

塞曼效应实验

1896年，荷兰著名的实验物理学家塞曼（Zeeman）在洛仑兹学说的影响下，使用比法拉第所做实验中更强的磁场，结果发现钠双线 D_1 和 D_2 都有增宽的现象。后来使用罗兰光栅光谱仪观察钠火焰发出的光谱线，发现每一条变宽的D线实际上都是由多条单独的谱线组成，这一现象称为塞曼效应。由于研究这个效应，塞曼和洛仑兹在1902年共同获得诺贝尔物理学奖。塞曼效应是研究原子结构最有效的方法之一，并在现代激光技术中有着重要的作用。

【实验目的】

1. 学习产生和观测塞曼效应的实验方法和技术。
2. 通过塞曼裂距，计算电子的荷质比。

【实验原理】

电子自旋和轨道运动使原子具有一定的磁矩。在外磁场中，原子磁矩与磁场相互作用，使原子系统附加了磁作用能 ΔE ，又由于电子轨道和自旋的空间的量子化。这种磁相互作用能只能取有限个分立的值，此时原子系统的总能量为

$$E = E_0 + \Delta E = E_0 + Mg \frac{eh}{4\pi m} B \quad (6-1-1)$$

式中 E_0 为未加磁场时的能量， M 为磁量子数， B 为外加磁场的磁感应强度， e 为电子电量， m 为电子质量， h 为普朗克常数， g 为朗德因子。

朗德因子的值与原子能级的总角动量 J ，自旋量子数 S 和轨道量子数 L 有关，在 $L-S$ 耦合情况下

$$g = \frac{1 + J(J+1) + S(S+1) - L(L-1)}{2J(J+1)} \quad (6-1-2)$$

由于 J 一定时， $M = J, J-1, \dots, -J$ ，所以由式(6-1-1)和(6-1-2)可知，原子在外磁场中，每个能级都分裂为 $2J+1$ 个子能级。相邻子能级的间隔为

$$g \frac{eh}{4\pi m} B = g\mu_B B$$

其中，玻尔磁子 $\mu_B = 9.2741 \times 10^{-24} J \cdot T$ 。

设频率为 ν 的光谱线是由原子的上能级 E_2 跃迁到下能级 E_1 所产生，由此，谱线的频率

同能级有如下关系：

$$h\nu = E_2 - E_1$$

在外磁场作用下，上下两能级各获得附加能量 ΔE_2 ， ΔE_1 ，因此，每个能级各分裂 $(2J_2 + 1)$ 个和 $2(J_1 + 1)$ 个子能级。这样上下两个子能级之间的跃迁，将发出频率为 ν' 的谱线，并有

$$h\nu' = (E_2 + \Delta E_2) - (E_1 + \Delta E_1) = h\nu + (M_2 g_2 - M_1 g_1) \mu_B B$$

分裂后的谱线与原谱线的频率差为：

$$\Delta\nu = \nu' - \nu = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi m} B \quad (6-1-3)$$

换以波数表示

$$\Delta\tilde{\nu} = \tilde{\nu}' - \tilde{\nu} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi mc} B = (M_2 g_2 - M_1 g_1) L \quad (6-1-4)$$

式中 $\frac{e}{4\pi mc} B$ 称为洛仑兹单位，以 L 表示。

跃迁时 M 的选择定则与谱线的偏振情况如下：

选择定则： $\Delta M = 0$ （当 $\Delta J = 0$ 时， ΔM 被禁止）， $\Delta M = \pm 1$ 。

当 $\Delta M = 0$ 时，产生的偏振光为 π 成份。垂直于磁场观察时（横效应），线偏振光的振动方向平行于磁场。平行于磁场观察时， π 成份不出现。

当 $\Delta M = \pm 1$ 时，产生的偏振光为 σ 成份。垂至于磁场观察时，产生线偏振光，其振动方向垂至于磁场。平行于磁场观察时（纵效应），产生圆偏振光。 $\Delta M = 1$ ，偏振转向是沿磁场方向前进的螺旋方向，磁场指向观察者时，为左旋圆偏振光； $\Delta M = -1$ 时，偏振方向是沿磁场指向观察者时，为右旋圆偏振光。如图 6-1-1 所示。

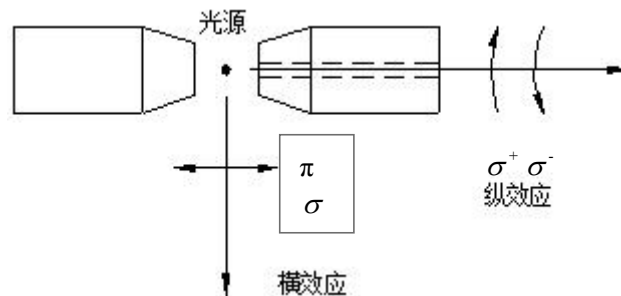


图 6-1-1 塞曼效应实验的观察

光谱线的间线（上下能级自旋量子数 $S = 0$ ，即单重态间的跃迁）在磁场作用下，把原波数为 $\tilde{\nu}$ 的一条谱线分裂成波数为 $\tilde{\nu} + \Delta\tilde{\nu}$ ， $\tilde{\nu}$ ， $\tilde{\nu} - \Delta\tilde{\nu}$ 的三条谱线，中间的一条为 π 成

份，分裂的两条为 σ 成份，谱线间隔为一个洛仑兹单位。对于双重态以上的谱线将分裂成更多条的谱线。前者称为正常塞曼效应，后者称为反常塞曼效应。

Hg 的 546.1nm 谱线产生于原子态 $6s7s\ ^3S_1 \rightarrow 6s6p\ ^3P_2$ 的跃迁。两原子态的有关量子数，朗德因子及 Mg 的值，列于表 6-1-1。

表 6-1-1 两原子态的有关参数

原子态符号	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

由于选择定则的限制，只允许 9 种跃迁存在（见图 6-1-2）。从横向角度观察，原 546.1nm 光谱线分裂成 9 条彼此靠近的光谱线，如图 6-1-3 所示，其中包括 3 条 π 分量线（中心 3 条）和 6 条 σ 分量线。

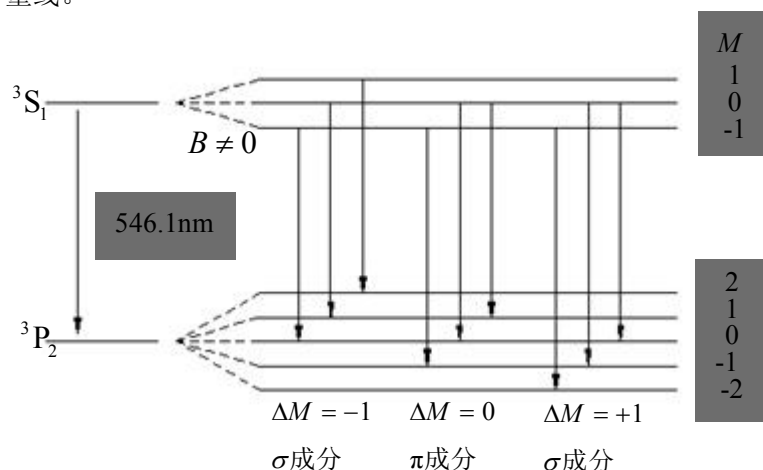


图 6-1-2 Hg 的 546.1 nm 能级分裂

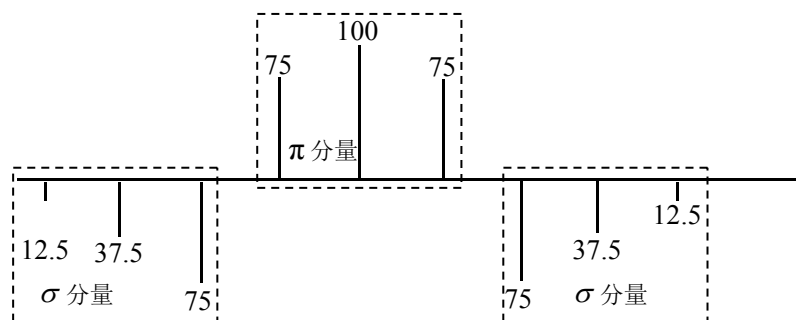


图 6-1-3 汞 546.1 nm 光谱分裂后的光谱线

这些条纹相互迭合而使观察困难。但这两种成份偏振光的偏振方向是正交的，因此我们可以利用偏振片将 σ 分量的6条条纹滤去，只让 π 分量条纹留下来。

塞曼分裂的波长差是很小的，因此需要高分辨率的分光仪器，实验中一般采用法布里—珀罗标准具（即F-P标准具）来分光，它的理论分辨率可以达到 $10^5 \sim 10^7$ 。本实验采用干涉滤光片把笔形汞灯中的546.1 nm光谱线选出，在磁场中进行分裂，用F-P标准具分光后，用读数显微镜观察并测量分裂圆的直径，然后计算出电子荷质比。

法布里—珀罗标准具是由两块平面玻璃板中间夹有一个间隔圈组成的。玻璃板的内表面镀有高反射膜。间隔圈用膨胀系数很小的材料加工成一定的厚度（本实验仪采用的是2 mm的间隔圈），以保证两玻璃板的距离不变，再用三个调节螺丝调节玻璃上的压力来达到精确平行，光路如图6-1-4所示。

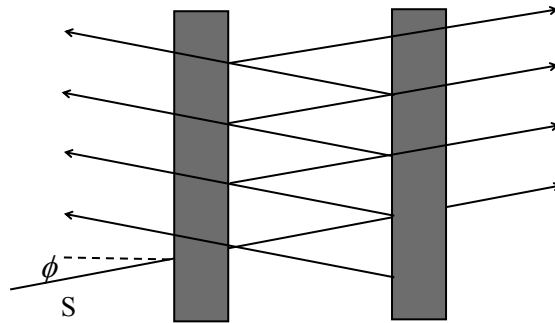


图 6-1-4 F-P 标准具光路图

法布里—珀罗标准具是多光束干涉装置，一束光以 ϕ 角射入标准具后，这束光可以在标准具的两玻璃板内表面之间进行多次反射和透射，透射平行光束经透镜会聚在它的焦平面上产生干涉，设两玻璃板内平面间距为 d ，在空气中折射率近似为 $n = 1$ ，入射角为 ϕ ，则相邻两光束的光程差 $\Delta = 2d \cos \phi$ ，形成亮条纹的条件为

$$2d \cos \phi = k\lambda \quad (6-1-5)$$

式中 k 为正整数，表示干涉条纹级次。由式(6-1-5)可以看出，满足同一入射角 ϕ 的光线，在屏上显示的干涉条纹为一圆环，属于等倾干涉。设中心亮环的干涉级次为 k ，则向外依次为 $k-1$ ， $k-2$ ，...形成一系列向外的同心圆环。当入射光波长发生微小的变化，则产生各级干涉亮环套在各相应级的亮环内外。

对同一级次有微小波长差的不同波长 λ_a ， λ_b ， λ_c 而言，如图6-1-5所示可以证明，在相邻干涉级次 k 级和 $(k-1)$ 级下有：

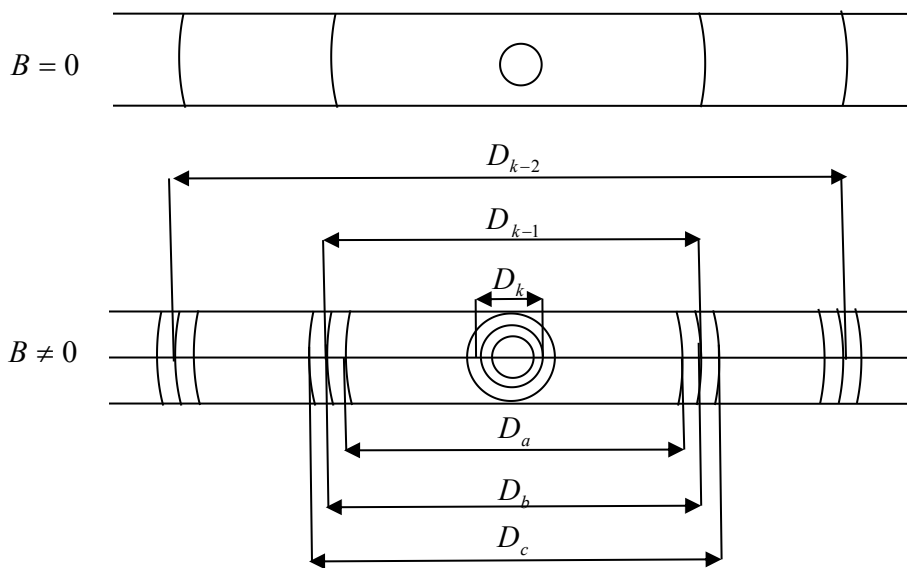


图 6-1-5 干涉圆环直径测量示意图

$$\Delta \tilde{\nu}_{ab} = \tilde{\nu}_b - \tilde{\nu}_a = \frac{1}{2d} \frac{D_b^2 - D_a^2}{D_{k-1}^2 - D_k^2} = \frac{1}{2d} \frac{\Delta D_{ba}^2}{\Delta D^2} \quad (6-1-6a)$$

$$\Delta \tilde{\nu}_{cb} = \tilde{\nu}_c - \tilde{\nu}_b = \frac{1}{2d} \frac{D_c^2 - D_b^2}{D_{k-1}^2 - D_k^2} = \frac{1}{2d} \frac{\Delta D_{cb}^2}{\Delta D^2} \quad (6-1-6b)$$

其中 d 为标准具常数。

【实验仪器】

整机结构如图 6-1-6 所示

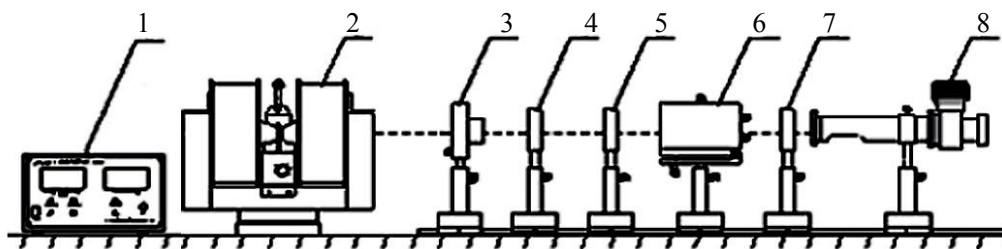


图 6-1-6 塞曼效应综合实验仪装置

1—直流稳定电源；2—直流电磁铁；3—偏振检测；4—会聚透镜；5—干涉滤光片；
6—法布里—珀罗标准具；7—成像透镜；8—读数显微镜

【实验内容和步骤】

1.按图 6-1-6 调整光学系统，调节各光学部件共轴，调整标准具。标准具 F-P 调整：根据 $2d\cos\phi = k\lambda$ ，对于某一波长同一干涉级 k ，如果在某一方向上标准具的间距 d 大，则这个方向上干涉环直径也大。所以可以直接观察标准具的干涉环进行调整，当眼睛向某一个

调整螺丝方向移动时，若花纹从中间冒出或向外扩大，说明此方向标准具间隔大，应将该方向的螺丝旋紧或放松其他两个螺丝，直到眼睛向各个方面移动时，干涉环的大小不变为止，此时 F—P 标准具的两玻璃板严格平行。

2.观察汞 546.1 nm 在 $B = 0$ 与 $B \neq 0$ 时的物理图象；转动偏振片，检查横效应和纵效应下分裂的成份；描述现象并加以理论说明。

3.测量与数据处理。本实验测量横效应的 π 成份，如图 6-1-5 所示。用测量望远镜测量出 k 级与 $k - 1$ 级各干涉圆环的直径，测出磁场 B 。利用已知常数 d 及公式 (6-1-6a) 和 (6-1-6b) 计算出 $\Delta\tilde{\nu}$ ；再由公式 (6-1-4) 计算 e/m ，并计算 e/m 测量相对误差。[标准值 $e/m = 1.76 \times 10^{11}$ (库仑/千克)]

【注意事项】

1.电磁铁在完成实验后应及时切断电源，以避免长时间工作使线圈积聚热量过多而破坏稳定性；

2.汞灯放进磁隙中时，应该注意避免灯管接触磁头；

3.笔型汞灯工作时会辐射出紫外线，所以操作实验时不宜长时间眼睛直视灯光；

4.汞灯工作需要 1500v 电压，所以在打开汞灯电源后，不应接触后面板汞灯接线柱，以免对人造成伤害；

5.面板上的励磁电源故障灯是指示电源过热工作，此时，由于内置传感器的作用，机箱内的风扇会自动启动，以加快空气流通，降低内部热量，此时最好关掉电源，过一段时间，再开启励磁电源；

【思考题】

1.如何观察和鉴别塞曼分裂谱线中的 π 成分和 σ 成分？

2.已知标准具间隔厚度 $d = 2$ mm，若磁感应强度达到 0.62 T，546.1 nm 谱线分裂中哪几条将会发生重叠？