

# 塞曼效应实验

林崴 06300720379 06 光科

**摘要：**本文简要介绍了用气压式 F-P 标准具做的塞曼效应实验。简述了实验背景、实验目的、实验原理、实验内容、数据处理、现象分析和思考，并就结果进行讨论。

**关键词：**汞 546.1nm 谱线；塞曼效应； F-P 标准具平行度调节；

## 1 塞曼效应实验简介

1896 年，荷兰物理学家塞曼发现钠光源放在足够强的磁场中，双线在磁场中都有增宽现象，即原来的钠双线分裂成几条光谱线。从而得出了：把产生光谱的光源置于足够强的磁场中，一条谱线即会分裂成几条偏振化的谱线——这种现象称为塞曼效应。

塞曼效应的发现是对光的电磁理论的有力支持，证实了原子具有磁矩和空间取向量子化，使人们对物质光谱、原子、分子结构有更多了解。同时有力地证明了电子自旋假设是正确的，能级的分裂是由于电子的轨道磁矩和自旋磁矩相互作用的结果。

## 2 实验目的

1. 了解塞曼效应在研究原子内部结构方面的应用
2. 了解各仪器的作用，F-P 标准具的使用
3. 学习观察低压汞灯的谱线在磁场中塞曼分裂谱线，观察偏振态

## 3 实验原理

### 3.1 原子中的电子的磁矩和角动量

$$\text{总磁矩} \quad \mu = \mu_l + \mu_s = -(g_l L + g_s S) \frac{\mu_B}{\hbar}$$

其中， $\mu_l$  为轨道磁矩， $\mu_s$  为自旋磁矩。 $\mu_B$  为玻尔磁子， $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c} = 0.5788 \times 10^{-4} \text{eV/T}$

当有外磁场时，原子中总磁矩只有平行于 J 的分量起作用，成为有效磁矩，用  $\mu_J$  表示。

$$\mu_J = g \frac{\mu_B}{\hbar} J \quad \text{其中 } g \text{ 为朗德因子, } g = 1 + \frac{j(j+1) - l(l+1) + s(s+1)}{2j(j+1)}$$

### 3.2 塞曼效应

$$\text{在外磁场中, 磁矩具有一附加取向势能} \quad \Delta E = g \mu_B B M_J$$

其中， $M_J$  可以在  $-J$  和  $J$  之间取  $2J+1$  个整数值。因此，无磁场中的一个能级，在磁场的作用下因具有  $2J+1$  个附加能量而分裂成  $2J+1$  个支能级。它相对于原来能级的移动为  $\Delta E$ 。

设某一光谱线是由能级  $E_2$  和  $E_1$  之间的跃迁而产生的，则其谱线的频率  $\nu$  同能级有：

$$h \nu = E_2 - E_1$$

在外磁场作用下，从上能级各子能级到下能级各子能级的跃迁产生的光谱线频率  $\nu'$ ：

$$\begin{aligned} h\nu' &= (E_2 + \Delta E_2) - (E_1 + \Delta E_1) \\ &= (E_2 - E_1) + (\Delta E_2 - \Delta E_1) \\ &= h\nu + (M_J^{(f)} g^{(f)} - M_J^{(i)} g^{(i)}) \mu_B B \end{aligned}$$

因此，有磁场时的谱线与原谱线的频率差为：

$$\nu' - \nu = (M_J^{(f)} g^{(f)} - M_J^{(i)} g^{(i)}) \frac{\mu_B B}{h} = (M_J^{(f)} g^{(f)} - M_J^{(i)} g^{(i)}) L$$

换以波数差来表示

$$\Delta \tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu' - \nu}{c} = (M_J^{(f)} g^{(f)} - M_J^{(i)} g^{(i)}) \frac{L}{c}$$

$$\frac{eB}{4\pi mc}$$

其中  $L = \frac{eB}{4\pi mc}$  称为洛仑兹单位。  $L = 46.68 \text{B/m}$ , B 的单位用 T (特斯拉)。

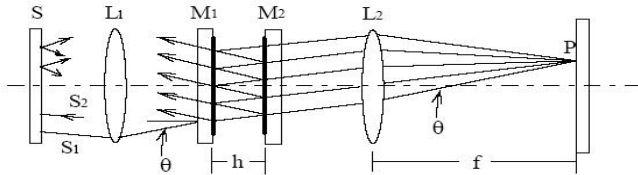
### 3.3 选择定则

$$(1) \Delta J = J_2 - J_1 = 0, \pm 1, \text{ 但 } J_2 \text{ 和 } J_1 \text{ 不能同时为零。} (2) \Delta M_J = M_{J_2} - M_{J_1} = 0, \pm 1.$$

当  $\Delta M_J = 0$ ，为  $\pi$  成分，沿磁场方向不可见。

当  $\Delta M_J = \pm 1$  时，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。

### 3.4 F-P 标准具



在透镜的焦平面上发生干涉、光程差为波长整数倍时产生干涉极大值： $\Delta = 2nt \cos \theta = m \lambda$   
不同的干涉级数  $m$  对应不同的入射角  $\theta$ 。在扩展光源照明下，F-P 标准具产生等倾干涉，它的干涉花纹是一组同心圆环。

$$\frac{\lambda}{\delta \lambda} = \frac{2\pi t}{\lambda} \frac{\sqrt{R}}{1-R}$$

F-P 标准具的分辨本领

$$\text{自由光谱范围 } \Delta \lambda_F = 1/2t \qquad \text{F-P 标准具的精细度 } F = \frac{\Delta \lambda_{\pi}}{\delta \lambda} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R}$$

精细度的物理意义是相邻两个干涉级数花纹之间能够被分辨的干涉花纹的最大数目。单从上式看，精细度只依赖于反射膜的反射率，反射率愈高，要求的平整度也越高，两者应互相匹配。

### 谱线的线宽

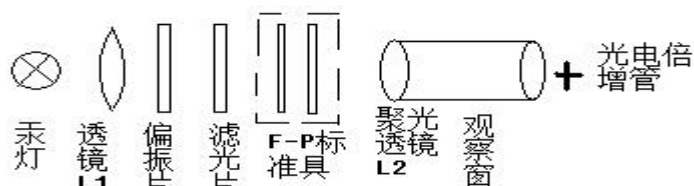
谱线的线宽由自然加宽、多普勒展宽、碰撞展宽造成。

## 4 实验内容

1. 调节 F-P 平行度
2. 开启软件扫描无磁场时的汞灯谱线
3. 加上磁场，扫描汞 546.1nm 谱线的塞曼分裂谱线
4. 加上偏振片，扫描谱线的  $\sigma$  成分和  $\pi$  成分

## 5 实验分析

### 5.1 实验主体基本仪器功能及其调节



①**汞灯**：由于谱线的宽度主要是由光源决定的，因此，为了从本质上提高分辨率，应选择低压放电光源。本实验所用汞灯为细长状，管径小，可以大大减小磁铁的磁极间隙。

汞灯由 He-Ne 激光源激发，其光亮会伤害到眼睛，应避免长时间看汞灯，可以用一个罩子将除了透镜方向以外的光遮住。

②**透镜 L1**：将汞灯发出的发散光变成平行光，更多地收集到 F-P 标准具上。故汞灯应该在 L1 的焦平面上。

③**滤光片**：滤去与实验无关波段（如紫外）的光，避免了干扰。

④**L2 聚光透镜**：将经过 F-P 标准具后的平行光聚焦到观察窗尾部，即光电倍增管入口处。

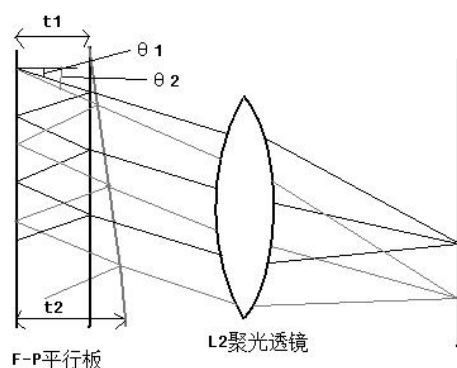
⑤**实验时应该先调节自准直**，使光从光电倍增管射出后，经 F-P 标准具后反射出射孔。将所有器件调至同一水平高度后，调整 L1 至从毛玻璃中看到的光环与光带均在中心。因为光电倍增管只采集中心处的光。

### 5.2 F-P 标准具的平行度调节

为了提高实验稳定性，本实验采用气压扫描的方式，固定间隔环的 F-P 标准具，通过改变 F-P 标准具两平行板间气压 P 来改变折射率 n，最终改变光程差  $\Delta$ 。这样，扫描时不会破坏二镜的平行性。采用固定间隔环的 F-P 标准具的稳定性好，对震动干扰不敏感。

**粗调平行度**：在观察窗尾接小孔，增大气压 P，从小孔中观察，若条纹往某个方向移，那个方向较薄，应该增大它的厚度。最终视野中应该是一片亮或者暗。

**精调平行度**：将小孔拿开，直接观察圆环。移动眼睛的位置使圆环在视场中向某个方向移，观察圆环的吞吐情况。



如图 F-P 标准具中两平板不平行情况分析：

光程差  $\Delta = 2nt\cos\theta = m\lambda$  时产生圆环。

对于同一级次衍射圆环（假设 m 级，

$t_1 < t_2$ ，故  $\cos\theta_1 > \cos\theta_2$ ，即  $\theta_1 < \theta_2$

在  $t_2$  处要达到同一级衍射圆环所需的  $\theta$  角比厚度均为  $t_1$  时大，这样也导致了出射的平行光经过 L2 聚焦后的斑点下移了，也就是相邻级次间的距离变大了，圆环变稀疏。

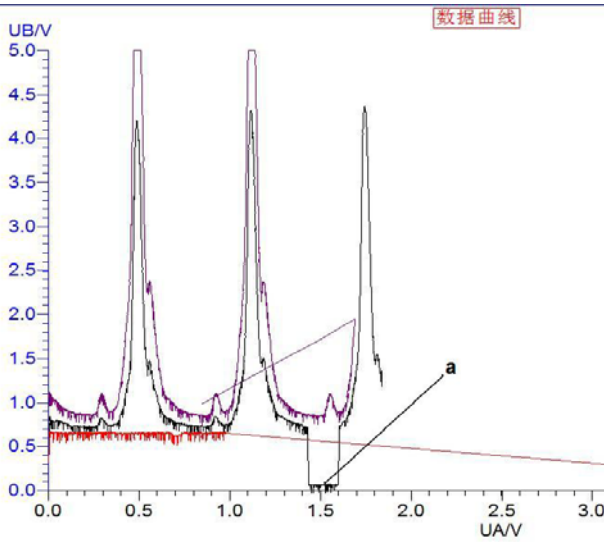
故眼睛往某一方向移动时，圆环往反方向移动，若圈圈向外吐出，说明相邻级次之间

距离变大，也就是这个方向的厚度较厚，要将此方向上的螺丝逆时针旋转，使之变薄。直

至眼睛在各个方向上移动时，圆环均不出现吞吐情况，则可以认为 F-P 标准具的平行调节基本完成。打开光电倍增管，将微电流计调至  $10^{-9}$  档，打开高压电源。开始扫描图像并且继续微调平行度。直至图像中主峰旁边可以观察到汞的同位素的小峰。

本实验中所用光电倍增管与“ $\gamma$ 能谱仪”实验中的有所不同。它工作的暗电流小，对时间的响应不敏感，而对光强的响应很敏感，避免了杂散光使要采集的信号淹没实验要在暗室中进行。并且采集的过程中要避免碰到导线，因为微电流很敏感。

### 5.2 观察汞 546.1nm 谱线



光电倍增管的放大倍率。

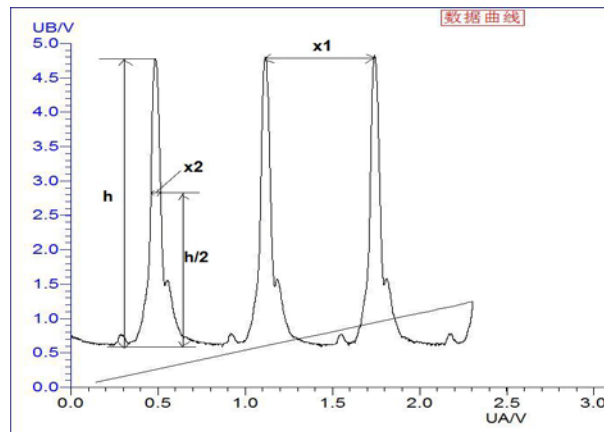
#### 2.1 初调，微电流计、噪声、高压对谱线的影响

如图为初调处同位素小峰时的图形。

其中低谷“a”为改变了微电流量程至  $10^{-8}$  档后的图像。说明微电流计的放大量程决定了图像的幅度。

红色的一组线为将汞灯关闭后，扫描出的噪声组，用做对比作用。对比后可以得出，汞灯谱线上的毛刺是由于噪声引起的，不是汞谱线本身的不稳定因素造成的。故在后面的分析中可以用曲线平滑来平均噪声的干扰。

紫色的一组线为高压较大的一组，其超量程了。说明高压的大小决定了光电倍增管的放大倍率。



#### 5.2.2 较好的 Hg546.1nm 谱线

##### 精细度

$$=x1/x2=(1.108-1.752)/(1.098-1.134)=17.9>15$$

说明测出的 F-P 标准具的精细度符合实验要求。

自然线宽：由  $\Delta \nu * \tau \approx 1/2 \pi$ ，

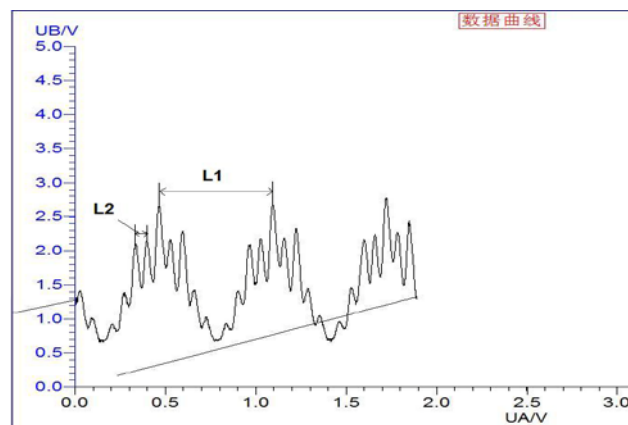
$$\tau \approx 10^{-8} s \text{ 得 } \Delta \nu = 1.6 * 10^7 \text{ Hz}$$

多普勒展宽： $\frac{\Delta \nu}{\nu} = 3 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{T}{A}}$ ，而对于

汞 546.1nm 谱线， $A=200.59$ ，所以  $\Delta \nu' = 2.6 * 10^8 \text{ Hz}$

由上可以看出，谱线的宽度主要由光源本身决定。

### 5.3 观察汞 546.1nm 谱线的塞曼分裂



#### 1. 计算塞曼分裂间隔 $\Delta \nu$

自由光谱范围  $\nu_F = 1/2nt = 250.3$

L1 对应于  $\nu_F$ ，L2 对应于  $\Delta \nu$

因此， $\Delta \nu = L2/L1 * \nu_F$

将 L1、L2 分别求处平均后，代入上式，

$$\Delta \nu = 0.065/0.629 * 250.3$$

=25.87±0.437

## 2. 计算电子的荷质比

因为 9 条谱线中相邻谱线的间隔为  $\frac{1}{2}$  个洛伦兹单位，即  $\frac{1}{2}L$ 。

$$\Delta v = \frac{1}{2}L/c = \frac{1}{2}eB/4\pi mc$$

所以  $e/m = (\Delta v * 4\pi c) / (\frac{1}{2}B) = 1.95 * 10^{11} \pm 0.11 * 10^{11} \text{V/kg}$

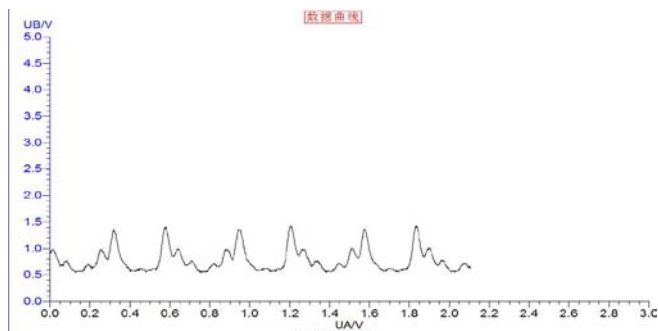
其中，由高斯计测出  $B=1\text{T}$ （单次测量误差 0.052T）

标准值  $e/m = 1.6 * 10^{-19} / 9.3 * 10^{-31} = 1.72 * 10^{11} \text{V/kg}$ 。实验误差为 13.3%。

以上计算得出，误差主要是由于 B 的不确定度引起的。由于 B 只进行了一次测量，且高斯计较难很好地放在磁场中（空间因素），在测量时要使高斯计截面较大的那面垂直于磁场，不易把握。测量时，指针会晃动，给记录读数也带来较大的困难。若改进实验应从提高测量磁场的精度入手。

塞曼效应时的外磁场为弱磁场。因为强磁场可能会破坏原子能级的精细结构。外磁场较弱时，L、S 绕 B 旋进速度较小，它对 L、S 绕 J 旋进的影响不大，对原子能级的精细结构影响也就不大。若外磁场较强，磁场和原子磁矩的相互作用超过自旋-轨道相互作用时，LS 将不再绕 J 旋进，不再耦合成 J，破坏了精细结构。在强磁场中原子谱线的分裂成为帕邢-巴克效应。

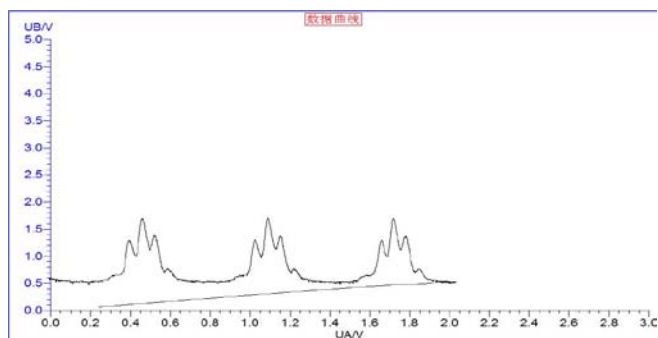
## 5.4 观察分裂谱线的偏振成分



本实验是垂直于磁场方向观察塞曼分裂，在不加偏振片的情况下应该可以观察到  $\sigma$ 、 $\pi$  成分的 9 条谱线。如上所分析，9 条谱线的间隔一样。

$\sigma$  谱线的偏振方向垂直于磁场，故将偏振片的方向为竖直时，观察到了如左图的 6 个  $\sigma$  谱线小峰。

$\pi$  谱线的电矢量平行于磁场方向，故偏振片的偏振方向为水平时，看到了  $\pi$  成分的 3 个峰。



若在沿着磁场的方向观察的话，只能观察到  $\sigma$  成分的 6 条谱线。原因是  $\pi$  谱线的电矢量平行于磁场方向，所以沿着磁场方向看不到  $\pi$  成分。

## 6 实验总结

通过本次塞曼效应实验，观察到了 Hg546.1nm 谱线的分裂，学习并探究了磁场对能级分裂的影响，原来的 1 条谱线在磁场的作用下分裂成了 9 条谱线，有力地证明了能级分裂是由于电子的轨道自旋相互作用的结果。

在实验调节仪器的过程当中，锻炼了自己的耐心以及对实验严谨的科学态度，通过了自己亲身做实验，对书本中有关能级越前的只是有了更具体的了解与认识。

## 致谢

感谢实验室每一位老师在我实验中的指导，感谢白老师的耐心教导，并对各种可能的情况予以分析，让我的思维得到了很大的拓展，在此向您们表示诚挚的感谢。同时感谢一学期中与我合作非常愉快的项晓辰同学，让我得到了很多的新的思路和好的建议。

## 参考文献

- 【1】戴乐山，近代物理实验。复旦大学出版社，2006。
- 【2】杨福家，原子物理学。高等教育出版社，2000。
- 【3】郑广垣，近代物理。复旦大学出版社，1990. 8。