

# 塞曼效应

智朝晖<sup>\*</sup>, 张高龙<sup>†</sup>

北京航空航天大学大学 物理学院, 北京 100191

**【摘要】** 塞曼效应有效地支持了光的电磁理论, 同时也揭示了原子具有磁矩和空间量子化的现象。本文通过利用 FP 干涉仪观察横向塞曼效应和纵向塞曼效应的实验结果, 体悟不同偏振光反映的物理实质, 进而意识到背后的物理现象, 同时测量电子的荷质比  $e/m$ 。

**【关键词】** 塞曼效应, 偏振光, FP 干涉仪, 荷质比, 磁矩量子化

## 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, 有力地支持了光的电磁理论, 使我们对物质的光谱、原子和分子的结构有了更多地了解。<sup>[1]</sup>

## 2 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矩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。

正常塞曼效应是指所发出的谱线分裂为三条, 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。

实验时间: 2022-09-27

报告时间: 2022-9-28

<sup>†</sup> 指导教师

\*学号: 20377365

\*E-mail: 20377365@buaa.edu.cn

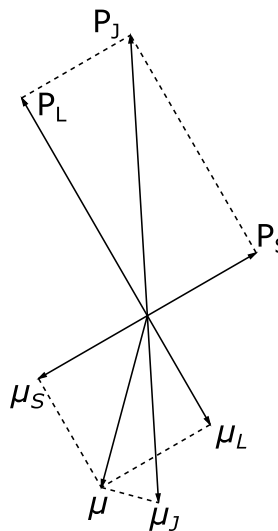


图 1 电子磁矩与角动量的关系

### 2.1 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  $\mu_L$ , 以及自旋角动量  $P_S$  和自旋磁矩  $\mu_S$ 。它们的关系为:

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

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

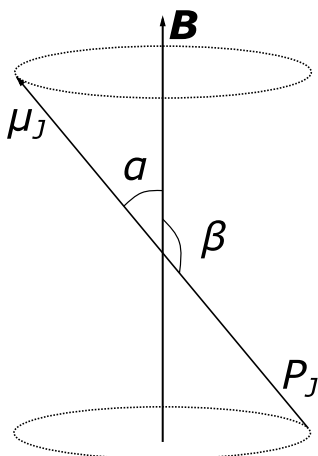


图 2 原子总磁矩受磁场作用发生的旋进

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,  $\mu_S$  与  $P_S$  的比值比  $\mu_L$  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  $\mu$  绕  $P_J$  运动,只有  $\mu$  在  $P_J$  方向的投影  $\mu_J$  对外平均效果不为零。根据图(1)进行向量叠加运算,有  $\mu_J$  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。

## 2.2 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  $\Delta E$  为:

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

其中角  $\alpha$  和  $\beta$  的意义如图(2)所示。

由于  $\mu_J$  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。即

$$P_J \cos \beta = Mh \quad (5)$$

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  $g$ 。

## 2.3 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  $\Delta E_2$  和  $\Delta E_1$ ,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

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

其中  $L = \frac{e}{4\pi mc}$ , 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  $\pi$  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  $\pi$  线,即其强度为零。

当  $M = \pm 1$ , 垂直于磁场方向可观察到  $\sigma$  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准磁场方向观察,偏振光方向是相反的。

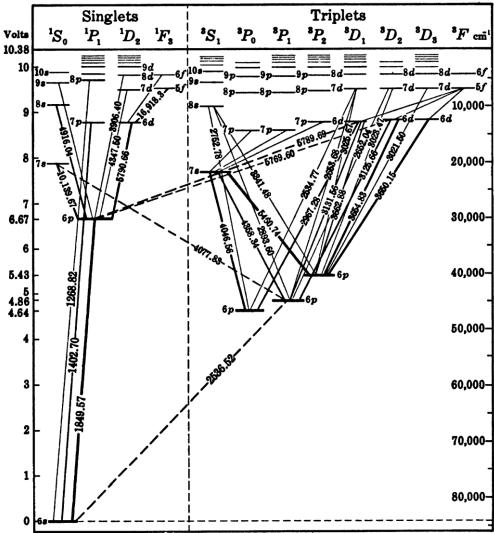


图3 汞原子的光谱图

2.4 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 L, S,

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

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 (4) 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  $\pi$  成分画在水平线上,  $\sigma$  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。

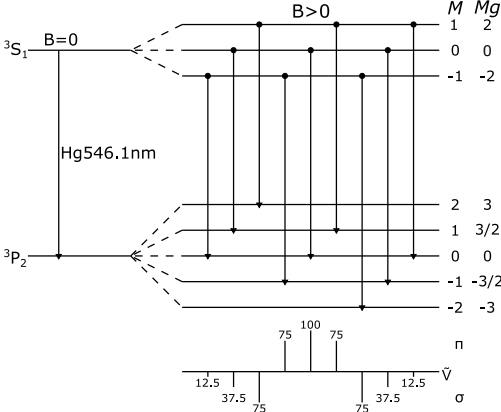


图4 能级分裂情况及谱线强度

0	120	212	298	28	116
0	118	210	295	28	119

表 2 横向塞曼效应偏振片旋转角度

3 实验结果与分析

3.1 横向塞曼效应

观察到汞原子的绿色谱线 k 级圆环和 k-1 级圆环都分裂成九条, 此时是反常塞曼效应的九种跃迁谱线, 包括  $\Delta M = 0$  时的  $\pi$  光  $\Delta M = 1$  时的  $\sigma_+$  光  $\Delta M = 1$  时的  $\sigma_-$  光当旋转偏振片时变成六条, 此时为  $\sigma_+$  光,  $\sigma_-$  光; 或者三条的  $\pi$  光。并且偏振片每旋转  $90^\circ$  时出现一次条纹变换。

得到的数据如表2, 3所示:

3.2 纵向塞曼效应

观察到汞原子的绿色谱线 k 级圆环和 k-1 级圆环都分裂成六条, 圆环间隔黑色加重, 实际为  $\pi$  光叠加

3.3 测量电子荷质比  $e/m$

最终得到  $D_k = 9.1mm, D_{k-1} = 16.6mm, D_a = 15.89mm, D_b = 16.02mm, B = 11000GS$

$$e/m = \frac{2\pi c(D_a^2 - D_b^2)}{(M_2g_2 - M_1g_1)dB(D_{k-1}^2 - D_k^2)} \quad (11)$$

带入得到  $e/m = 1.836 \times 10^{11}C/kg$ , 而理论值为  $e/m = 1.76 \times 10^{11}C/kg$ , 故相对误差为 40.3

start	74	45	41	82
圈数	4 圈 +74-19	8 圈 +75	8 圈 +77-41	8 圈 +65+18
D/mm	9.1	16.6	15.89	16.02

表 3 距离以及换算得到圆环直径

## 4 结 论

本文通过利用 FP 干涉仪观察横向塞曼效应,发现观察到汞原子的绿色谱线  $k$  级圆环和  $k-1$  级圆环都分裂成九条,此时是反常塞曼效应的九种跃迁谱线,包括  $\Delta M = 0$  时的  $\pi$  光  $\Delta M = 1$  时的  $\sigma_+$  光  $\Delta M = 1$  时的  $\sigma_-$  光当旋转偏振片时变成六条,此时为  $\sigma_+$  光,  $\sigma_-$  光;或者三条的  $\pi$  光。并且偏振片每旋转  $90^\circ$  时出现一次条纹变换。观察纵向塞曼效应发现观察到汞原子的绿色谱线  $k$  级圆环和  $k-1$  级圆环都分裂成六条,圆环间隔黑色加重,实际为  $\pi$  光叠加,体悟不同偏振光反映的物理实质,进而意识到背后的物理现象,同时测量电子的荷质比  $e/m = 1.836 \times 10^{11} C/kg$ 。

### 参考文献

- [1] 钱建强, 张高龙. 近代物理实验[M]. 近代物理实验, 2016.