

近代物理实验报告 2.4: 塞曼效应

xy 学号 匡亚明学院

2019 年 2 月 29 日

1 引言

19 世纪伟大的物理学家法拉第研究电磁场对光的影响时,发现了磁场能改变偏振光的偏振方向。1896 年荷兰物理学家塞曼 (Pieter Zeeman) 根据法拉第的想法,探测磁场对谱线的影响,发现钠双线在强磁场中的分裂。洛伦兹根据经典电子论解释了分裂为三条谱线的正常塞曼效应。由于研究这个效应,塞曼和洛伦兹共同获得了 1902 年的诺贝尔物理学奖。他们这一重要研究成就,有力地支持了光地电磁理论,使我们对物质地光谱、原子和分子地结构有了更多地了解。

2 实验目的

1. 掌握塞曼效应理论,测定电子的荷质比。
2. 掌握法布里—珀罗标准具的原理和使用,学习用 CCD 及多媒体计算机测量实验图像的方法。

3 实验仪器

微机化塞曼效应实验仪。

4 实验原理

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距和空间取向量子化的现象,至今塞曼效应仍是研究能级结构地重要方法之一。

正常塞曼效应是指那些谱线分裂为三条,而且裂距 (相邻两条子谱线间地波数差) 正好等于一个洛伦兹单位 ($\frac{eB}{4\pi mc}$) 的效应,可用经典理论给予很好地解释。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,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。

4.1 原子的总磁矩与总动量矩的关系

在原子物理中我们知道,原子中的电子不但有轨道运动,而且还有自旋运动。因此,原子中的电子具有轨道角动量 P_L 和轨道磁矩 μ_L , 以及自旋角动量 P_S 和自旋磁矩 μ_S 。它们的关系为:

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

式中 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。

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。

对于多电子原子, 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。磁矩的计算可用矢量图来进行, 如图 (1)。

由 (1) 式知, 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动量矩 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 (1) 进行向量叠加运算, 有 μ_J 与 P_J 的关系:

$$\mu_J = g \frac{e}{2m} P_J$$

上式中的 g 就是朗德因子。对于 LS 耦合

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

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。

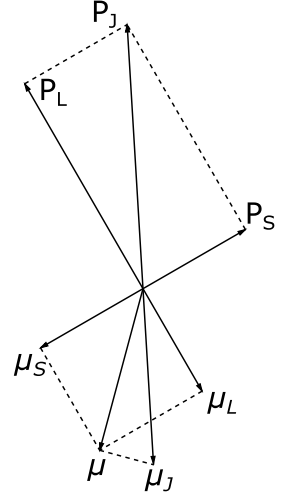


图 1: 电子磁矩与角动量的关系

4.2 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 \mathbf{L} 的作用。

$$\mathbf{L} = \mu_J \times \mathbf{B} \quad (3)$$

力矩 \mathbf{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 为:

$$\Delta E = -\mu_J B \cos \alpha = g \frac{e}{2m} P_J \cos \beta \quad (4)$$

其中角 α 和 β 的意义如图 (2) 所示。

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 \hbar 的整数倍。即

$$P_J \cos \beta = M \hbar \quad (5)$$

其中 M 称为磁量子数, $M=J, (J-1), \dots, -J$, 共有 $2J+1$ 个 M 值。将 (5) 式代到 (4) 式可得

$$\Delta E = Mg \frac{e \hbar}{2m} B \quad (6)$$

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 (6) 式决定, 它正比于外磁场磁感应强度 B 和朗德因子 g 。

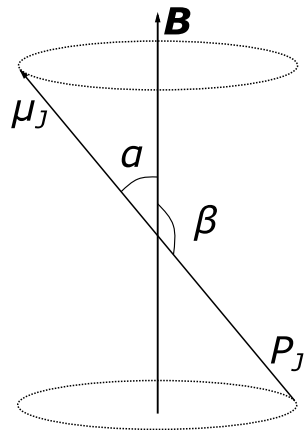


图 2: 原子总磁矩受磁场作用发生的旋进

4.3 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

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (7)$$

确定。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

$$h\nu' = (E_2 + \Delta E_2) - (E_1 + \Delta E_1) \quad (8)$$

确定。分裂后谱线与原谱线的频率差为：

$$\begin{aligned} \Delta\nu = \nu' - \nu &= \frac{\Delta E_2 - \Delta E_1}{h} \\ &= (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi m} \end{aligned} \quad (9)$$

引入波数 $\tilde{\nu}$ ， $\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}$ ，用波数差来表示 (9) 式，有

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

其中 $L = \frac{e}{4\pi m c}$ ，称为洛伦兹单位，B 以 Gs 为单位。

跃迁必须满足以下选择定则：

当 $M = 0$ ，垂直于磁场方向可观察到 π 线，为光振动方向平行于磁场方向的线偏振光 (当 $\Delta J=0$ ， $M_2=0 \rightarrow M=0$ 除外。如汞的 435.8nm 谱线就有此情况)。平行于磁场方向观察不到 π 线，即其强度为零。

当 $M = \pm 1$ ，垂直于磁场方向可观察到 σ 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， $\Delta M=1$ 是以磁场方向为正向的右旋偏振光， $\Delta M=-1$ 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。

4.4 汞 546.1nm 谱线的塞曼分裂

本实验的汞原子 546.1nm 谱线是由 $6s7s^3S_1$ 跃迁到 $6s6p^3P_2$ 产生的，由 (10) 式以及选择定则和偏振定则，可求出垂直于磁场观察时的塞曼分裂情况。表 (1) 列出了 3S_1 和 3P_2 能级的各量子数

表 1: 3S_1 和 3P_2 能级的各项量子数值表

	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

L, S, J, M, g 与 Mg 的数值。

因此，在外磁场的作用下，能级分裂情况及分裂谱线相对强度可用图 (3) 表示，图中，上面部分表示可能发生的跃迁，下面部分画出了分裂谱线的裂距与强度，将 π 成分画在水平线上， σ 成分画在水平线下。可见汞 546.1nm 谱线分裂为 9 条等间距的谱线，相邻谱线间距都是 $\frac{1}{2}$ 个洛伦兹单位。

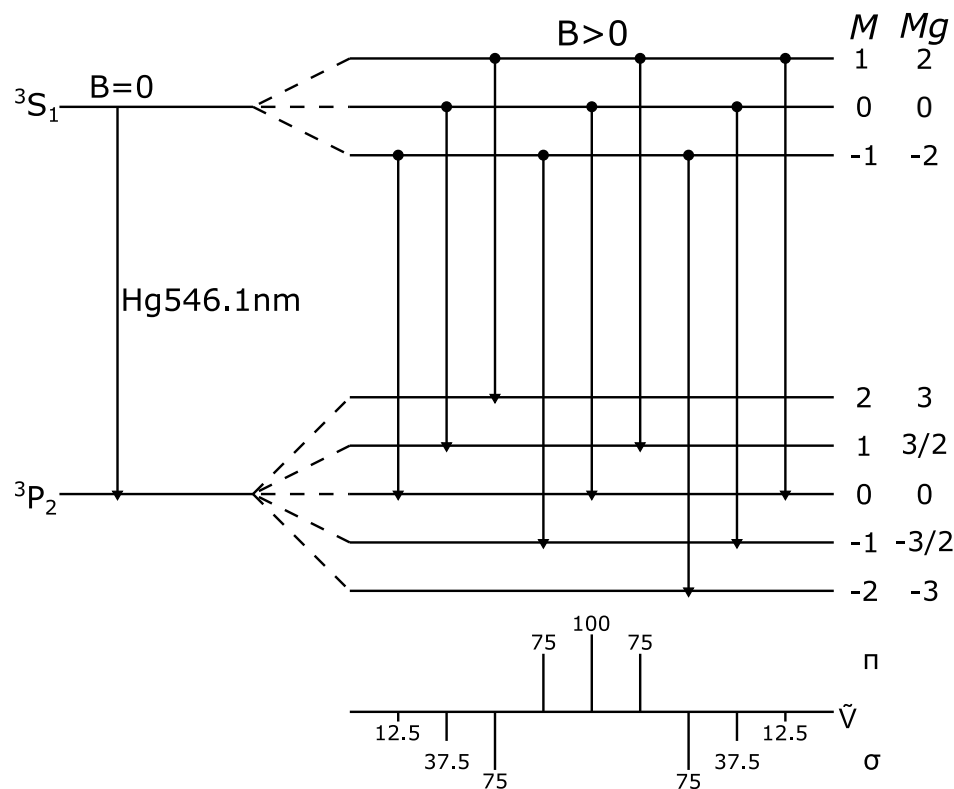


图 3: 能级分裂情况及谱线强度

5 实验内容

1. 调整光学系统，使光束通过每个光学元件的中心 (共轴调节)，调节聚光透镜位置，使尽可能强的均匀光斑落在 F-P 的镜片上，用眼睛向 F-P 的出射镜片望去，可见绿光充满镜片。
2. 调节法布里-珀罗标准具。调节 F-P 标准具的三个压紧弹簧的螺丝，使两镜片的内表面达到严格平行，这一步骤是本实验的关键。
3. 加磁场。将汞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，通过图像卡，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，打印结果。

6 实验数据

7 误差分析

1. 测量磁感应强度时由于磁场自身波动以及探测头的晃动，磁感应强度的数值一直在波动产生误差，并且实际的磁场不是严格的匀强磁场，磁感应强度不是处处与磁场中心（测量点）相等；
2. 测量圆环条纹的半径时，取定的三个测量点并非严格地位于同一组同心圆上，导致半径的测量存在误差。

8 思考题

8.1 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？

由 (10) 式可知

$$\Delta\tilde{\nu} \propto B$$

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

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

代回 (10) 式可知

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

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

$$B_{\min} = \frac{4\pi mc\delta\lambda}{e(M_2g_2 - M_1g_1)\lambda^2}F$$

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} 。

8.2 实验中如何鉴别成分和成分？如何观察和分辨成分中左旋和右旋圆偏振光？

1. 当 $\Delta M=0$ ，在垂直于磁场的方向可观察到 π 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 π 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 σ 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。

参考文献

[1] 黄润生. 近代物理实验. 南京大学出版社, 2 edition, 2008.