子的实验,包括黑体辐射、光电效应、康普顿散射等实验;第二类是证实原子中量子态的实验,如氢光谱及其他原子、分子光谱实验、夫兰克-赫兹实验、史特恩-盖拉赫实验等;第三类是证实物质波动性的实验,最重要的是电子衍射实验。另外,还有电子电荷的精确测量,以及作为电子自旋假设重要依据的塞曼效应(将在本书第三章中作专门介绍)等实验。这些实验构成了一个完整的体系,是量子理论的坚实基础。

历史上普朗克最早提出能量量子化的假设,这标志着人类对自然规律的认识从宏观进入了微观领域。普朗克常数 h 的发现,找到了微观与宏观区别的定量尺度,普朗克常数 h 、真空中的光速 c 成了近代物理学一系列重要理论数学表述中不可缺少的表征因子, h 和 c 的精确测量也成了近代技术发展水平的一个重要标志。

电子的发现和电子电荷的精确测量是人类认识微观世界的重大突破。由 J. J. 汤姆孙发现的电子是第一个被人类确认的基本粒子,它是通往原子物理学大门的钥匙,又是人们最终认识量子的关键。电子电荷的测量,密立根首创的油滴实验,其构思之巧妙、方法之简捷、数据记录处理之严谨被誉为实验物理的典范。

光电效应的发现,引出了爱因斯坦的“光量子”假设,而密立根对光电效应精确的实验研究又证实了爱因斯坦的“光量子”理论。爱因斯坦揭示了光具有“波粒二象性”,这是微观粒子最本质的特性。爱因斯坦关于光的新理论不仅扩展了普朗克的量子化概念,而且使量子理论的发展进入了一个新阶段。

著名的康普顿散射实验(将在本书第五章中作专门介绍)是继爱因斯坦用“光量子”理论解释光电效应(此效应只涉及光子的能量)之后,对光的量子学说进一步的实验肯定。康普顿第一次从实验上证明了爱因斯坦在 1917 年提出的关于光子具有动量的假设,并且证明光子确实像粒子那样是以整体的形式参加散射的。我国物理学家吴有训作为康普顿的助手,以各种不同的元素为散射物质做了大量的实验,为康普顿散射及康普顿效应的发现作出了杰出的贡献。

氢原子光谱是人们探求原子内部奥秘的重要窗口,氢光谱的实验规律是玻尔原子模型及其原子理论最重要的实验基础。氢原子光谱、类氢离子光谱、碱金属原子光谱以及各类分子光谱的研究是一系列微观概念和相关理论的出发点。由于光谱技术的进步,氢光谱等的精细结构、超精细结构规律还成了量子电动力学等新量子理论的有力佐证。

夫兰克-赫兹实验是证明原子能量量子化的最直观、最清晰的实验,其物理概念之明晰,实验方法之简炼为举世公认。玻尔对证实他原子理论的夫兰克-赫兹等实验作了极高的评价,他着重指出:“这些实验为原子的不连续稳定状态的假说打下了基础。”“考

察了这些实验以后,很难摆脱这种印象,即我们先从光谱的规律性引出了特殊稳定状态存在的假定,而现在从这些实验里,我们获得了直接而且独立的证据,这个证据证明,特殊的稳定状态确实存在。”夫兰克和赫兹除了测量一些原子的第一激发电位外,还测量了多种原子的高激发电位和电离电位,这些实验都以简单和准确著名。70 多年过去了,夫兰克-赫兹实验的方法在当今的科学研究中仍有着重要的价值。

玻尔的氢原子理论是分三步完成的,即两个假设(原子的量子化定态和原子辐射的频率条件)和依照对应原理推出的角动量量子化。角动量量子化有时也被称为玻尔的第三个假设。这些假设已被光谱实验和夫兰克-赫兹实验所证实。应该指出,斯特恩(O. Stern)和盖拉赫(W. Gerlach)在 1921 年进行的著名实验首次证实了在外磁场中角动量的取向也是量子化的,同时还证实了电子自旋假设的正确性,这是一个第一次量度原子的基态性质的实验,正是这个实验进一步开辟了原子束、分子束实验的新领域。今天,在现代物理实验室中常见的塞曼效应实验及磁共振实验,则从另一个侧面进一步证实了电子和原子核的角动量的空间量子性。

微观客体的波粒二象性是量子力学最重要的概念。关于光子的波粒二象性,如前所述,已由爱因斯坦于 1905 年提出,从而完满地解释了光电效应,后又为康普顿散射实验所证实。1924 年德布罗意将波粒二象性推广到了所有微观粒子,最先得到验证的是电子。电子的衍射现象是由戴维孙、革末和 G. P. 汤姆孙分别从实验中获得的,从而证实了电子确实具有波动性,并测得了电子波的波长,为量子力学的理论核心薛定谔波动方程的建立提供了实验依据。在电子衍射实验的带动下,中子、质子、 α 粒子、原子、分子的波动性也先后得到了实验验证,量子理论从此进入了一个全新的发展阶段。

从早期量子论的诞生至今已近一个世纪了,物质微观结构及其运动规律的研究还在不断地深入,如今涉及量子现象、量子理论的实验正可谓数不胜数。本章所介绍的仅为量子理论发展历史上起着重要支柱作用的一些基本实验,然而学习这些实验对于研究和认识近代物理发展中的历史规律,了解新的物理概念、物理思想的形成及其实验过程,接受巧妙的实验方法和实验技能的熏陶,具有不可替代的重要作用。

§ 1.1 黑体的热辐射

1.1.1 物体的热辐射现象

生活经验表明,温度较高的物体能向周围放射热量,炽热的物体会发光,不同温度的物体会发出不同颜色的光。其实所有物体都向周围放射热量,同时也从周围吸收热量。如果一个物体开始时比周围热,那么它将冷下来,因为它放射热量的速率大于吸收热量的速率,当达到热平衡时,放射和吸收的速率相等。我们把与物体的温度密切关联的能量放射称为热辐射。物体的热辐射从频率或波长的角度来看,既可包含可见光辐射,也可包含看不见的紫外、红外光以及各种波长的电磁波的辐射。

在常温下,大多数物体能被人们看到,并不是由于它们发光,而是由于它们反射光。假如没有光照射,我们就不能看到它们。但是在很高的温度下物体是会自己发光的,如炉子里烧着的煤发出红光,被鼓风机吹旺的焦炭发出耀眼的白光。当然,即使在高温下,甚至在绝对温度几千度的高温下,90%以上的热辐射是不可见的,是在电磁波谱的红外区域。

实验表明,当逐步提高一个炽热物体的温度时,会产生两个效应:① 温度越高,热辐射越强烈,物体随着温度升高,从暗淡到