

塞曼效应

1. 实验目的

- 1.1. 掌握塞曼效应理论，测定电子的荷质比，确定能级的量子数和朗德因子，绘出跃迁的能级图。
- 1.2. 掌握法布里—珀罗标准具的原理和使用。
- 1.3. 观察塞曼效应现象，并把实验结果和理论结果进行比较，同时了解使用 CCD 及多媒体计算进行实验图像测量的方法。

2. 实验仪器

研究塞曼效应的实验仪器包括：电磁铁，汞灯，会聚透镜，偏振片，透射干涉滤光片，法布里-珀罗标准具，望远镜，CCD 图像传感器及镜头，汞灯电源，磁铁电源，多媒体计算机和图像卡。将这些仪器按照图 5-1 组装后即可用于实验。

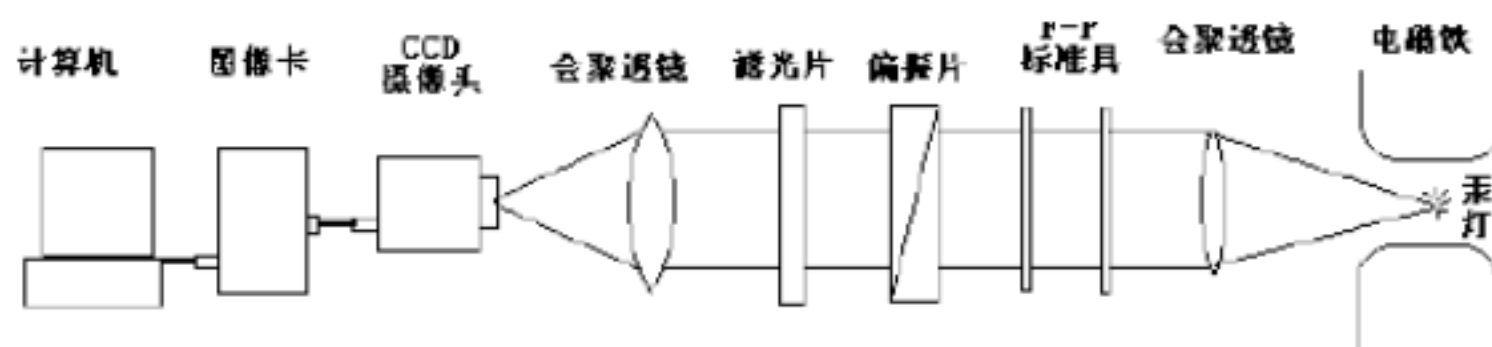


图 5-1 塞曼效应实验装置示意图

在本实验中，于电磁铁的两极之间放上一支水银辉光放电灯，用交流电源 220V 通过自耦变压器接电灯变压器点燃放电管。自耦变压器用来调节放电管的电流强度。实验中把自耦变压器调节到 75V 上。

电磁铁用直流稳压电源供电，电流与磁场的关系可用高斯计进行测量，使用电磁铁时要先接通冷却水，然后慢慢调节自耦变压器，使磁场电流缓慢达到 5A。注意磁场电流不准超过 5A，以免电磁铁电源烧坏。

多媒体计算机采用 Pentium-133 以上机型，加装视频多媒体组件，工作于 32 位 Windows 操作环境。视频多媒体组件的核心是多媒体图像采集卡，可将输入的 PAL 或 NTSC 制视频信号解码并转换为数字信息，此信息可用于在计算机显示器上同步显示所输入的电视图像，并可作进一步的分析处理。本实验中用 CCD 作为光探测器，通过图像卡使 F-P 标准具的干涉花样成像在计算机显示器上，实验者可使用本实验专用的实时图像处理软件读取实验数据。

3. 实验原理

3.1. 塞曼效应简介

当光源放在足够强的磁场中时，所发出的光谱线都分裂成几条，条数随能级的类别而不同，而分裂后的谱线是偏振的，这种现象被称为塞曼效应。塞曼效应证实了原子具有磁矩和空间取向量子化的现象。

塞曼效应分为正常塞曼效应和反常塞曼效应。正常塞曼效应是指那些谱线分裂为三条，而

且两边的两条与中间的频率差正好等于 $\frac{eB}{4\pi mc}$ ，对于这种现象，经典理论可以给予很好的解释。

但实际上大多数谱线的分裂多于三条，谱线的裂距是 $\frac{eB}{4\pi mc}$ 的简单分数倍，这种现象被称为反常塞曼效应。下面具体讨论塞曼效应中外磁场对原子能级的作用。

3.2. 原子的总磁矩与总动量矩的关系

因为原子中的电子同时具有轨道角动量 P_L 和自旋角动量 P_s 。相应的，它也同时具有轨道磁矩 μ_L 和自旋磁矩 μ_s ，并且它们有如下关系。

$$\begin{cases} \mu_L = \frac{e}{2m} P_L \\ \mu_s = \frac{e}{m} P_s \end{cases} \quad (5-1)$$

其中

$$\begin{cases} P_L = \sqrt{L(L+1)} \frac{h}{2\pi} \\ P_s = \sqrt{S(S+1)} \frac{h}{2\pi} \end{cases} \quad (5-2)$$

(5-2) 式中 L, S 分别表示轨道量子数和自旋量子数。

原子核也有磁矩，但它比一个电子的磁矩要小三个数量级，故在计算单电子原子的磁矩时可以把原子核的磁矩忽略，只计算电子的磁矩。对于多电子原，考虑到原子总角动量和总磁矩为零，故只对其原子外层价电子进行累加。磁矩的计算可用图 5-2 的矢量图来进行。

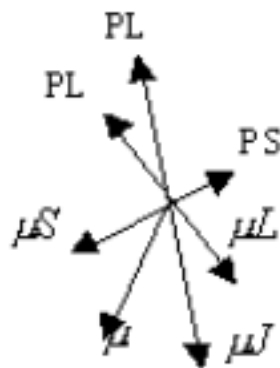


图 5-2 电子磁矩与角动量关系

由于 μ_s 与 P_s 的比值比 μ_L 与 P_L 的比值大一倍，所以合成的原子总磁矩不在总角动量 P_J 的方向上。但由于 μ 绕 P_J 运动，只有 μ 在 P_J 方向的投影 μ_J 对外平均效果不为零。根据图 5-2 可计算出 μ_J 与 P_J 的关系如下。

$$\mu_J = g \frac{e}{2m} P_J \quad (5-3)$$

上式中的 g 就是朗德因子。它表征了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。在考虑 LS 耦合的情况下，朗德因子可按式计算。

$$g = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} \quad (5-4)$$

3.3. 外磁场对原子能级作用

原子的总磁矩在外磁场中受到力矩 L 的作用，可按下式计算。

$$L = \mu_J \times B \quad (5-5)$$

力矩 L 使总角动量发生旋进，角动量的改变的方向就是力矩的方向。原子受磁场作用而旋进所引起的附加能量 ΔE 如下

$$\Delta E = -\mu_J B \cos \alpha = g \frac{e}{2m} P_J B \cos \beta \quad (5-6)$$

其中角 α 和 β 的意义如图 5-3 所示。

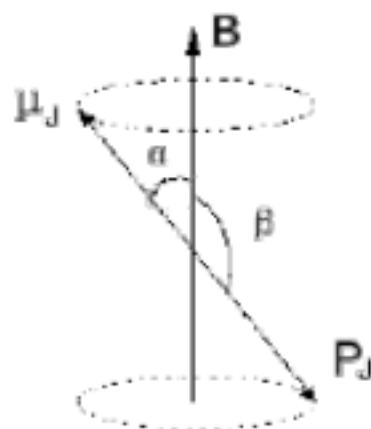


图 5-3 原子总磁矩受场作用发生的旋进

由于 μ_J 或 P_J 在磁场中的取向是量子化的，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 h 的整数倍。

$$P_J \cos \beta = M \frac{h}{2\pi} \quad (5-7)$$

其中 M 称为磁量子数， $M=J, (J-1), \dots, -J$ ，共有 $2J+1$ 个 M 值。

将(5-7)式代到 (5-6)式可得

$$\Delta E = M g \frac{eh}{4\pi m} B \quad (5-8)$$

这样，无外磁场时的一个能级，在外磁场的作用下可以分裂成 $2J+1$ 个子能级。每个子能级的附加能量由 (5-8) 式决定，它正比于外磁场磁感应强度 B 和郎德因子 g 。

3.4. 塞曼效应的选择定则

设谱线是由 E_1 和 E_2 两能级间跃迁产生的，此谱线的频率由下式确定

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (5-9)$$

在外场作用下的能级 E_2 和 E_1 分别分裂为 $(2J_2+1)$ 和 $(2J_1+1)$ 个能级，附加能量分别是 ΔE_2 和 ΔE_1 ，产生出新的谱线频率可由下式确定

$$h\nu' = (E_2 + \Delta E_2) - (E_1 + \Delta E_1) \quad (5-10)$$

那么分裂后谱线与原谱线的频率差为

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

(5-11)

引入波数 $\tilde{\nu}$

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}$$

使用波数差来表示频率差

$$\Delta \tilde{\nu} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi m c} B = 4.67 \times 10^{-5} (M_2 g_2 - M_1 g_1) B (\text{cm})^{-1}$$

(5-12)

跃迁必须满足以下选择定则

- i. 当 $M = 0$ ，垂直于磁场方向观察，产生 线，为光振动方向平行于磁场方向的线偏振光 (当 $J=0, M_2=0, M_1=0$ 除外，如汞的 4358 埃谱线就有此情况)。平行于磁场方向观察不到 线，即其强度为零。
- ii. 当 $M = \pm 1$ 垂直于磁场方向观察时，可观察到 线，为光振动方向垂直于磁场的线偏振光。沿磁场方向观察时， $M=1$ 是以磁场方向为正向的右旋偏振光， $M=-1$ 是以磁场方向为正向的左旋偏振光。对观察者而言，顺着磁场方向观察和对着磁场方向观察，偏振光方向是相反的。

3.5. 钠黄线 5890A 谱线的塞曼分裂

钠黄线 5890A 谱线是 ($2P_{3/2} \rightarrow 2S_{1/2}$) 的跃迁，上能级的 g_2 因子为 $4/3$ ，下能级的 g_1 因子为 2 ，能级分裂的大小和可能的跃迁用列表的方法表示： (根据 M 只能为： $0, \pm 1$)

表 5-1 钠黄线 5890A 谱线的塞曼分裂

M		3/2	1/2	-1/2	-3/2	
$M_2 g_2$		6/3	2/3	-2/3	-6/3	
$M_1 g_1$		1		-1		
$M_2 g_2 - M_1 g_1$	-5/3	-3/3	-1/3	1/3	3/3	5/3
偏振态						

图 5-4 是能级分裂和可能跃迁的示意图。中间的 0 点表示无外磁场时的光谱位置，横线中的黑点，表示一个洛伦兹单位，用 L 表示，横线上的竖线表示 成份，下面表示 成份。

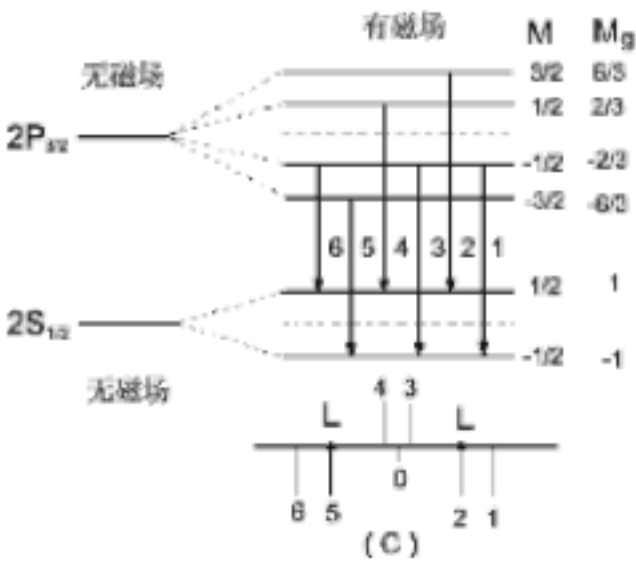


图 5-4 钠 5890 A 谱线的塞曼分裂示意图

5890A 谱线在磁场中分裂为六条，垂直磁场观察时，中间两条线为 π 成份。两旁的四条线为 σ 成份，沿着磁场观察 π 成份不出现。对应的四条 σ 线分别为右旋圆偏振光和左旋圆偏振光。在观察塞曼分裂时，一般光谱线最大的塞曼分裂仅有几个洛伦兹单位，用一般棱镜光谱仪观察是困难的。因此，我们在实验中采用高分辨率仪器，即法布里—珀罗标准具（简称 F-P 标准具）。

4. 实验内容及步骤

- 1) 对整个光学系统进行共轴调节，是尽可能强的光斑落在 F-P 的镜片上，用眼睛像 F-P 的初设镜片望去，可见绿光充满镜片。
- 2) 调节 F-P 标准具，使两镜片的内表面达到严格平行。
- 3) 加磁场，将钠灯置于磁铁的磁极中央，旋转偏振片的偏振方向鉴别 π 成分和 σ 成分。
- 4) 选取 π 成分，利用 CCD和图像卡在计算机显示器上显示干涉圆环，并将圆环存储，再打开塞曼效应辅助分析软件，用三点决定一圆法测量干涉圆环的半径并求出电子荷质比与实验误差。

5. 数据记录及处理

5.1. 平均磁感应强度

表 5-2 平均磁感应强度

磁感应强度 (mT)	1046	1034	1029	1012	平均值
	1042	1049	1020	1014	1028 \pm 3.944
	1035	1032	1022	1007	

5.2. 电子荷质比的计算及误差

原始数据包括不同级条纹的半径记录于表 5-3 中

表 5-3 不同级条纹及相应条纹半径

条纹级数	圆环半径	圆心坐标	
		X	Y
k	149.936	376.79	260.162
	174.625	376.79	260.162
	194.687	376.79	260.162
k-1	311.042	376.79	260.162
	324.425	376.79	260.162
	335.010	376.79	260.162
k-2	422.343	376.79	260.162

将原始数据代入公式

$$\Delta \tilde{\nu} = \tilde{\nu}_a - \tilde{\nu}_b = \frac{1}{2h} \cdot \frac{D_b^2 - D_a^2}{D_{k+1}^2 - D_k^2}$$

即可算出 $\Delta \tilde{\nu}$ 值（见表 5-4），并代入式 (5-12)可得荷质比的表达式如下

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

其中

$$M_2 g_2 - M_1 g_1 = \frac{1}{2}$$

即可算出电子荷质比如表 5-4 所示

表 5-4 实验数据处理 *

干涉序	圆环半径	$R_{i+1}^2 - R_i^2$	ΔR_i^2	$\Delta \tilde{\nu}$	电子的荷质比	平均值
k	173.0827	74689.3	-8013.09	-26.8214	-1.96720E+11	-1.90371E+11
			-7409.14	-24.7999	-1.81894E+11	
k-1	323.4923	73726.5	-8504.45	-28.8378	-2.11510E+11	
			-6890.12	-23.3638	-1.71361E+11	
k-2	422.343	-	-	-	-	

*对于表中数据的一些说明：

- 1) 表中的圆环半径是指每一干涉序的圆环状条纹的半径，此半径取值乃是用测量出的该干涉序中的三道小环的半径取平均得到的。此外， ΔR_i^2 是用相邻两个小环的半径做平方差所得。
- 2) 表 5-4 在计算电子荷质比时本应附上不确定度，不过由于不确定度与计算结果相比太小，所以忽略，具体计算见下
首先，由于对于圆环半径的测量是单次测量，并且实验仪器的任何情况都未知，所以只能认为对于圆环半径的测量的不确定度为 0，相应 $\Delta \tilde{\nu}$ 的不确定度也是 0，那么荷质比的不确定度就只由磁感应强度的测量引起

$$\delta_{e/m} = \sqrt{\left(\frac{\delta_B}{B}\right)^2} = 3.836 \times 10^{-3} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

与荷质比的计算结果相比差了 14 个数量级。以最后的平均值为例，如果计算结果要带上不确定度的话就应该是

$$\frac{e}{m} = (-1.90371 \pm 0.00000) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

所以表中计算出的荷质比都没有带上不确定度。

将几个荷质比的结果取平均并与标准值 $-1.75881962 \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相比，相对误差为
 $\delta \approx 8.23793\%$

6. 问题与讨论

6.1. 对于塞曼效应的横效应，磁感应强度的最大值和最小值由什么决定？假定 F-P 标准具间隔圈厚度 $h=2\text{mm}$ ，其最大值和最小值各是多少？

答：

由(5-12) 式可知

$$\Delta \tilde{\nu}_R : B$$

也就是说找到 $\Delta \tilde{\nu}_R$ 的最大值和最小值即可找到磁感应强度的最大值和最小值。

1) 由 F-P 标准具自由光谱区的定义可知，自由光谱区即为 $\Delta \tilde{\nu}_R$ 的最大值，对 $h = 2\text{mm}$ 而言

$$\Delta \tilde{\nu}_R = 2.5 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$$

代回 (5-12) 式可知

$$B_{\max} \approx 10.71 \text{ T}$$

2) 由分辨本领的定义可知， $\Delta \tilde{\nu}_R$ 的最小值由标准具的分辨本领决定

分辨本领的定义式是

$$F = \frac{\Delta \lambda_R}{\delta \lambda}$$

并且如果已知 F-P 玻璃板内表面的反射率 R 的话，也可以用下式计算出分辨本领

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}$$

结合

$$\tilde{\nu}_R = \frac{\Delta \lambda_R}{\lambda^2}$$

可得

$$\tilde{\nu}_{R_{\min}} = \frac{\delta \lambda \pi \sqrt{R}}{\lambda^2 (1 - R)} = \frac{\delta \lambda}{\lambda^2} F$$

进而

$$B_{\min} = \frac{4\pi m c \delta \lambda}{e(M_2 g_2 - M_1 g_1) \lambda^2} \cdot F$$

也就是说，只要知道 F-P 标准具的分辨本领或标准具能分辨的最小波长差，即可求出 B_{\min} 。

6.2. 实验中如何鉴别 π 成分和 σ 成分？如何观察和分辨 σ 成分中左旋和右旋圆偏振光？

答：

- 1) 当 $\Delta M = 0$ ，在垂直于磁场的方向可观察到 线，也就是光振动方向平行于磁场方向的线偏振光。而平行于磁场方向观察不到 线，即其强度为零。
- 2) 当 $\Delta M = \pm 1$ ，在垂直于磁场的方向可观察到 线，也就是光振动方向垂直于磁场的线偏振光。其中，沿磁场方向观察时， $\Delta M = 1$ 是以磁场方向为正向的右旋圆偏振光， $\Delta M = -1$ 是以磁场方向为正向的左旋偏振光。