



普通高等院校“十三五”规划实验教材

# 近代物理实验教程

● 主 编 王 筠

● 副主编 童爱红 祁红艳 冯国强 李 杰



普通高等院校“十三五”规划实验教材

# 近代物理实验教程

主 编 王 筠

副主编 童爱红 祁红艳

冯国强 李 杰

参 编 吉紫娟 郑秋莎 李志浩

审稿人 戴 伟

华中科技大学出版社

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书内容涉及原子和原子核物理、光电技术、光学和光纤通信技术,以及材料物理等4个单元共27个实验项目,在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

本书可作为理工科大学近代物理实验教材,也可供实验技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验教程/王筠主编. —武汉:华中科技大学出版社,2018.12

普通高等院校“十三五”规划实验教材

ISBN 978-7-5680-4824-8

I. ①近… II. ①王… 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(2018)第 281110 号

### 近代物理实验教程

Jindai Wuli Shiyān Jiāochéng

王 筠 主 编

策划编辑:汪 富

责任编辑:程 青

封面设计:刘 卉

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:8.25

字 数:203千字

版 次:2018年12月第1版第1次印刷

定 价:32.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 普通高等院校“十三五”规划实验教材

## 编审委员会

(排名不分先后)

主任	肖明				
副主任	戴伟	罗毅	王筠	吴建兵	
	肖飞	姚桂玲			
委员	谭华	罗海峰	王怀兴	李莎	
	肖旻	伍家梅	李杰	肖龙胜	
	胡森	胡凡建	陶表达		

## 编写委员会

(排名不分先后)

范锡龙	刘明	邓永菊	皮春梅	王世芳	操小凤
来小禹	陈国英	谈伟伟	李志浩	冯国强	郑秋莎
刘勇	刘丹	童爱红	吉紫娟	艾敏	王苗
刘姜涛	徐辉	李丹	肖正安	王娅	龙芸
王骐	王青萍	肖鹏程	罗春娅	刘金波	黄靓
陈木青	汪川惠	靳海芹	祁红艳	李睿	陈欣琦
陶军辉	王志民	王秋珍	孙筠	张庆	谭永丽
熊伟	徐小俊	林柏林	彭玉成	曹秀英	李建明

## 前 言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础。物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理实验课是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养科学实验能力、提高科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

当今世界高新技术层出不穷,本书内容涉及原子和原子核物理、光电技术、光学和光纤通信技术,以及材料物理等4个单元共27个实验项目。

本书总结了湖北第二师范学院从事近代物理实验教学教师多年来的实验教学经验及教学改革的成果,是在相互取长补短的基础上集体创作而成的。参加编写的人员有湖北第二师范学院的祁红艳、冯国强、李杰、吉紫娟、郑秋莎、李志浩和王筠等。全书由王筠统稿、定稿,戴伟审校。

由于编者水平有限以及时间紧迫,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2018年9月

# 目 录

第 1 章 原子与原子核物理实验 .....	(1)
实验 1-1 OMA 研究氢氘原子光谱 .....	(1)
实验 1-2 密立根油滴实验 .....	(5)
实验 1-3 塞曼效应实验 .....	(8)
实验 1-4 夫兰克-赫兹实验 .....	(16)
实验 1-5 电子衍射实验 .....	(20)
实验 1-6 核磁共振 .....	(28)
实验 1-7 光电效应和普朗克常量测定 .....	(37)
实验 1-8 真空的获得与测量 .....	(45)
第 2 章 光电技术基础实验 .....	(48)
实验 2-1 光敏电阻特性测量实验 .....	(48)
实验 2-2 光电二极管特性测试实验 .....	(54)
实验 2-3 光电三极管特性测试实验 .....	(58)
实验 2-4 硅光电池特性测试实验 .....	(61)
第 3 章 光学与光纤通信技术实验 .....	(71)
实验 3-1 光拍法测光速 .....	(71)
实验 3-2 白光再现全息照相 .....	(77)
实验 3-3 阿贝成像原理与空间滤波 .....	(80)
实验 3-4 $\theta$ 调制 .....	(85)
实验 3-5 傅里叶变换测光源的发射光谱 .....	(89)
实验 3-6 氦氖激光器谐振腔调整及纵横模观测 .....	(91)
实验 3-7 激光的束腰半径大小测量 .....	(96)
实验 3-8 固体激光器参数测量 .....	(98)
实验 3-9 电话语音信号光纤传输系统 .....	(101)
实验 3-10 图像光纤传输系统 .....	(104)
实验 3-11 电光调制 .....	(106)
第 4 章 材料物理实验 .....	(113)
实验 4-1 紫外-可见光光谱原理与表征 .....	(113)
实验 4-2 荧光光谱的原理及其表征 .....	(114)
实验 4-3 高效液相色谱的原理和对富勒烯材料的分离 .....	(116)
实验 4-4 X 射线衍射实验 .....	(118)
参考文献 .....	(122)

# 第 1 章 原子与原子核物理实验

本章共有 8 个实验项目,包括 OMA 研究氢氘原子光谱、密立根油滴实验、塞曼效应实验、夫兰克-赫兹实验、电子衍射实验、核磁共振、光电效应和普朗克常量测定及真空的获得与测量。

## 实验 1-1 OMA 研究氢氘原子光谱

光谱线系的规律与原子结构有内在的联系,因此,原子光谱是研究原子结构的一种重要方法。1885 年,巴尔末总结了人们对氢光谱的测量结果,发现了氢光谱的规律,提出了著名的巴尔末公式。氢光谱规律的发现为玻尔理论的建立提供了坚实的实验基础。1932 年,尤里根据里德伯常量随原子核质量不同而变化的规律,对重氢莱曼线系进行摄谱分析,发现氢的同位素——氘的存在。通过巴尔末公式求得的里德伯常量是物理学中少数几个最精确的常数之一,成为检验原理可靠性的标准和测量其他基本物理常数的依据。

### 【实验目的】

- (1) 熟悉光栅光谱仪的性能与用法。
- (2) 用光栅光谱仪测量氢(氘)原子光谱巴尔末线系的波长,求里德伯常量。

### 【实验仪器】

光学多通道分析仪、原子定标灯(氮灯、氖灯、汞灯)、氢氘灯、WGD-8A 型光栅光谱仪(原理详见附 1)。

### 【实验原理】

原子光谱是线光谱,光谱排列的规律不同,反映出原子结构的不同,研究原子结构的基本方法之一是进行光谱分析。

氢(氘)原子光谱是最简单、最典型的原子光谱。瑞士物理学家巴尔末根据实验结果给出氢原子光谱在可见光区域的经验公式为

$$\lambda_{\text{H}} = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (1-1-1)$$

式中: $\lambda_{\text{H}}$  为氢原子谱线在真空中的波长, $B=364.56 \text{ nm}$ , $n=3,4,5,\dots$ 。

根据式(1-1-1)可计算出  $\text{H}_\alpha$ 、 $\text{H}_\beta$ 、 $\text{H}_\gamma$ 、 $\text{H}_\delta$  各谱线波长。式(1-1-1)是巴尔末根据实验结

果首先总结出来的,故称为巴尔末公式。

若用波数  $\bar{\nu}=1/\lambda$  表示谱线,则式(1-1-1)可改写为

$$\bar{\nu} = \frac{1}{B} \left( \frac{n^2 - 4}{n^2} \right) = \frac{4}{B} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-1-2)$$

式中:  $R_H$  为里德伯常量。

根据玻尔理论,可得出氢和类氢原子的里德伯常量为

$$R_Z = \frac{2\pi^2 \mu e^4 Z^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c} = \frac{2\pi^2 e^4 Z^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c} \cdot \frac{m}{1 + \frac{m}{M}} = \frac{R_\infty}{1 + \frac{m}{M}} \quad (1-1-3)$$

式中:  $M$  为原子核质量;  $m$  为电子质量;  $e$  为电子电荷;  $c$  为光速;  $h$  为普朗克常量;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $Z$  为原子序数。

当  $M \rightarrow \infty$  时,可得里德伯常量为

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

里德伯常量  $R_\infty$  是重要的基本物理常量之一,对它的精密测量在科学上有重要意义,它的公认值为  $R_\infty = 10\,973\,731.568\,549\, \text{m}^{-1}$ 。

对于没有测定的某些元素,其里德伯常量为

$$R_Z = \frac{R_\infty}{1 + m/M}$$

氢和氘的里德伯常量为

$$R_H = \frac{R_\infty}{1 + m/M_H} \quad (1-1-4)$$

$$R_D = \frac{R_\infty}{1 + m/M_D} \quad (1-1-5)$$

可见,氢和氘的里德伯常量是有差别的,其结果就是氘的谱线相对于氢的谱线会有微小的位移,叫同位素位移。 $\lambda_H$  和  $\lambda_D$  是能够直接精确测量的量,测出它们,也就可以计算出氢和氘的里德伯常量。由式(1-1-4)、式(1-1-5)可解出

$$\frac{M_D}{M_H} = \frac{R_D/R_H}{1 - (R_D/R_H - 1)M_H/m_e} \quad (1-1-6)$$

式中:  $M_H/m_e$  为氢原子核质量与电子质量之比(取值为 1836),如果通过实验测出  $R_D/R_H$ , 则可算出氢与氘原子核质量比。

由于氢与氘的光谱有相同的规律性,故氢和氘的巴尔末公式的形式相同,分别为

$$\frac{1}{\lambda_H} = \bar{\nu}_H = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-1-7)$$

$$\frac{1}{\lambda_D} = \bar{\nu}_D = R_D \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-1-8)$$

式中:  $\lambda_D$  为氘的各谱线波长。实验中只要测得各谱线的  $\lambda_H$  或  $\lambda_D$ , 并辨认出与各谱线对应的  $n$ , 即可算出  $R_H$  与  $R_D$ 。

## 【实验内容及步骤】

(1) 熟悉仪器的各部分结构,掌握仪器的工作原理。



(2)先打开光栅光谱仪电源开关,然后进入计算机应用软件系统,熟悉软件的应用。

(3)分别确定巴尔末系的  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$ 、 $H_\gamma$ 、 $H_\delta$  四条谱线的波长范围,进行单程扫描,经寻峰后,根据氢光谱的理论值对已得的峰值进行数据修正,记下各波长范围内的  $\lambda_H$  和  $\lambda_D$ ,汞灯标准线如图 1-1-1 所示。

(4)把测量数据代入式(1-1-7)、(1-1-8)中,计算出相应的里德伯常量  $R_H$  和  $R_D$ ,把  $R_H$  的平均值与  $R_D$  的平均值代入式(1-1-6),计算出氘与氢原子核质量比  $M_D/M_H$ 。

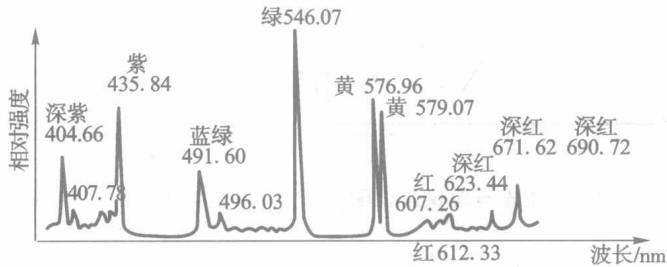


图 1-1-1 汞灯标准线

## 【实验数据及结果】

根据记录的谱线的波长,计算相应的里德伯常量,并计算氘与氢原子核质量比,写出详细计算过程。

## 【思考题】

- (1)在同一  $n$  值下氢氘谱线的波长  $\lambda_H$  与  $\lambda_D$ ,哪一个大一点?为什么?
- (2)对于不同的原子,是什么原因使里德伯常量发生了变化?

## 附 1: WGD-8A 型光栅光谱仪原理

### 【实验原理】

WGD-8A 型组合式多功能光栅光谱仪由光栅单色仪、接收单元、扫描系统、电子放大器、A/D 采集单元、计算机组成,光学原理如图 1-1-2 所示。

入射狭缝、出射狭缝均为直狭缝,宽度范围为  $0 \sim 2$  mm 连续可调(顺时针狭缝变宽,逆时针狭缝变小),光源发出的光束进入狭缝  $S_1$ ,  $S_1$  位于反射式准光镜  $M_2$  焦面上,通过  $S_1$  射入的光束经  $M_2$  反射成平行光束投向平面光栅  $G$ (2400 条/mm, 波长范围  $200 \sim 660$  nm)上,衍射后的平行光束经  $M_3$  在  $S_2$ (光电倍增管接收)或  $S_3$ (CCD 接收)上成像。

在光栅光谱仪中常使用反射式闪耀光栅,如图 1-1-3 所示,锯齿形是光栅刻痕形状。现考虑相邻刻槽的相应点上反射的光线。 $PQ$  和  $P'Q'$  是以  $\theta$  角入射的光线, $QR$  和  $Q'R'$  是以  $\theta'$  角衍射的两条光线。 $PQR$  和  $P'Q'R'$  两条光线之间的光程差是  $b(\sin\theta + \sin\theta')$ ,其中  $b$  是相

邻刻槽间的距离,称为光栅常数。当光程差满足光栅方程(1-1-9)时,光强有一极大值,或者说将出现一条亮的光谱线。

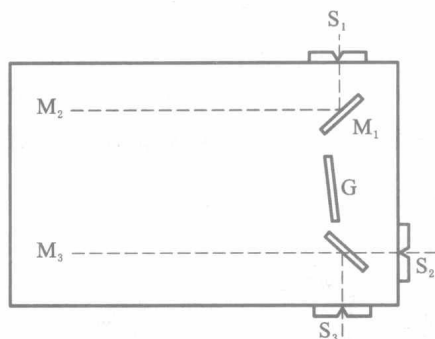


图 1-1-2 光栅光谱仪原理图

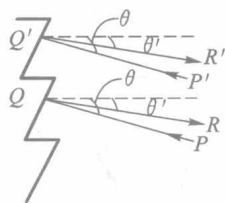


图 1-1-3 闪耀光栅示意图

$$b(\sin\theta + \sin\theta') = k\lambda, \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-1-9)$$

对同一  $k$ , 根据  $\theta, \theta'$  可以确定衍射光的波长  $\lambda$ , 这就是光栅测量光谱的原理。闪耀光栅将同一波长的衍射光集中到某一特定的级  $k$  上。

为了对光谱进行扫描, 将光栅安装在转盘上, 转盘由电机驱动, 转动转盘, 可以改变入射角  $\theta$ , 改变波长范围, 实现较大波长范围内的扫描。软件的初始化工作, 就是改变  $\theta$  的大小, 改变测试波长范围。

## 【实验内容及步骤】

### 1. 准备

(1) 将转换开关(机箱后板)置“光电倍增管”挡(本实验用光电倍增管接收), 接通电箱电源, 将电压调至 400~500 V。根据光源等实际情况, 调节  $S_1, S_2, S_3$  狭缝宽度。为保护狭缝, 其宽度最大不能超过 2.5 mm, 也不要使狭缝刀口相接触。调节时动作要轻。

(2) 打开计算机, 点击 WGD-8A 型组合式多功能光栅光谱仪控制处理软件, 选择“光电倍增管”。

(3) 初始化。屏幕显示工作界面, 弹出对话框, 用户确认当前的波长位置是否有效, 是否初始化。如果选择“确定”, 则确认当前的波长位置, 不再初始化; 如果选择“取消”, 则初始化, 波长位置回到 200 nm 处。

(4) 熟悉软件界面。工作界面主要由菜单栏、主工具栏、辅工具栏、工作区、状态栏、参数设置区以及寄存器信息提示区等组成。菜单栏中有“文件”、“信息/视图”、“工作”、“读取数字”、“数据图形处理”、“关于”等菜单项, 与一般的 Windows 应用程序类似。

### 2. 参数设置

(1) 工作方式。模式: 所采集的数据格式, 有能量、透过率、吸光度、基线。测光谱时选择能量。间隔: 两个数据点间的最小波长间隔, 根据需要在 0.01~1.00 nm 之间选择。

(2) 工作范围。在起始、终止波长(200~660 nm)和最大、最小值 4 个编辑框中输入相应的值, 确定扫描时的范围。

(3)负高压。设置提供给光电倍增管的负高压大小,设1~8共8挡。增益:设置放大器的放大率,设1~8挡。

(4)采集次数。在每个数据点,采集数据区平均的次数。拖动滑块,可在1~1000次之间改变。

在参数设置区中,选择“数据”项,在“寄存器”下拉列表框中选择某一寄存器,在数据框中显示该寄存器的数据。参数设置区中,“系统”、“高级”两个选项一般不用改动。

### 3. 波长定标

(1)取下氙灯,把汞灯置于狭缝 $S_1$ 前,使光均匀照亮狭缝。

(2)在软件界面中用鼠标点击“新建”,再点击“单程”进行扫描,工作区内显示汞灯谱线图。

(3)下拉菜单选择“读取数据”→“寻峰”→“自动寻峰”,在对话框中选择好寄存器,进行寻峰,读出波长,与汞灯已知谱线(见图1-1-1)波长进行比较。

(4)下拉菜单选择“工作”→“检索”,在对话框中输入需校准的波长值,当提示框自动消失时,波长被校准。

### 4. 氢(氘)原子光谱的测量

(1)将光源换成氢(氘)灯,测量氢(氘)光谱的谱线。注意:换灯前,先关闭原来的光源,选择待测光源,再开启光源。

(2)进行单程扫描,获得氢(氘)光谱的谱线,通过“寻峰”求出巴尔末线系3~4条谱线的波长。

在单程扫描过程中发现峰值超过最大值,可点击“停止”。然后寻找最高峰对应的波长,进行定波长扫描,同时调节狭缝,将峰值调到合适位置。再将波长范围设置成200~660 nm,再单程扫描。扫描完毕,保存文件。

## 实验 1-2 密立根油滴实验

### 【实验目的】

- (1)学习密立根油滴实验设计的物理构思。
- (2)验证电量的量子性。
- (3)测定电量的最小单位。

### 【实验仪器】

密立根油滴仪、喷嘴。

## 【实验原理】

密立根油滴实验测定电子电荷的基本设计思想是使带电油滴在测量范围内处于受力平衡的状态,这种测电子电荷的方法称为油滴法。按油滴做匀速运动或静止两种运动方式分类,油滴法测电子电荷分动态测量法和平衡测量法。

### 1. 动态法测量

#### 1) 带电油滴在重力场中的运动

油滴进入电场为零的电容器中,受重力和空气浮力的作用,其合成力用  $F$  表示。在  $F$  作用下,油滴向下加速运动,同时受空气黏滞阻力作用,空气阻力用  $f$  表示。

$$F = \frac{4\pi}{3} r^3 (\sigma - \rho) g$$

$$f = 6\pi\eta r v$$

式中:  $\sigma$  和  $\rho$  分别为油滴和空气的密度;  $r$  为油滴半径平均值;  $\eta$  为空气黏滞系数。

当速度增大到某一数值  $v_g$  时,  $F$  和  $f$  相等,油滴在重力场中以速度  $v_g$  匀速下降,即

$$\frac{4\pi}{3} r^3 (\sigma - \rho) g = 6\pi\eta r v_g$$

$$\text{则 } v_g = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\sigma - \rho) g}{\eta} \quad \text{或} \quad r = \left[ \frac{9\eta v_g}{2(\sigma - \rho) g} \right]^{1/2}$$

注意,以上推导要求油滴半径应远大于空气分子的平均自由程(标准状态下约为  $10^{-7}$  m),即油滴半径应为  $10^{-5}$  m,如果  $r$  约为  $10^{-6}$  m,需要对  $\eta$  进行一级修正,即将  $\eta$  乘以修正因子  $1/\left(1 + \frac{b}{pr}\right)$ ,这时实验测得的  $r$  修正为

$$r' = \left[ \frac{9\eta v_g}{2(\sigma - \rho) g \left(1 + \frac{b}{pr}\right)} \right]^{1/2}$$

式中:  $p$  为大气压,以 mmHg 为单位;常数  $b = 6.25 \times 10^{-6}$  m · mmHg (1 mmHg = 133 Pa)。

#### 2) 带电油滴在电场和重力场中的运动

对电容器施加使带电油滴向上运动的电场后,油滴将受到电场力  $qE$ 、 $F$  和  $f$  的作用,当上升速度达到  $v_e$  时,上述三力的合力为零,即  $qE + F + f = 0$ ,油滴将以速度  $v_e$  向上做匀速运动, $v_e$  与  $q$  的关系为

$$qE = \frac{4\pi}{3} r^3 (\sigma - \rho) g + 6\pi\eta r' v_e$$

式中:  $E = U/d$ ,  $U$  为平板间电压。利用上面求得的  $r$  和  $r'$  的表达式及测量得到的  $v_e$  和  $v_g$ ,可计算油滴所带电量:

$$q = \frac{kd}{U} \left[ \frac{v_g^{3/2}}{\left(1 + \frac{b}{pr}\right)^{3/2}} + \frac{v_e v_g^{1/2}}{\left(1 + \frac{b}{pr}\right)^{1/2}} \right]$$

式中:

$$k = 9\pi\eta^{3/2} \sqrt{\frac{2}{(\sigma - \rho)g}}$$

## 2. 平衡法测量

对选择的带电油滴施加向上的电场力,调节电容器平板间电压  $U$  使油滴受到的静电力与重力及浮力相平衡,油滴静止于电容器空间的任意位置,即

$$qE = \frac{4\pi}{3}r^3(\sigma - \rho)g$$

式中的  $r$  要用动态法来测量,一般来说,要用  $r'$  来代替  $r$ 。由此得到

$$q = \frac{kd}{U} \left[ \frac{v_g}{1 + \frac{b}{\rho r}} \right]^{3/2}$$

在本实验中采取的是平衡测量法。

## 【实验内容及步骤】

### 1. 调整仪器

- (1) 熟悉所用仪器的使用方法。
- (2) 用水准仪调节平行板电容器呈水平状态。
- (3) 调节照明光的亮度适中,并调节灯座使光经导光玻璃杆集中照射油滴,使其落入孔 C 的正下方。
- (4) 使用长焦距显微镜聚焦。

### 2. 实验操作练习

- (1) 观察油滴,根据油滴上升的快慢和亮度判断油滴的大小。
- (2) 控制油滴:施加电压控制中等大小的油滴使其反向运动,待它靠近上极板时,将开关 K 置于零位,油滴折回,沿原方向运动,如此反复,直到自如地控制油滴在视场中上下往复运动为止。
- (3) 选择油滴:按实验经验,上升或下降运动为每 5 s 左右走 1 格的油滴为大小适中的带电油滴(一般直径在 1 mm 左右),调节平衡电压使油滴平衡(平衡电压一般在 50~450 V 之间)。选择好适合的油滴后,反复改变平行板之间的电场,尽量排除视场中的其他油滴,以只保留 1~2 个待测油滴为佳。

(4) 测量练习:取显微镜目镜视场分划板中间四格作为测试距离  $s$ ,在上、下各取一格作为油滴反向及油滴加速行程之用。观测者一手控制变换开关,另一手控制计时开关,适当调节电压值,使油滴在静电场中上升四格的时间  $t_g$  为 10~30 s,在重力场中的运动时间以  $t_e$  表示,则  $v_g = s/t_g$ ,  $v_e = s/t_e$ 。

### 3. 实验测量及数据处理

(1) 对选定的油滴测量 5 组  $t_g$  值,记下所加电压  $U$ ,一共应选择 6 个不同的油滴。实验结果记入表 1-2-1。

表 1-2-1 实验 1-2 数据记录表

电荷 序号	平衡 电压	下降时间					电荷 $q/C$	电子数 $n$	$e/C$	相对误差
		$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$				
1										
2										
3										
4										
5										
6										

(2) 剔除 5 个  $t_g$  中偏差大于  $3\sigma$  的数据, 由剩下的  $t_g$  值分别求平均值  $\bar{t}_g$ , 求出  $\bar{v}_g$ 。

(3) 将所给参数和测量值代入有关公式, 计算各油滴所带电荷  $q_i$ 。

(4) 用差值法求电子电量: 将测量的几个  $q_i$  值两两相减, 可得到一系列的  $\Delta q_i$  值, 取其中最小值,  $n_i = \Delta q_i / (\Delta q_i)_{\min}$ , 并将比值按四舍五入原则取整, 最后按公式  $e = \sum \Delta q_i / \sum \Delta n_i$  计算电子电量  $e$ , 并分析其结果。

### 【实验数据及结果】

(1) 列表给出所选取油滴的测量值  $t_g$ 。

(2) 按上述数据处理方法对测量值进行数据处理, 得到电子电量的测量值。

(3) 分析电子电量测量结果的误差来源。

### 【思考题】

(1) 为什么必须使油滴做匀速运动或静止? 实验室中如何保证油滴在测量范围内做匀速运动?

(2) 怎样区别油滴上电荷的改变和测量时间的误差?

(3) 如何确保电场力与重力方向不一致? 如果方向一致对实验有何影响?

(4) 油滴分子过大有什么影响? 过小有什么影响?

## 实验 1-3 塞曼效应实验

塞曼效应实验是近代物理中的一个重要实验, 它证实了原子具有磁矩, 并证实了空间量子化现象, 可由实验结果确定有关原子能级的几个量子数如  $M$ 、 $J$  和  $g$  因数的值。塞曼效应有力地支持了电子自旋理论, 使我们对物质的光谱、原子和分子的结构有了更多的了解。至今塞曼效应仍是研究能级结构的重要方法之一。

## 【实验目的】

- (1) 掌握塞曼效应理论, 确定能级的量子数与朗德因数, 绘出跃迁的能级图。
- (2) 掌握法布里-珀罗(F-P)标准具的原理及使用。
- (3) 熟练掌握光路的调节方法。
- (4) 了解 CCD 器件对干涉图样的采集原理。
- (5) 会利用计算机处理采集的实验数据。

## 【实验仪器】

JWC-III型微机塞曼效应实验仪。

## 【实验原理】

### 1. 塞曼效应

当发光的光源置于足够强的外磁场中时, 由于磁场的作用, 每条光谱线分裂成波长很接近的几条偏振化的谱线, 分裂的条数随能级的类别而不同, 这种现象称为塞曼效应。正常塞曼效应谱线为三条, 而且两边的两条谱线与中间谱线的裂距正好等于  $eB/4\pi mc$ , 这可用经典理论予以很好的解释。但实际上, 大多数谱线分裂的条数多于三条, 谱线的裂距是  $eB/4\pi mc$  的简单分数倍, 称反常塞曼效应, 它不能用经典理论解释, 只有用量子理论才能得到满意的解释。

#### 1) 原子的总磁矩与总动量矩的关系

塞曼效应的产生是原子的总磁矩(轨道磁矩和自旋磁矩)受外磁场作用的结果。在忽略核磁矩的情况下, 原子中电子的轨道磁矩  $\mu_L$  和自旋磁矩  $\mu_S$  合成原子的总磁矩  $\mu$ , 电子的轨道角动量  $P_L$ 、自旋角动量  $P_S$  合成总角动量  $P_J$ , 它们之间的关系可用矢量图 1-3-1 来表示。

$$\mu_L = -\frac{e}{2m}P_L \quad (1-3-1)$$

$$\mu_S = \frac{e}{2m}P_S \quad (1-3-2)$$

式中:  $P_L = \frac{h}{2\pi}\sqrt{L(L+1)}$ ,  $P_S = \frac{h}{2\pi}\sqrt{S(S+1)}$ , 其中,  $L$ 、 $S$  分别表示轨道量子数和自旋量子数;  $e$ 、 $m$  分别为电子的电荷和质量。

轨道朗德因数与自旋朗德因数不同, 导致  $\mu_L$  和  $P_L$  的比值不同于  $\mu_S$  和  $P_S$  的比值, 故原子的总磁矩  $\mu$  不在总角动量  $P_J$  的延长线上。  $\mu$  绕  $P_J$  的延长线旋进,  $\mu$  在  $P_J$  方向上的分量  $\mu_J$  对外的平均效果不为零。在进行矢量叠加运算后, 得到有效磁矩  $\mu_J$  为

$$\mu_J = g \frac{e}{2m}P_J \quad (1-3-3)$$

式中:  $g$  为朗德因数, 对于  $LS$  耦合情况,

$$g = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} \quad (1-3-4)$$

如果知道原子态的性质,它的磁矩就可以通过式(1-3-3)、式(1-3-4)计算出来。

2) 在外磁场作用下原子能级的分裂

当原子置于外磁场中时,原子的总磁矩  $\mu_J$  将绕外磁场  $B$  的方向旋进,如图 1-3-2 所示,使原子获得附加的能量:

$$\Delta E = M_g \frac{he}{4\pi m} B = M_g \mu_B B \quad (1-3-5)$$

式中:  $\mu_B$  为玻尔磁子。

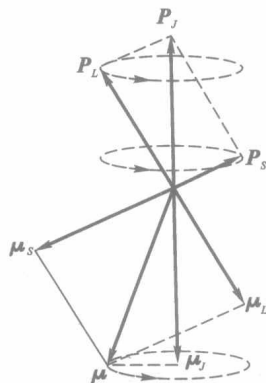


图 1-3-1 角动量和磁矩矢量图

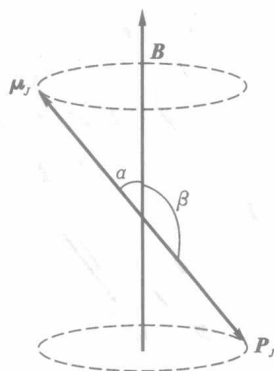


图 1-3-2 角动量旋进

3) 能级分裂下的跃迁

设某一光谱线是由能级  $E_2$  和  $E_1$  之间的跃迁而产生的,则其谱线的频率  $\nu$  同能级的关系为  $h\nu = E_2 - E_1$ ,在外磁场作用下,上下两能级分别分裂为  $2J_1 + 1$  个和  $2J_2 + 1$  个子能级,附加能量分别为  $\Delta E_1$ 、 $\Delta E_2$ ,从上能级各子能级到下能级各子能级的跃迁产生的谱线频率  $\nu'$  应满足:

$$\begin{aligned} h\nu' &= (E_2 + \Delta E_2) - (E_1 + \Delta E_1) \\ &= h\nu + (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{eh}{4\pi m} B \end{aligned} \quad (1-3-6)$$

即 
$$\Delta\nu = \nu' - \nu = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi m} B$$

用波数差 ( $\bar{\nu} = \frac{\nu}{c}$ ) 来表示,则

$$\begin{aligned} \Delta\bar{\nu} &= \bar{\nu}' - \bar{\nu} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi mc} B \\ &= (M_2 g_2 - M_1 g_1) \cdot L \end{aligned} \quad (1-3-7)$$

其中:  $L = \frac{e}{4\pi mc} B$  称为洛仑兹单位。

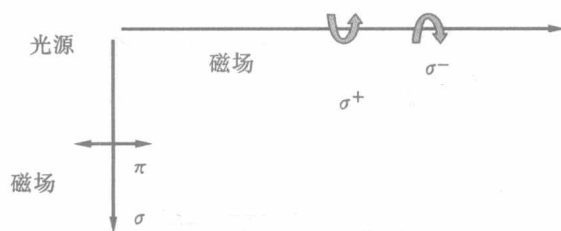
$M$  的选择定则是  $\Delta M = M_2 - M_1 = 0, \pm 1$ ,脚标 2,1 分别代表始、终能级,其中  $\Delta M_1 = 0$  的跃迁谱线称为  $\pi$  光线,  $\Delta M = \pm 1$  的跃迁谱线称为  $\sigma$  光线。注意,当  $\Delta J = 0$  时,不存在  $M_2 = 0$  的能级向  $M_1 = 0$  的能级的跃迁。



## 4) 光的偏振与角动量守恒

在微观领域中,光的偏振情况是与角动量相关联的,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的条件。 $\Delta M = 0$ ,说明原子跃迁时在磁场方向角动量不变,因此 $\pi$ 光线是沿磁场方向振动的线偏振光。 $\Delta M = +1$ ,说明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 $\hbar$ ,因此沿磁场指向方向观察,可观察到逆时针的左旋圆偏振光 $\sigma^+$ 。同理, $\Delta M = -1$ 则可观察到顺时针的右旋圆偏振光 $\sigma^-$ 。

当垂直于磁场方向(横效应)观察时,如偏振片平行于磁场,将观察到 $\Delta M = 0$ 的 $\pi$ 分支线,如偏振片垂直于磁场,将观察到 $\Delta M = \pm 1$ 的 $\sigma$ 分支线。而沿磁场方向观察时,只能观察到 $\Delta M = \pm 1$ 的左右旋圆偏振的 $\sigma$ 分支线,如图1-3-3所示。

图 1-3-3  $\pi$ 光和 $\sigma$ 光

## 5) 汞原子 546.1 nm 的塞曼分裂

汞原子 546.1 nm 的塞曼分裂是由能级  $6s7s(^3S_1)$  跃迁到  $6s6p(^3P_2)$  而产生的,表征它的量子数和在中性原子中能级分裂的量子态如表 1-3-1 所示。根据选择定则,会产生如图1-3-4所示的能级跃迁。

表 1-3-1 量子数和能级分裂的量子态

量子数	$^3S_1$			$^3P_2$				
$L$	0			1				
$S$	1			1				
$J$	1			2				
$g$	2			3/2				
$M$	1	0	-1	2	1	0	-1	-2
$Mg$	2	0	-2	3	3/2	0	-3/2	-3

## 2. 实验装置的工作原理

## 1) 仪器组成

JWG-III型微机塞曼效应实验仪如图1-3-5所示。

## 2) CCD 采集系统

CCD采集系统的核心器件是一个数千像素的CCD线阵,前端仪器产生的光信号经过成像透镜的会聚,在CCD线阵上产生实像,它再将照射在其上的光强信号转化为模拟电信号,实时送往CCD采集卡,然后经A/D转换后量化为数字信号,由软件处理。

## 3) F-P 标准具

## (1) F-P 标准具的结构。

F-P标准具的结构为两块平面玻璃板,两块板的中间放一玻璃环,其厚度为 $d$ ,装于固