



普通高等教育“十一五”规划教材

国家级物理实验教学示范中心教材系列

近代物理实验

侯登录 郭革新 主编



科学出版社
www.sciencep.com

国家级物理实验教学示范中心教材系列

近代物理实验

侯登录 郭革新 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国家级物理实验教学示范中心系列教材之一,是作者及其领导的教学团队在多年教学经验的基础上,结合教学改革的新成果编写而成。内容包括原子物理实验、核物理实验、激光和光学实验、微波和磁共振实验、磁学实验、半导体实验、真空镀膜技术、电子衍射和 X 射线衍射、低温物理实验和铁电材料实验 10 个单元,共 41 个实验,添加了反映近年来物理学和实验技术发展的相关内容,尤其是对磁性材料、半导体材料、超导材料、铁电材料的制备方法和材料结构及性能表征技术实验进行了介绍。

本书可作为高等师范学校和理工科院校物理专业学生的教材,也可作为函授生和中学物理教师在职进修的教学用书,同时可供从事实验物理研究的教师 and 科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验/侯登录,郭革新主编. —北京:科学出版社,2010

国家级物理实验教学示范中心教材系列

ISBN 978-7-03-028857-8

I. ①近… II. ①侯…②郭… III. ①物理学—实验—高等学校—教材

IV. ①O41-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 171314 号

责任编辑:胡云志 唐保军/责任校对:朱光兰

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年8月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年8月第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 1—3 000 字数: 350 000

定价: 29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在 1996 年河北师范大学合校之前,原河北师范大学物理系和河北师范学院物理系均采用各自编写的《近代物理实验》讲义,而河北教育学院采用的是 1996 年由邬鸿彦、朱明刚主编的《近代物理实验》(科学出版社)教材。2003 年,自编教材《近代物理实验》由河北科学技术出版社出版后一直为我校物理系本科生的教材,并得到省内部分兄弟院校的学生和教师的认可和好评。2003 年和 2008 年,“近代物理实验”被评为河北省精品课。2008 年,河北师范大学物理实验教学示范中心被评为国家级示范中心建设单位。近年来,随着物理学的发展和实验教学改革的需要,多数省内高校更新和增加了实验仪器设备,有的还将自己的科研成果引入了实验教学,极大地丰富了近代物理实验的教学内容。为了适应这一需要,2009 年 4 月,在河北师范大学召开的河北省师范类物理实验教学示范中心建设研讨会上,省内师范院校(河北师范大学、唐山师范学院、廊坊学院、邯郸学院、保定学院、衡水学院、邢台学院、石家庄学院、河北北方学院、沧州师范专科学校、承德民族师范专科学校)的专家对各校近代物理实验内容进行了调研,确定了新教材的编写内容,即在 2003 年河北科学技术出版社教材《近代物理实验》的基础上,增加新的实验内容,尤其是反映物理学发展前沿的实验内容,并确定由河北师范大学牵头负责此次编写工作。2010 年 1 月,《近代物理实验》教材的编写和出版列入河北师范大学第二批精品教材建设项目。

本书内容包括原子物理、原子核物理、激光和其他光学实验、微波技术、真空技术、电子衍射、磁学和磁共振实验、高温超导、铁电材料、X 射线衍射技术、扫描隧道显微镜等领域的 41 个实验,其中包括“巨磁电阻”等获诺贝尔奖的著名实验。在安排上既让学生接触到真空、低温、微波、衍射等近代物理实验中常用的技术,而且每个实验又有一定的物理内容,使理论与实验有机结合。此次编写的《近代物理实验》教材在突出高等师范院校的特色,力求实验原理简练、物理图像清晰的同时,添加了反映近年来物理学和实验技术发展的相关内容,尤其是对磁性材料、半导体材料、超导材料、铁电材料的制备方法和材料结构及性能表征技术实验进行了介绍。

参加此次编写工作的除河北师范大学近代物理实验室的教师外,邯郸学院的部分教师也编写了相关章节。具体的编写分工如下:第 1 章由刘力虎、赵旭、赵滨华和郭革新编写;第 2 章由严振庄和李壮志编写;第 3 章由庞兆广、唐贵德、甄聪棉、赵旭编写;第 4 章由陈伟、李壮志、赵滨华和邯郸学院薛芳编写;第 5 章由郭革新、唐贵德和邯郸学院赵晶编写;第 6 章由甄聪棉编写;第 7 章由甄聪棉、侯登录、郭革新编写;第 8 章由郭革新、赵旭、侯登录编写;第 9 章由李壮志编写;第 10 章由郭革新、侯登录编写。此外,邯郸学院赵国晴、邢台学院赵双义、廊坊学院蔡秀峰、承德民族师范专科

学校杨淑敏等在编写过程中给予了大力支持.

本书是在原来两本讲义和两本教材的基础上发展而来的,是几十年来几代近代物理实验室的教师和技术人员的集体贡献. 聂向富、欧阳芳丽、郭锡福、孔德谦、陈乃强、马长山、段苗珍等许多年长的教师,以及现已调离的朱明刚、王立锦等多位老师在之前的编写工作中都作出了巨大贡献,在此对他们表示衷心的感谢.

此次教材的实验题目的选取、统稿由侯登录、郭革新主持完成. 感谢各位老师们的辛勤付出,感谢省内兄弟院校多年来使用《近代物理实验》教材和对本次编写工作的支持. 本书的编写也参阅了国内其他高校的教材和讲义,在此表示感谢. 感谢科学出版社给予的大力支持,尤其是胡云志编辑的帮助.

限于编者水平,书中错误和不尽人意之处在所难免,欢迎专家和读者指正.

编 者
2010 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 原子物理实验	1
1.1 氢原子光谱	1
1.2 塞曼效应	8
1.3 弗兰克-赫兹实验	14
1.4 密立根油滴实验	19
第 2 章 核物理实验	25
2.0 核物理实验基础知识	25
2.1 核衰变的统计规律	31
2.2 γ 射线能谱测量	40
第 3 章 激光和光学实验	48
3.1 全息照相	48
3.2 全息干涉计量	53
3.3 彩虹全息	56
3.4 晶体的电光效应及电光调制	60
3.5 普朗克常量的光电效应法测定	68
3.6 光电器件的光谱灵敏度	73
3.7 椭圆法测薄膜厚度和折射率	79
3.8 光拍频法测量光速	86
第 4 章 微波和磁共振实验	92
4.0 微波基础知识	92
4.1 微波分光实验	103
4.2 微波顺磁共振	109
4.3 铁磁共振	116
4.4 核磁共振	120
4.5 脉冲核磁共振	129
4.6 光泵磁共振	136
第 5 章 磁学实验	146
5.0 磁化率及磁性物质的分类	146
5.1 弱磁性物质磁化率的测量	148
5.2 法拉第效应实验	151

5.3	磁畴的静态特性参数测量	156
5.4	法拉第效应法观测磁晶各向异性	163
5.5	庞磁电阻材料电阻率和磁电阻的温度特性测量	168
5.6	溶胶-凝胶法制备粉体材料	176
第6章	半导体实验	180
6.1	半导体霍尔系数与电导率的测量	180
6.2	G-U 法测量 Si-SiO ₂ 界面态和半导体掺杂浓度	187
6.3	用化学气相沉积法制备半导体薄膜	193
第7章	真空镀膜技术	202
7.1	真空的获得与测量	202
7.2	真空镀膜	209
7.3	射频溅射法制备 Si-SiO ₂ 薄膜	214
7.4	磁控溅射法制备磁性多层膜	223
第8章	电子衍射和 X 射线衍射	226
8.1	电子衍射	226
8.2	晶体缺陷的研究	230
8.3	X 射线衍射技术	235
8.4	扫描隧道显微镜	242
第9章	低温物理实验	247
9.1	超导材料的电磁特性	247
9.2	Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O _{8+δ} (Bi2212) 高温超导单晶生长及表征	254
第10章	铁电材料实验	262
10.0	铁电材料基础知识	262
10.1	铁电材料电滞回线的测量	263
10.2	固相反应法制备铁电材料	267

第 1 章 原子物理实验

本章涉及了氢原子光谱、塞曼效应、弗兰克-赫兹实验和密立根油滴实验 4 个经典实验。

1.1 氢原子光谱

在众多的现代物理研究方法中,原子光谱是研究原子结构的一种重要方法.这是由于光谱线系与原子结构有着极为密切的联系.而原子光谱的观测为近代量子理论的建立提供了坚实的实验基础.1885 年,巴耳末通过对前人氢光谱测量结果的总结,从中发现了氢光谱的规律,并由此提出了著名的巴耳末公式.根据巴耳末公式求得的里德伯常量是物理学中常用的几个最精确的常数之一,它是检验原子理论可靠性的重要标准,并成为测量其他基本物理常量的依据.1932 年尤里(H. C. Urey)根据里德伯常量随原子核质量不同而变化的规律,在对重氢莱曼线系进行摄谱分析时,发现了氢的同位素——氘的存在.至今,对原子光谱的观测研究,仍然是研究原子结构的重要方法之一.尤其是近些年来激光和计算机技术的发展,使光谱技术的观测手段呈现出全新的面貌.

WDS-6 型光栅光谱仪用于近代物理实验中的氢(氘)原子光谱实验,简单易行,改变了传统通过在大型摄谱仪上采用感光胶片记录的方法,从而使光谱既可在微机界面上直观显示,实验结果准确明了,同时又减少了不必要的浪费.

1.1.1 实验目的

- (1)熟悉并掌握 WDS-6 型光栅光谱仪的使用.
- (2)拍摄氢原子光谱的巴耳末线系并确定常量 R_H .

1.1.2 实验原理

根据里德伯常量随原子核质量不同而变化的规律,1932 年尤里用蒸发液氢的方法获得重氢含量较高的氢和重氢混合物,在对莱曼线系的光谱分析中,发现氢原子光谱中每条线都是双线.经过波长测量并与重氢核所得到的双线波长相比较,实验值与理论值符合得很好,见表 1.1.1,从而确立了氢的同位素——氘(D)的存在.

根据经典电磁理论,原子外层电子绕核做匀速圆周运动,做加速运动的电子将不断向外辐射电磁波,并且辐射电磁波的频率也是连续的,这与实验上发现的原子光谱是分裂的相矛盾.就此,丹麦物理学家玻尔(Bohr Niels)于 1913 年提出了三点假设.

表 1.1.1 巴耳末线系氢谱波长

氢 谱 线	
谱线位置	波长/nm
H _α	656.28
H _β	486.13
H _γ	434.05
H _δ	410.17
H _ε	397.01
H _ζ	388.91
H _η	383.54
H _θ	379.79
H _i	377.06
H _κ	375.02

(1)定态假设:原子中的电子可以在一些特定的圆轨道上运动而不辐射电磁波,这时原子处于稳定状态,简称定态.与定态相应的能量分别为 $E_1, E_2, \dots$

(2)量子化条件:电子以速度 v 在半径为 r 的圆周上绕核运动时,只有电子的角动量 L 等于 $h/2\pi$ 的整数倍的那些轨道是稳定的.

(3)频率条件:原子(电子)从高能级的定态跃迁到低能量的定态时,要发射光子.

根据玻尔理论我们知道,原子的能量是量子化的,具有分立的能级,当电子从高能级跃

迁到低能级时,原子释放出能量,并以电磁波的形式辐射.氢原子光谱在远红外、可见光区和近紫外区有若干独立的光谱线系,其中可见光区的巴耳末线系各波长都遵循巴耳末公式

$$\bar{\nu} = \frac{2\pi^2 m_e e^4 Z^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c \left(1 + \frac{m_e}{m_H}\right)} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (1.1.1)$$

$$= R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (1.1.2)$$

式中, m_H 为原子核质量, m_e 为电子质量, e 为电子电荷, h 为普朗克常量, ϵ_0 为真空介电常量, c 为光速, Z 为原子序数, R_H 为里德伯常量,因此类氢原子的里德伯常量可写成

$$R_z = \frac{2\pi^2 m_e e^4 Z^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{m_e}{m_z}\right)} \quad (1.1.3)$$

若 $m_z \rightarrow \infty$, 则有

$$R_\infty = \frac{2\pi^2 m_e e^4 Z^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c} \quad (1.1.4)$$

里德伯常量是重要的基本物理常量,目前它的推荐值为

$$R_\infty = 10973731.568549(83)\text{m}^{-1}$$

由式(1.1.4)得

$$R_z = \frac{R_\infty}{\left(1 + \frac{m_e}{m_z}\right)} \quad (1.1.5)$$

由此可以得出, R_z 将会随原子核质量 m_z 发生变化,对于不同的元素或同一元素的不同同位素 R_z 值将会有所不同,但 m_z 对 R_z 影响很小,由于其相应的波数很接近,就形成了原子光谱上较难区分的双线.

令氢和氘的里德伯常量分别为 R_H 和 R_D , 氢、氘光谱的波数遵循里德伯公式

$$\bar{\nu} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n=3,4,5,\dots \quad (1.1.6)$$

$$\bar{\nu} = R_D \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n=3,4,5,\dots \quad (1.1.7)$$

因此,通过实验测量氢、氘的巴耳末线系的谱线波长,可利用式(1.1.6)、式(1.1.7)求出氢、氘的里德伯常量 R_H 和 R_D .

根据式(1.1.5)有

$$R_H = \frac{R_\infty}{\left(1 + \frac{m_e}{m_H}\right)} \quad (1.1.8)$$

$$R_D = \frac{R_\infty}{\left(1 + \frac{m_e}{m_D}\right)} \quad (1.1.9)$$

式中, m_H 和 m_D 为氢和氘原子核质量,用式(1.1.8)除以式(1.1.9),得

$$\frac{m_D}{m_H} = \frac{R_D/R_H}{1 - \frac{m_H}{m_e} \left(\frac{R_D}{R_H} - 1 \right)} \quad (1.1.10)$$

式中, m_H/m_e 为氢的原子核质量与电子质量比,公认值为 1836.15. 因此式(1.1.10)也可写为

$$\frac{m_D}{m_H} = \frac{R_D/R_H}{1 - 1836.15 \left(\frac{R_D}{R_H} - 1 \right)} \quad (1.1.11)$$

对原子光谱的测量,所得到的数据有较多的有效数字,能达到一定的测量精度,因此它成为测定其他一些基本常量的重要引入值,在现代测量中起着重要的作用.

1.1.3 实验仪器装置

WDS 系列多功能光栅光谱仪的操作由计算机操作和手工操作来完成. 单色仪的入射狭缝宽度,出射狭缝宽度和 CCD 接收系统不受计算机控制用手工设置外,其他的各项参数设置和测量均由计算机来完成. WDS 系列多功能光栅光谱仪结构框图如图 1.1.1 所示.

1. 光学系统

光谱仪光学系统如图 1.1.1 所示. 通过旋转 M3 选择出射狭缝 S2 或 S3 从而选择接收器件类型,出射狭缝为 S2 为光电倍增管或硫化铅、钽酸锂、TGS 等接收器件;出射狭缝为 S3 为 CCD 接收器件. 入射狭缝、出射狭缝均为直狭缝,宽度在 0~2mm 连续可调,光源发出的光束进入入射狭缝 S1, S1 位于反射式准光镜 M1 的焦面上,通

过 S1 射入的光束经 M1 反射成平行光束投向平面光栅 G 上,衍射后的平行光束经物镜 M2 成像在 S2 上,或经物镜 M2 和 M3 平面成像在 S3 上.

光源系统为仪器提供工作光源,可选氖灯、钨灯、钠灯、汞灯等各种光源.

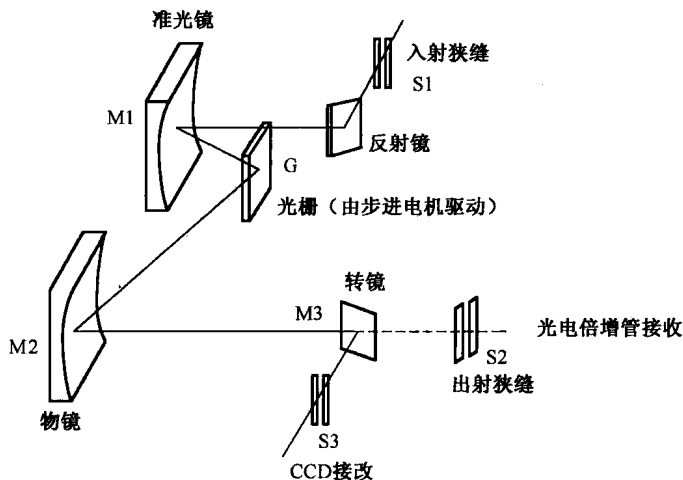


图 1.1.1 WDS 系列多功能光栅光谱仪光学系统透射图

2. 电子系统

电子系统由电源系统、接收系统、信号放大系统、A/D 转换系统和光源系统等部分组成.

电源系统为仪器提供所需的工作电压;接收系统将光信号转换成电信号;信号放大器系统包括前置放大器和放大器两个部分;A/D 转换系统将模拟信号转换成数字信号,以便计算机进行处理.

3. 软件系统

WDS 系列多功能光栅光谱仪的控制和光谱数据处理操作均由计算机来完成.

软件系统主要功能:仪器系统复位、光谱扫描、各种动作控制、测量参数设置、光谱采集、光谱数据文件管理、光谱数据的计算等.

4. CCD 操作系统

WDS 系列多功能光栅光谱仪器系统操作软件根据型号不同和接收仪器不同配有 PMT 操作系统和 CCD 操作系统.每一系统均可采用快捷键和下拉菜单来进行仪器操作,下面分别进行说明.

1) 开机与系统复位

确认光栅光谱仪已经正确连接并打开电源.

在 Windows 操作系统中,从“开始”——“程序”——“WDS 系列光栅光谱仪”中执行相应的 CCD 可执行程序,或双击桌面上的快捷方式,启动系统操作程序.

在系统初始化过程后应有波长复位正确的提示,然后按“确定”进入系统操作主界面。

2) 菜单栏中使用

系统菜单栏中包括文件、采集、数据处理、系统操作和帮助五项内容,下面分别进行介绍。

(1) 文件。文件菜单中包括新建、打开、存盘、测量参数、打印和退出系统等项。其中,新建,即清除当前图谱文件并重新建立一个图谱文件。

打开,即打开已存图谱文件,可根据系统提示选择文件所在路径。

存盘,即保存当前图谱文件,可根据系统提示选择文件保存路径。

测量参数,即根据测量需对系统参数进行相应的设置,通常情况下采取默认值即可。

打印,即根据提示对话框,打印当前图谱。

退出系统,当结束系统测量,选择此项,根据提示退出光栅光谱仪操作系统。

(2) 采集。采集菜单中包括一次采集、连续采集和门值设置等项。

其中,一次采集,即在当前中心波长对当前光谱进行一次性记录。

连续采集,即在当前中心波长对当前光谱进行连续性记录,时时刷新。

门值设置,系统默认门值设置为-1,当要去除较小的峰值时,可通过设置门值来进行限制。

(3) 数据数理。数据处理菜单中包括读取数据、光谱平滑、峰值检索、刻度扩展、显示光谱参数、像元波长转换和谱线运算等项。其中,读取数据,即读取当前图谱的横、纵坐标数据,可选择列表方式或光标读取方式。

光谱平滑,点击此项系统将对当前图谱文件进行平滑处理,以去掉噪声或过小的峰值,来方便图谱的读取或辨别。

峰值检索,指读当前图谱文件中一定范围内的峰值进行检索并将结果显示出来。点击此项弹出对话框,提示输入峰值高度,输入峰值高度后,点击确定即可。

刻度扩展,指对当前横、纵坐标的起始,终止刻度在系统允许的范围内进行相应的放大或缩小。点击此项功能将弹出对话框。

显示光谱参数,即显示当前光谱的测量参数。

像元波长转换,即选择将系统操作界面的横坐标用像元或波长的方式显示。

谱线运算,即对当前光谱的与常数加、减、乘、除四则运算。

(4) 系统操作。系统操作菜单中主要包括检索仪器中心波长、检索谱线中心波长、零点波长校正、系统参数设置和系统复位等项。其中,检索仪器中心波长,即将操作系统界面显示的中心波长检索至目的波长处。

检索谱线中心波长,即若当前显示的图谱文件中心波长非仪器当前中心波长时,用此项功能将仪器中心波长检索值谱线中心波长。

零点波长校正,当对光栅光谱仪器系统检测发现系统波长值与准确波长不对应

时,可通过此项对系统波长进行校正,在对话框中输入系统值与实际波长值的差值,点击确定即可。

系统参数设置,即系统调试时用到的一些数据,用户不可更改。

系统复位,当仪器在运行过程中发现有不正常现象出现时,可点击此项对系统进行重新复位,以消除影响。

3) 工具栏的使用

工具栏中主要包括新建、打开、保存、打印、波长检索、参数设置、读取数据、峰值检索、刻度扩展、放大、缩小和屏幕刷新等项。其中,新建、打开、保存、打印和参数设置等项包含于菜单栏的“文件”菜单中;波长检索包含于菜单栏中的“系统操作”菜单中;读取数据、峰值检索和刻度扩展包含于菜单栏中的“数据处理”菜单中;一次采集和连续采集包含于“采集”菜单中。

屏幕刷新,即刷新当前图谱屏幕显示以清除数据标注的字符。

停止,点击此项,系统将停止当前操作。

4) 退出系统与关机

当系统测试结束后,将入射狭缝调节至 0.1mm 左右,点击菜单栏中“文件\退出系统”,按照提示关闭电源退出仪器操作系统。

1.1.4 实验内容和步骤

1. 实验准备

开机之前,请认真检查光栅光谱仪的各个部分连线是否正确,保证准确无误。

为了保证仪器的性能指标和寿命,在每次使用完毕,将入射狭缝宽度,出射狭缝宽度分别调节到 0.1mm 左右。

在仪器系统复位完毕后,根据测试和实验的要求分别调节入射狭缝宽度,出射狭缝宽度到合适的宽度。

2. 接收单元

WDS-6 型多功能光栅光谱仪配备有 CCD 接收单元。

3. 狭缝调节

仪器的入射狭缝和出射狭缝均为直狭缝,宽度在 0~2mm 连续可调,顺时针旋转为狭缝宽度加大,反之减小。每旋转一周狭缝宽度变化 0.5mm,最大调节宽度为 2mm。为延长使用寿命,狭缝宽度调节时应注意不要超过 2mm。仪器测量完毕或平常不使用时,狭缝最好调节到 0.1~0.5mm。

4. 电控箱的使用

电控箱包括电源、信号放大、控制系统和光源系统(氘灯和钨灯可选件,不包括在光谱仪器的标准配置中)。在运行仪器操作软件前一定要确认所有的连接线正确连接且已经打开电控箱的开关。

5. 采用标准光谱灯进行波长校准

光栅光谱仪由于运输过程中震动等各种原因,可能会使波长准确度产生偏差,因此在第一次使用前用已知的光谱线来校准仪器的波长准确度.在平常使用中,也应定期检查仪器的波长准确度.

检查仪器波长准确度可用氖灯、钠灯、汞灯以及其他已知光谱线的来源来进行.

1) 用氖灯谱线校准

利用氖灯的两根谱线的波长值(标准值为 485.99nm 和 656.10nm)来进行校准仪器.根据能量信号大小手工调节入射狭缝和出射狭缝,扫描氖灯光谱.如果波长有偏差,用“零点波长校正”功能进行校正,见表 1.1.2.

表 1.1.2 氢谱真空波长修正值

氢谱线	α	β	γ	δ	ϵ	ζ	η	θ
$\Delta\lambda_{\text{修正}}/\text{nm}$	0.181	0.136	0.121	0.112	0.110	0.108	0.107	0.106

2) 用钠灯谱线校准

利用钠灯的两根谱线的波长值(标准值为 589.0nm 和 589.6nm)来进行校准仪器.根据能量信号大小手工调节入射狭缝和出射狭缝,扫描钠灯光谱.如果波长有偏差,用“零点波长校正”功能进行校正.

3) 用汞灯谱线校准

利用汞灯的五根谱线的波长值(标准值为 404.7nm、435.8nm、546.1nm、577.0nm、579.0nm)来进行校准仪器.根据能量信号大小手工调节入射狭缝和出射狭缝,扫描汞灯光谱.如果波长有偏差,用“波长线性校正”功能进行校正.

6. 分别扫描不同光源的光谱

调节光源,使其在单色仪的波长范围内有最大的输出.根据测量对系统参数进行相应的设置.

7. 氢原子光谱的巴耳末线系里德伯常数 R_H 的测量

8. R_∞ 的计算

计算普适里德伯常量及 R_∞ ,并与推荐值比较,求相对误差.

1.1.5 注意事项

(1)光谱仪是精密贵重仪器,需倍加爱护,电箱不得擅自打开,狭缝调节需小心,不可用力拧.

(2)氢灯等放电管都用了高压电源,使用时务必注意安全.

(3)仪器断电和先启动软件再给仪器通电,均可能造成波长混乱.此时应关闭软件,在先给仪器通电情况下,对仪器重新初始化.

(4)实验中应采取防噪声和干扰的措施.例如,实验室尽量暗一些,防止实验桌的震动,狭缝勿开太大,对供电电源进行稳压等.

参考文献

沙振舜, 黄润生. 2002. 新编近代物理实验. 南京: 南京大学出版社.

褚圣麟. 2000. 原子物理学. 北京: 高等教育出版社

(刘力虎 编)

1.2 塞曼效应

1896年, 荷兰物理学家塞曼(Zeeman)发现当光源放在足够强的磁场中时, 原来的光源发出的每一条谱线均分裂成几条偏振的谱线, 分裂的条数随能级的类别而不同. 后人称此现象为塞曼效应.

塞曼效应的发现, 为直接证明空间量子化提供了实验依据, 对推动量子理论的发展起了重要作用. 直到今日, 塞曼效应仍是研究原子能级结构的重要方法之一.

1.2.1 实验目的

- (1) 掌握和观测塞曼效应的理论和实验方法.
- (2) 掌握法布里-珀罗标准具的原理和使用方法.
- (3) 观察汞原子 546.1nm 谱线的分裂及偏振现象, 由塞曼裂距计算电子的荷质比.

1.2.2 实验原理

1. 原子的总磁矩与总角动量的关系

原子中的电子一方面绕核做轨道运动(用轨道角动量 P_L 表征)产生轨道磁矩 μ_L , 另一方面还具有自旋运动(用自旋角动量 P_S 表征)产生自旋磁矩 μ_S , 它们在数值上有下列关系:

$$\begin{aligned}\mu_L &= \frac{e}{2mc} P_L, & P_L &= \sqrt{L(L+1)} \hbar \\ \mu_S &= \frac{e}{mc} P_S, & P_S &= \sqrt{S(S+1)} \hbar\end{aligned}\quad (1.2.1)$$

式中, e, m 分别表示电子电荷和电子质量; L, S 分别表示轨道量子数和自旋量子数. P_L 与 P_S 合成总角动量 P_J 并分别绕 P_J 旋进, μ_L 与 μ_S 合成原子的总磁矩 μ , μ 在延长线上的分量 μ_J 才是一个定向恒量. 可以得到 μ_J 与 P_J 数值上的关系为

$$\mu_J = g \frac{e}{2m} P_J \quad (1.2.2)$$

式中, g 为朗德(Lande)因子, 它表征原子的总磁矩与总角动量的关系, 而且决定了能级在磁场中分裂的大小. 在 LS 耦合的情形下, 它与 L, S 和 J 的关系为

$$g = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} \quad (1.2.3)$$

2. 外磁场对原子能级的作用

原子的总磁矩在外磁场中受到力矩 L 的作用

$$L = \mu_J \times B$$

式中, B 表示磁感应强度, 力矩 L 使角动量 P_J 绕磁场方向做进动, 进动引起附加的能量 ΔE 为

$$\Delta E = -\mu_J B \cos \alpha$$

将式(1.2.2)代入上式得

$$\Delta E = g \frac{e}{2m} P_J B \cos \beta \quad (1.2.4)$$

由于 μ_J 和 P_J 在磁场中取向是量子化的, 也就是 P_J 在磁场方向的分量是量子化的. P_J 的分量只能是 $\hbar$ 的整数倍, 即

$$P_J \cos \beta = M\hbar, \quad M = J, (J-1), \dots, -J \quad (1.2.5)$$

磁量子数 M 共有 $2J+1$ 个值,

$$\Delta E = M g \frac{e\hbar}{2m} B \quad (1.2.6)$$

这样, 无外磁场时的一个能级, 在外磁场的作用下分裂成 $2J+1$ 个子能级, 每个能级附加的能量由式(1.2.6)决定, 它正比于外磁场 B 和朗德因子 g .

3. 塞曼能级跃迁的选择定则

设未加磁场时跃迁前后的能级为 E_2 和 E_1 , 则谱线的频率 ν 满足下式:

$$\nu = \frac{1}{h} (E_2 - E_1)$$

在磁场中上下能级分别分裂为 $2J_2+1$ 和 $2J_1+1$ 个子能级, 附加的能量分别为 ΔE_2 和 ΔE_1 , 新的谱线频率 ν' 取决于

$$\nu' = \frac{1}{h} (E_2 + \Delta E_2) - \frac{1}{h} (E_1 + \Delta E_1) \quad (1.2.7)$$

分裂谱线的频率差为

$$\Delta\nu = \nu' - \nu = \frac{1}{h} (\Delta E_2 - \Delta E_1) = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi m} B \quad (1.2.8)$$

用波数来表示:

$$\Delta\tilde{\nu} = \frac{\Delta\nu}{c} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi m c} B \quad (1.2.9)$$

令 $L = \frac{eB}{4\pi m c}$, 称为洛伦兹单位, 将有关参数代入得

$$L = \frac{eB}{4\pi m c} = 0.467 B$$

式中, B 的单位用 T(特斯拉), 波数 $\tilde{\nu}$ 的单位为 cm^{-1} .

但是并非任何两个能级间的跃迁都是可能的,跃迁必须满足选择定则: $\Delta M=0, \pm 1$. 当 $J_2=J_1$ 时, $M_2=0 \rightarrow M_1=0$ 禁戒.

在微观领域中,光的偏振情况与角动量相关联,在跃迁过程中原子与光子组成的系统除能量守恒外还必须满足角动量守恒.

(1) 当 $\Delta M=0$, 原子跃迁时在磁场方向角动量不变. 因此, π 光是沿磁场方向振动的线偏振光. 垂直于磁场方向观察时, 能观察到称为 π 成分的线偏振光; 平行于磁场方向观察时, π 成分不出现.

(2) 当 $\Delta M=\pm 1$, 原子跃迁时在磁场方向角动量减少一个 $\hbar$, 则光子获得在磁场方向的一个角动量 $\hbar$. 因此, 垂直于磁场观察时, 能观察到振动方向垂直于磁场的线偏振光, 称作 σ 线. 平行于磁场方向观察时, 能观察到圆偏振光, 偏振转向是沿磁场方向前进的螺旋转动方向, 磁场指向观察者时, 为左旋圆偏振光, 记作 σ^+ . 反之, $\Delta M=-1$, 偏振转向是沿磁场方向倒退的螺旋转动方向, 磁场指向观察者时, 为右旋圆偏振光, 记作 σ^- .

若原子磁矩完全由轨道磁矩贡献, 即 $S_1=S_2=0, g_1=g_2=1$, 得到正常塞曼效应, 波数差为

$$\Delta\tilde{\nu} = \frac{eB}{4\pi mc} = 4.67 \times 10^{-5} \text{ Bcm}^{-1}$$

通常两种磁矩同时存在, 即 $S_1=S_2 \neq 0, g_1$ 和 g_2 均不为 1, 人们称这类现象为反常塞曼效应, 其波数差如式(1.2.9)所示.

4. 汞 546.1nm 光谱线的塞曼效应

本实验所观察的汞的 546.1nm 绿线, 由能级 7^3S_1 到 6^3P_2 之间跃迁产生的. 与这两能级及其塞曼分裂能级对应的量子数和 g, M, M_g 值, 见表 1.2.1.

表 1.2.1 汞 546.1nm 谱线的塞曼分裂能级对应的量子数和 g, M, M_g 值

	L	S	J	g	M	M_g
初态 7^3S_1	0	1	1	2	1, 0, -1	2, 0, -2
末态 6^3P_2	1	1	2	$\frac{3}{2}$	2, 1, 0, -1, -2	$3, \frac{3}{2}, 0, -\frac{3}{2}, -3$

在外磁场的作用下, 能级间的跃迁如图 1.2.1 所示.

由图 1.2.1 可见, 在与磁场垂直方向可观察到 9 条塞曼分裂谱线, 而沿磁场方向只能观察到 6 条谱线. 由计算可知, 相邻谱线的间距为 $1/2$ 个洛伦兹单位.

5. 法布里-珀罗标准具

假定外磁场强度为 $B=1\text{T}$, 则正常塞曼分裂的波数差为 $4.67 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$. 要分辨如此小波长差的谱线, 必须用高分辨本领的光谱仪器, 在本实验中我们使用法布里-珀罗标准具(以下简称 F-P 标准具). 如图 1.2.2 所示, F-P 标准具是由具有固定间隔 d 的两块平行平面玻璃和夹在中间的一个间隔圈组成. 内表面上镀有高反射膜