

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	

年级、专业：	2017 级 物理学	组号：	实验班 2
姓名：	高寒	学号：	17353019
日期：		教师签名：	

## 实验 CB2 塞曼效应

### 【实验报告注意事项】

#### 1. 实验报告由三部分组成：

- 1) 预习报告：（提前一周）认真研读**实验讲义**，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用（强烈建议到实验室预习），完成讲义中的预习思考题；了解实验需要测量的物理量，并根据要求提前准备实验记录表格（由学生自己在实验前设计好，可以打印）。预习成绩低于 10 分（共 20 分）者不能做实验。
- 2) 实验记录：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名（**用铅笔记录的被认为无效**）。**保持原始记录，包括写错删除部分，如因误记需要修改记录，必须按规范修改。**（不得输入电脑打印，但可扫描手记后打印扫描件）；离开前请实验教师检查记录并签名。
- 3) 分析讨论：处理实验原始数据（学习仪器使用类型的实验除外），对数据的可靠性和合理性进行分析；按规范呈现数据和结果（图、表），包括数据、图表按顺序编号及其引用；分析物理现象（含回答实验思考题，写出问题思考过程，必要时按规范引用数据）；最后得出结论。

**实验报告**就是预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来，加上本页封面。

#### 2. 每次完成实验后的一周内交**实验报告**。

#### 3. 除实验记录外，实验报告其他部分建议双面打印。

## 实验 CB2 塞曼效应

### 【实验目的】

1. 通过观察原子谱线在外磁场中的分裂现象，加深对电子“自旋”、“两个角动量的耦合”、“两个电子之间的  $LS$  耦合”、“角动量守恒”、“多电子原子和电子组态”、“能级跃迁”、“选择定则”等概念的理解，验证原子具有磁矩及其空间取向的量子化，进一步认识原子的内部结构；
2. 用 F-P 干涉仪观察汞 (Hg) 原子 546.1 nm 谱线在外磁场中的分裂现象（即“反常塞曼效应”），测量电子的荷质比  $e/m$ ；
3. 验证光子具有角动量及角动量守恒定律，了解光的偏振理论及其产生机制，学习偏振片的原理及使用方法。

### 【仪器用具】

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	塞曼效应	1	BEX-8501
2	电磁体（带电源）	1	可通过调节激励电流大小改变磁场的大小
3	磁感应强度测量仪	1	含金属探针
4	汞放电管	1	
5	滤光片	1	能通过 546.1nm 及其自由光谱范围（具体见【基本测量仪器介绍】中的描述）内的“单色光”。
6	法布里-珀罗标准具	1	
7	偏振片	1	可以通过 $0^\circ$ 刻度线方向上的线偏振光
8	数字图像采集器	1	包含望远镜和 CCD
9	台式电脑	1	安装有“塞曼效应实验分析 VCH5.0”软件，用以分析实验数据

### 【原理概述】

该实验用 F-P 干涉仪观察汞的反常塞曼效应。

对原子施加沿  $z$  轴方向的外磁场  $B$  后，由于电子的轨道角动量和自旋角动量的  $z$  轴分量都是量子化的，施加的外磁场将导致哈密顿算符发生改变，原先简并的本征态发生分裂。汞的外层有 2 个电子，它们的轨道角动量量子数和自旋角动量量子数分别标记为  $(l_1, m_1)$  和  $(l_2, m_2)$ 。两个电子的轨道角动量和自旋角动量分别相加，得到总轨道角动量  $L$  和总自旋角动量  $S$ ，两者再相加得到总的角动量  $J$ ，这种相加模式称为  $LS$  耦合。

在这个实验中，汞原子有两种可能的电子组态，分别对应的各角动量量子数如表 1

表 1: 汞原子两种电子组态对应的量子数

	$^3S_1 (6s7s)$	$^3P_2 (6s7p)$
$L$	0	1
$S$	1	1
$J$	1	2

磁矩  $\vec{J}$  在外磁场  $B$  中具有额外的势能

$$U = -\vec{\mu}_J \cdot \vec{B} \quad (1)$$

或者用角动量  $J$  的量子数表示为

$$U = m_J g_J \mu_B B \quad (2)$$

若电子在主量子数  $n$  的不同值间跃迁的发射频率为  $\nu$ ，加入外磁场后，原子具有了由 (2) 给出的额外能量，从而带来了额外的频率。这一频率值是

$$\Delta\nu = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{eB}{4\pi m} = 46.7 (M_2 g_2 - M_1 g_1) cB \text{ (Hz)} \quad (3)$$

塞曼效应中发射的光子有两种偏振模式：垂直于磁场的  $\sigma^\pm$  偏振和平行于磁场的  $\pi$  偏振。 $\sigma^\pm$  偏振是垂直磁场平面的圆偏振光，其角动量方向与磁场平行或相反； $\pi$  偏振前后原子角动量不变，光子角动量平行于磁场，是与磁场平行的线偏振光。

### 【实验前思考题】

1. 光子是否具有角动量？试描述光子角动量方向与光的偏振方向之间的关系。

光子具有角动量，其方向与其圆偏振方向满足右手螺旋定则关系。

2. 用同一级条纹的内外圈分别计算电子的荷质比，结果一样吗？试简述原因。

3. 请利用 (20) 至 (23) 式，计算汞原子  $3S_1 (6s7s)$  和  $3P_2 (6s7p)$  能级所对应的量子数（见表 1），并给出详细的计算过程。

对  $^3S$  组态， $L = 0$ ， $S = 1$ ， $J$  的可能取值从  $|L - S|$  到  $L + S$ ，其值都是 1，故  $J$  只能取 1。

对  $^3P$  组态， $L = 1$ ， $S = 1$ ， $j$  的可能取值为  $J = 0, 1, 2$ ，表中给出的是  $J = 2$  的情况。

4. 请利用 (2)、(8) 和 (20) 式，并结合  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$  和  $\vec{\mu}_J = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S$ （注意此时的  $\vec{\mu}_J$  是图 5 中的  $\vec{\mu}_J$ ，详细见脚注 22），导出朗德因子的一般表达式 (28) 式，并给出详细的推导过程。

由  $\vec{\mu}_L = -\gamma\vec{L}$  和  $\vec{\mu}_S = -2\gamma\vec{S}$  和

$$\vec{\mu}_J = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S \quad (4)$$

并注意到  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ , 有

$$-\vec{\mu}_J \equiv g_J\gamma\vec{J} = \gamma\vec{L} + 2\gamma\vec{S} \quad (5)$$

也即

$$g_J\vec{J} = \vec{L} + 2\vec{S} \quad (6)$$

上式两边点乘  $\vec{J}$  得到

$$\begin{aligned} g_J\vec{J}^2 &= \vec{L} \cdot \vec{J} + 2\vec{S} \cdot \vec{J} \\ &= \vec{L}^2 + \vec{S} \cdot \vec{L} + 2\vec{S}^2 + 2\vec{S} \cdot \vec{L} \\ &= \vec{L}^2 + \frac{3}{2}[(\vec{L} + \vec{S})^2 - \vec{L}^2 - \vec{S}^2] + 2\vec{S}^2 \\ &= \frac{3}{2}\vec{J}^2 + \frac{1}{2}(\vec{S}^2 - \vec{L}^2) \end{aligned} \quad (7)$$

再注意到  $\vec{J}^2 = J(J+1)\hbar^2$ ,  $\vec{L}^2 = L(L+1)\hbar^2$ ,  $\vec{S}^2 = S(S+1)\hbar^2$ , 有

$$g_JJ(J+1) = \frac{3}{2}J(J+1) + \frac{1}{2}[S(S+1) - L(L+1)] \quad (8)$$

也即

$$g_J = \frac{3}{2} - \frac{L(L+1) - S(S+1)}{2J(J+1)} \quad (9)$$

5. 请利用单电子情况下的 (36) 式, 并结合钠双黄线的平均波长及其波长差 ( $\lambda_1 = 589.0 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 589.6 \text{ nm}$ ), 估算一下钠原子内部的磁感应强度  $B_{int}$  的值 (提示: 单电子情况下, 两谱线的能级差为势能的两倍, 即有; 另需要利用到光子波长和频率之间的关系式。答案: 钠原子内部的磁感应强度  $B_{int}$  的值为  $18.5 \text{ T}$ )。

我们有

$$\begin{aligned} B_{int} &= \frac{1.5\Delta\nu}{46.7} \\ &= \frac{1.5}{\Delta(\frac{1}{\lambda}) \times 46.7} \\ &= 18.5 (\mu\text{T}) \end{aligned} \quad (10)$$

6. 请结合第 3 题的计算结果, 说明弱外磁场  $B_{ext} \ll B_{int}$  成立时弱外磁场  $B_{ext}$  的取值范围, 并确认本实验中电磁体的磁感应强度符合弱外磁场  $B_{ext} \ll B_{int}$  条件。

7. 请结合力与势能的关系式  $\vec{F} \equiv -\nabla U$  并利用 (11) 式, 试推导磁矩在非均匀外磁场中的受力大小为  $F_z = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$  ( $B_x = B_y = 0$ ) (设外磁场方向在  $z$  轴方向,  $F_z$  为力在  $z$  方向上分量的大小) (提示: 请利用郭硕鸿《电动力学》(第二版)一书附录中的矢量运算公式)。

磁矩  $\vec{\mu}$  在磁场  $\vec{B}$  中具有势能

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \quad (11)$$

在这里,  $\vec{B} = B_z \vec{e}_z$ , 有  $U = -\mu_z B_z$ , 于是受力为

$$\begin{aligned} \vec{F} &= -\frac{\partial U}{\partial z} \vec{e}_z \\ &= \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \vec{e}_z \end{aligned} \quad (12)$$

也即

$$F_z = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (13)$$

8. 请结合朗德因子的一般表达式 (28) 式, 以及两个角动量耦合的一般规则 (20) 至 (23) 式, 计算表 3 中汞原子 546.1nm 谱线对应的上下两个能级的各量子数及不同谱线 (能级跃迁) 的朗德因子 (见图 9)。用“格罗春图” 33 (Grotrian 图) 来表示汞原子 546.1nm 谱线不同能级之间可能的跃迁。

9. 请回答什么是“反常塞曼效应”和“正常塞曼效应”, 两者之间的区别是什么。请思考什么是“帕邢-巴克效应”及其形成的原因。

反常塞曼效应在电子净自旋为半奇数时发生, 这时能级分裂为偶数个; 正常塞曼效应则相反, 在电子净自旋为整数时发生, 这时能级分裂为奇数个。当外部磁场强于原子内部磁场时, 电子间的耦合被破坏, 使得谱线重新排列, 这就是帕邢-巴克效应。

10. 请回答电子的“自旋-轨道耦合”的本质是什么? 它与电子之间的“LS 耦合”的区别是什么?

专业:	2017 级 物理学	年级:	实验班 2
姓名:	高寒	学号:	17353019
室温:		实验地点:	珠海教学楼 A5
学生签名:	高寒	评分:	
日期:		教师签名:	

## 实验 CB2 塞曼效应

### 【实验内容、步骤、结果】

本实验自动测量和记录数据，结果由界面截图给出。

### 【实验过程中遇到问题记录】

专业:	物理学	年级:	2017 级
姓名:	高寒	学号:	17353019
日期:			
评分:		教师签名:	

## 实验 CB2 塞曼效应

### 【分析与讨论】

(Content)

### 【实验思考题】

(Content)