

# 塞曼效应

王文博 合作者 陈才干 指导老师 杨新菊

(上海市邯郸路 220 号, 复旦大学, 200433)

**摘要：**本实验通过观察低压汞灯的谱线在磁场中塞曼分裂谱线,测定它们的裂距和偏振态,并推算出电子的荷质比。

**关键词：**塞曼效应; 荷质比; 偏振光

塞曼效应是指光源放在磁场中时, 谱线发生分裂的现象。1896 年荷兰著名的实验物理学家 Zeeman, 在研究磁场对谱线的影响时首次发现钠双线 D1 和 D2 都有增宽的现象。塞曼效应证明了能级的分裂是由于电子的轨道磁矩与自旋磁矩相互作用的结果。

**实验原理：**

**谱线在磁场中的能级分裂：**

对于多电子原子中的 LS 耦合, 电子之间的轨道与轨道角动量的耦合作用及电子间自旋与自旋角动量的耦合作用强, 而每个电子的轨道与自旋角动量耦合作用弱。原子中电子的轨道磁矩和自旋磁矩合成为原子的总磁矩, 并在磁场中受到力矩的作用而绕磁场方向旋进, 旋进所引起的附加能量为  $\Delta E = g\mu_B M_J$  ;

无外磁场时, 能级  $E_1$  和  $E_2$  之间的跃迁产生频率为  $\nu$  的光  $h\nu = E_2 - E_1$

加磁场后, 能级  $E_2$  和  $E_1$  都发生分裂, 发射的谱线为  $h\nu' = h\nu + (M_2 g_2 - M_1 g_1)\mu_B B$

分裂后谱线与原谱线之差  $\Delta\nu = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{\mu_B B}{h}$

**选择定则：**

跃迁角量子数变化量  $\Delta M_J=0$  , 为  $\pi$  成分, 是振动方向平行于磁场的线偏振光, 只在垂直于磁场的方向上才能观察到, 平行于磁场的方向上观察不到;

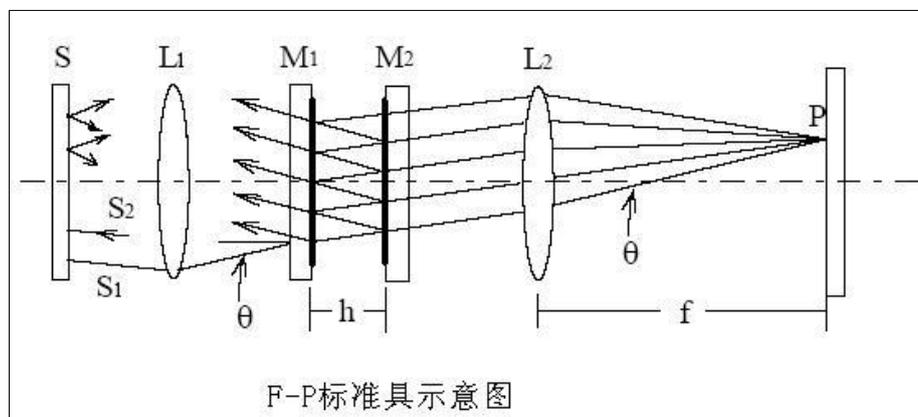
$\Delta M_J=\pm 1$  , 为  $\sigma$  成分, 垂直于磁场观察时为振动垂直于磁场的线偏振光, 沿磁场正向观察时,  $\Delta M=+1$  为右旋圆偏振光,  $\Delta M=-1$  为左旋圆偏振光。

**实验仪器:**

汞灯; F-P 标准具; 电磁铁; 滤光片; 透镜; 偏振片; 光电倍增管; 气压扫描装置; 特斯拉计; 电脑处理软件

## 实验过程:

### 1. 调节光路

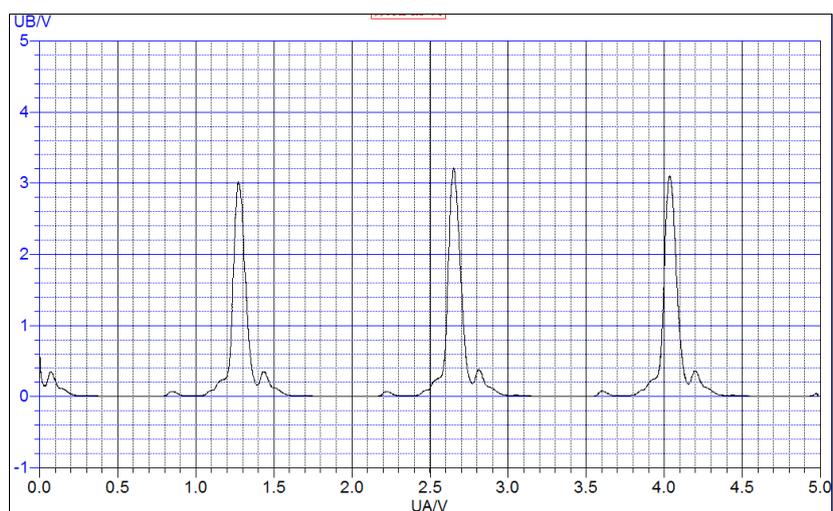


如图，实验前需要调节两部分：一是光路的准直，二是两反射镜的平行。而判断的标准是用肉眼观察从透镜 L2 射出的光线是否呈现典型的圆形衍射图样，并且当观察点移动（即观察者改变方向，位置）时光斑没有明显移动。这一调节过程比较麻烦，略有不慎就会导致光路出错，因此需要认真并且有条理的调节。

### 2. 不加外磁场下观察汞谱线

将光路接入计算机处理系统，通过调节光电倍增管的负高压，F-P 气压扫描的范围以及扫描速率，来得到正常情况下汞发射的谱线，并由此确定仪器的分辨率。

首先气压扫描装置的压强范围为-0.2—-166.2kPa；负高压增加会使得扫描得到峰高增加；扫描速率过快得到的图像不够细致，不能确定具体的波峰展宽。因此，最终负高压设为 670V，扫描速率调至第二档，得到较好结果：



每个峰代表汞的 546.1nm 谱线，旁边的小峰应是汞的其他跃迁以及汞的同位素的跃迁造成的。

为了验证仪器的分辨率满足条件  $F > 15$ ，取第二个峰的半高宽与 3 个峰两两间距的平均值：第二个峰峰高 3.23V，半高 1.615V，对应左右坐标 2.615V/2.697V，半高宽 0.082V；两峰平均间距 1.3635V，两者之比  $16.628 > 15$ ，满足要求。

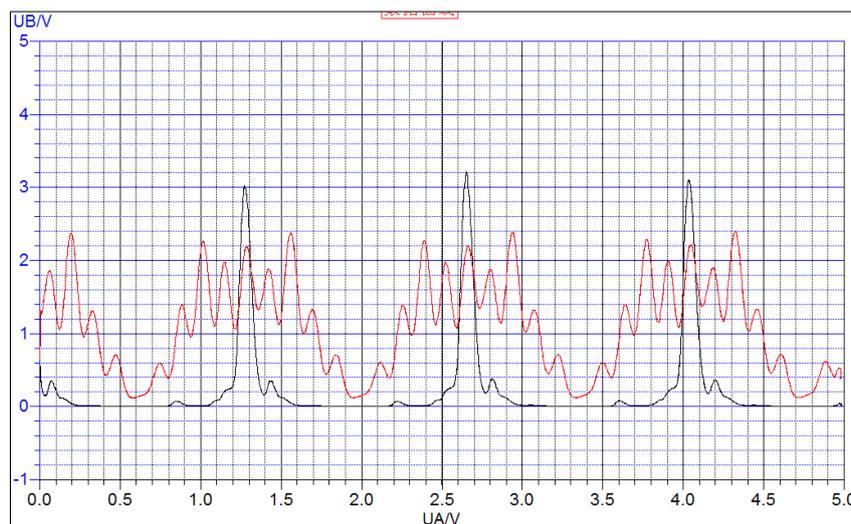
这里的数据依然会有一定误差，由于三峰高度不同，因此其半高宽也会有差距。这是来

源于采集数据时的偶然因素，属于仪器本身产生的。

### 3. 加入外磁场下汞谱线的塞曼分裂

在垂直于光线传播方向上加入一磁场，则原先一条汞光谱线会发生分裂，成为 9 条，能级差相同。在扫描图上就会出现 9 个峰一组，每个峰值的横坐标之差相同（图内横坐标  $U_a$  代表不同气压对应电压值，而电压差就表示了每两个光斑，即能级之间的差值）。通过测量电压差  $U_a$ ，进而可以算出每个分裂能级差，得到电子荷质比。

实验中选择磁场  $B=1100\text{mT}$ ，得到：



如图，原先每个能级分裂为 9 个。根据理论，中间的 3 个是选择定则  $\Delta M=0$  的  $\pi$  波，两边的 6 个是  $\Delta M=\pm 1$  的  $\sigma$  波。

将 3 组峰共 27 个的波峰对应横坐标求出，并记作  $U_{A1}-U_{A9}, U_{B1}-U_{B9}, U_{C1}-U_{C9}$ ，可得：

- A. 每组峰间距  $\Delta U_a$  平均为  $1.3806 \pm 0.0026\text{V}$ ，与之前得到的  $1.3635\text{V}$  相差  $1.254\%$ ；
- B. 一组内每个峰间距  $\Delta d$  平均为  $0.1377\text{V}$ 。

$$\text{由公式 } \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta \bar{v}_F} = \frac{\Delta \bar{d}}{\Delta U_A}, \text{ 其中 } \Delta \bar{v}_F = 1/2, \text{ 以及 } \Delta \bar{v} = \frac{1}{2} L = \frac{B}{8\pi c} \times \frac{e}{m_e}$$

可得荷质比为  $1.7108 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ ，理论值为  $1.759 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ ，相差  $2.74\%$ 。

这里的误差主要来源于：

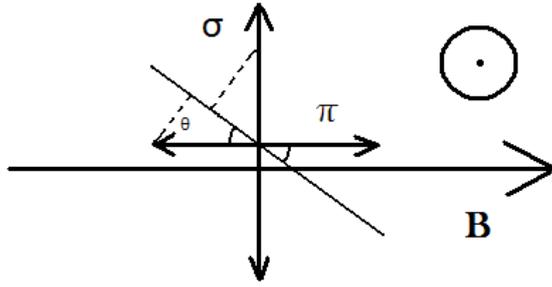
- A. 手动寻找峰值并不很准确；
- B. 实验中汞的同位素谱线以及其他谱线都叠加在图中，这样可能部分峰值有所变形，最大值位置改变。

### 4. 利用偏振片分辨谱线中的 $\pi, \sigma$ 成分

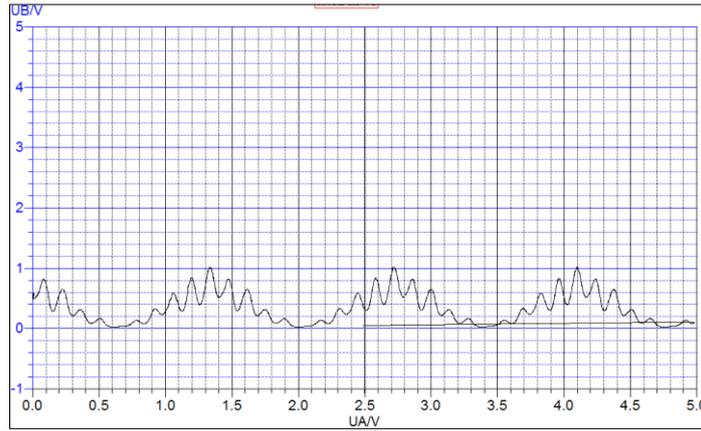
由选择定则，当  $\Delta M=0$  时，产生  $\pi$  线，沿垂直于磁场方向观察， $\pi$  线为光振动方向平行于磁场的线偏振光；

当  $\Delta M=\pm 1$  时，产生  $\sigma$  线，迎着磁场方向观察时， $\sigma$  线为圆偏振光， $\Delta M=+1$  时为左旋圆偏振光， $\Delta M=-1$  时为右旋圆偏振光。沿垂直于磁场方向观察时， $\sigma$  线为线偏振光，其电矢量与磁场垂直。

实验是由垂直于磁场，平行于光传播的方向来观察的，因此两种光都能看到。



第一次放入偏振片时不知道具体的角度，得到图形：



根据已有的知识，以上图形是两种振动方式的波的叠加。而光强是两者在偏振片方向上的投影的强度。通过对比加入偏振片前后的强度，就可以得出此时的角度。因此，通过

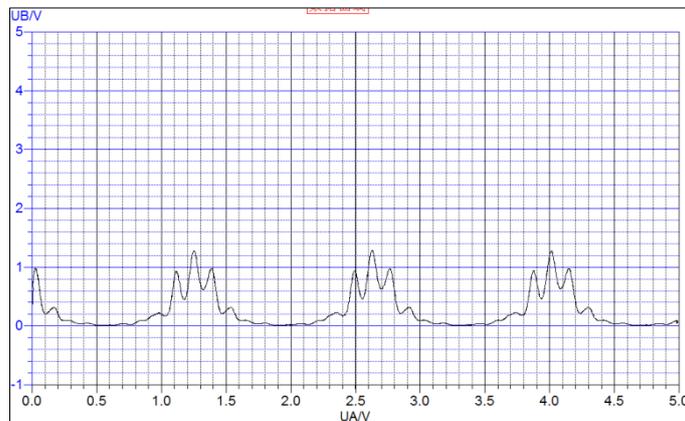
$$\frac{U_{B9'}}{U_{B9}} = M \sin^2 \theta \quad \frac{U_{B5'}}{U_{B5}} = M \cos^2 \theta$$

其中  $M$  为偏振片材质本身的吸收系数。 $U'$  表示加入偏振片后的值。

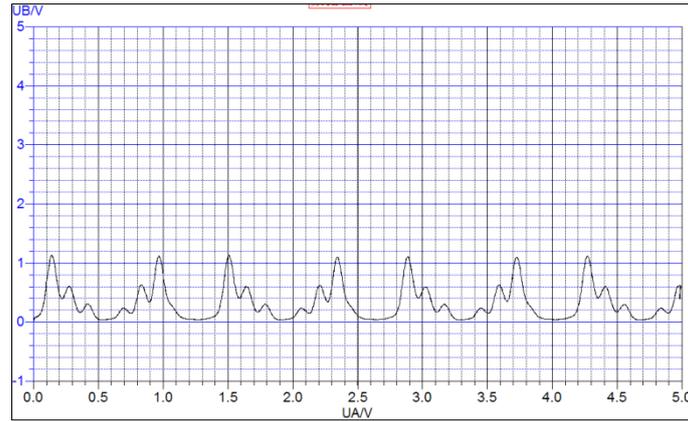
再将两者相除，消去  $M$ ，就可得到偏转角  $\theta$  值。在实验中，测得：

峰值电压/V	加入前	加入后
第二组峰中第 5 个	2.2	1.03
第二组峰中第 9 个	0.7	0.19

得到  $\theta=52.71^\circ$ ，将偏振片向同一方向转动  $35^\circ$  后得到了较好的  $\pi$  波形；朝同一方向再转动  $90^\circ$  即得到  $\sigma$  波形。



$\pi$  波



$\sigma$  波

### 实验结论:

实验利用气压扫描式 F-P 干涉仪及配套仪器观察了 Hg546.1nm 光谱的谱线。利用相邻谱线峰值计算了仪器的分辨率  $F=16.628>15$ 。观察了加入磁场后谱线分裂为 9 条。利用分裂谱线的间距计算了电子的荷质比,  $e/m_e=1.7108\times 10^{11}$  C/kg, 与理论值相差 2.738%。观察了加入偏振片后, 谱线分为  $\pi$  波和  $\sigma$  波两部分, 以及偏转不同角度对于观察到的谱线强度的影响。实验还提出了一种较快找到谱线两种偏振方向的方法。

### 致谢 :

感谢杨新菊老师对本实验的指导; 感谢白翠琴老师对于本实验的支持; 感谢陈才干同学在实验中的合作。

### 参考文献:

- 戴道宣, 戴乐山, 北京: 近代物理实验[M], 高等教育出版社, 2006  
 物理实验中心网站内容  
 赵凯华, 光学[M], 北京: 高等教育出版社, 2004  
 朱振和, 塞曼曲线的偏振特性[J], 大学物理, 2003.9, 22 (9): 21-23