

# 观测 Hg 546.1nm 线 Zeeman 效应并测量电子质荷比

16307110262 俸昊嵘<sup>1</sup>

(1.复旦大学物理系, 上海 200433)

**摘要:** 本实验使用气压式 Fabry-Pérot 干涉仪观测了 Hg 546.1nm 线光谱及其 Zeeman 效应, 并使用偏振片筛选其  $\pi$  成分与  $\sigma$  成分, 且通过测量光谱的 Zeeman 分裂间距, 得到电子质荷比  $e/m_e = (1.71 \pm 0.07) \times 10^{11} \text{C/kg}$ 。

**关键词:** Zeeman 效应; 电子质荷比;  $\pi$  成分;  $\sigma$  成分; F-P 标准具

Zeeman 效应在 1896 年由 P. Zeeman 发现, 即光源放在强磁场中时, 原来的一条光谱线分裂成几条光谱线; 分裂的谱线成分是偏振的, 分裂的条数随能级的类别而不同。本实验使用已知标准具间距的气压式 Fabry-Pérot 干涉仪, 观测了 Hg 546.1nm 线的 Zeeman 效应; 通过偏振片滤光, 分辨了谱线中的  $\pi$  成分与  $\sigma$  成分; 并通过测量 Zeeman 分裂间距及 F-P 具的自由光谱范围之比与所加磁场, 计算电子质荷比。

## 1 实验原理

### 1.1 理论原理: Zeeman 效应及其偏振特征<sup>[2]</sup>

Hg 的 546.1nm 线为  $^3P_2$  向  $^3S_1$  跃迁的谱线。对  $^3S_1$ , 精细结构耦合的  $J=1$ ; 对  $^3P_2$ ,  $J=2$ 。

当外加磁场  $\mathbf{B}$ , 谱线 Zeeman 分裂为  $(2J+1)$  个间距相等的 Zeeman 子能级, 以磁量子数  $M = -J, -J+1, \dots, J$  表示。 $\mathbf{B}=0$  时, 各 Zeeman 子能级则简并。设 Bohr 磁子  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ , 则附加在各子能级上的  $\mu$  与  $\mathbf{B}$  相互作用能

$$E = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = M g \mu_B B \quad (1)$$

其中, Landé 因子 
$$g = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (2)$$

能级间的跃迁要求满足定则: 
$$\Delta M = 0, \pm 1 \quad (3)$$

则可以画出 Grotrian 图, 如图 1。9 条跃迁线可被分为  $\Delta M$  不同的 3 组, 分别为  $\Delta M = -1$  的左旋圆偏振  $\sigma^+$  (图 1 中为  $\delta^+$ ; 下同)、 $\Delta M = 1$  的右旋圆偏振  $\sigma^-$  和  $\Delta M = 0$  的  $\pi$ 。

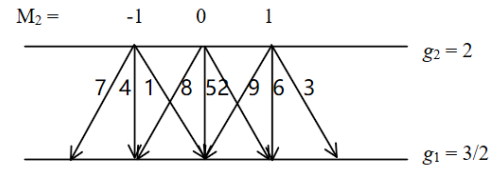


图 1 Hg 546.1nm 线的 Grotrian 图

通过 Grotrian 图读出各跃迁的  $\Delta(Mg)$ , 并计算对应能级差 (表示为波数差)

$$\Delta\tilde{\nu} = \Delta(Mg) \frac{e}{4\pi m_e c} B \quad (4)$$

可以得到, 546.1nm 线分裂为等间距的 9 条谱线 ( $\Delta(Mg) = M_2 g_2 - M_1 g_1$  从小到大为  $-2, -3/2, -1, -1/2, 0, 1/2, 1, 3/2, 2$ , 分别用 1~9 在图 1 标记; 相邻谱线间距对应  $\Delta\Delta(Mg) = 1/2$ ), 其中  $\Delta\tilde{\nu}$  最大的三条为  $\sigma^+$ ; 最小的三条为  $\sigma^-$ ; 中间的三条为  $\pi$ 。

实验中, 垂直于  $\mathbf{B}$  方向横向观察, 得到的偏振特性如图 2。

### 1.2 仪器原理: 气压式 F-P 干涉仪<sup>[3-5]</sup>

Fabry-Pérot 干涉仪是一种高分辨率分光仪器, 由两块高反射率的平行板 (如

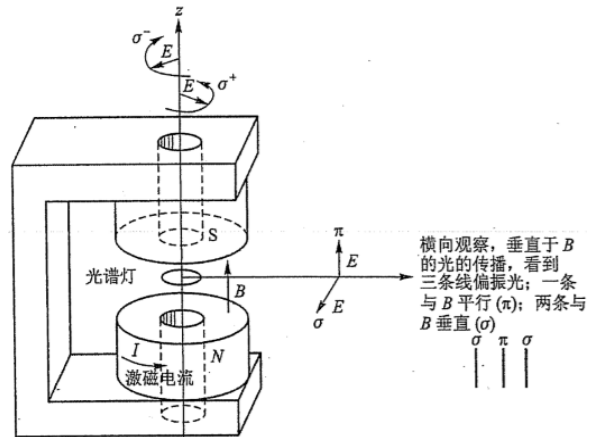


图 2 横向观察的偏振特性<sup>[2]</sup>

石英)组成,如图3。它是长度基准传递的工具之一,因此又称作F-P标准具。其原理为多光束等倾干涉。

对入射的角度 $\theta$ ,相位为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = \frac{4\pi}{\lambda} nl \cos \theta \quad (5)$$

即波数 $\tilde{\nu} = \lambda^{-1} \propto n$ 。

透射率

$$T_e = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos\delta} = \frac{1}{1+F\sin^2\frac{\delta}{2}} \quad (6)$$

其中 $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$ ,  $R$ 为内界面反射率。

相位差为整周期时,透射率为1;而因 $R$ 接近1, $F$ 较大,几乎对所有的相位差非整周期时的透射率几乎为0,这样就实现了挑选波长,压缩线宽的作用,表现为透射并聚焦在光屏的图像是同心的细亮环。

在光轴处 $\theta=0^\circ$ ,由(5)得自由光谱范围(相邻两个使中心点有强透射光的波数之差)为

$$\Delta\tilde{\nu}_F = 1/(2nl) \quad (7)$$

其中 $l$ 为标准具间距。

气压式F-P具,是认为F-P具腔内的空气折射率 $n$ 与腔内气压 $p$ 线性相关,故采用气泵改变气压 $p$ ,而间接改变 $n$ ,以实现基于(5)的扫描,并认为X轴上的距离 $\Delta X \propto \Delta\tilde{\nu}$ 波数差。不过, $n$ 的数值变化很小,在用(7)计算时又可直接近似为1。

## 2 实验方法和步骤<sup>[5-6]</sup>

本实验装置(主体部分为“精诚光电子”PSZ-4塞曼效应实验仪)如图4所示。其中,磁铁间的“\*”形图案是笔形Hg灯(苏州大学科教仪器厂)。永磁铁可以放下到Hg灯之外;也可以提起,使Hg灯位于磁铁两极中间。偏振片P可以去除,也可以手动调节其角度。滤光片IF只透过实验研究的546.1nm线。F-P具间距 $l=1.998\text{mm}$ 。焦面小孔光阑Ph与光电倍增管可以撤下,以肉眼或摄像器材置于聚焦处,直接观察焦面上的成像。气泵可以以不同抽/送气速度,控制F-P具内的加压/降压。CYG01型压阻式压力传感器精度为D级。“腾飞”电脑化X-Y记录仪的X轴记录传感器感受的气压;Y轴为透过焦面小孔的光强(均为arb. unit)。计算机上配套的程序中有将图线、数据“平滑化”的功能。此外,使用“Hengtong”HT201型高斯计测量磁铁间磁场。

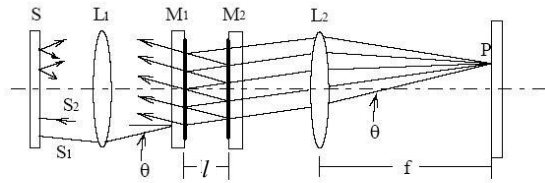


图3 F-P标准具示意图

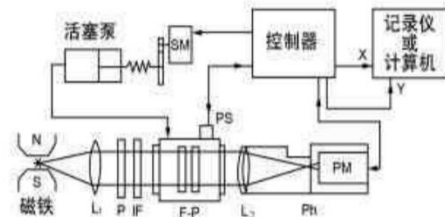


图4 塞曼效应实验装置

$L_1$ —聚光透镜 P—偏振片 IF—干涉滤光片 F-P—气压扫描标准具  $L_2$ —成像透镜 Ph—焦面小孔光阑 PM—光电倍增管 SM—步进电机 PS—气压传感器 NA-II 组合表

### 2.1 调节光路、气泵

调节光路,使各光具中心大致在光轴上;调节F-P具平行度。摘下小孔光阑与光电倍增管,肉眼向F-P具内望去,观察到如图5的绿色同心等倾干涉圆环。若加磁场,可以看到这些环各自又分裂为数个同心环。

打开气泵通气孔时,调气压为“0”(相对于大气压的值)。

### 2.2 观察无磁场与加磁场时光谱

装回小孔光阑与光电倍增管,不放置偏振片,不放上磁场,通过升/降压扫描F-P具内的气压,测量透过光阑的光强,

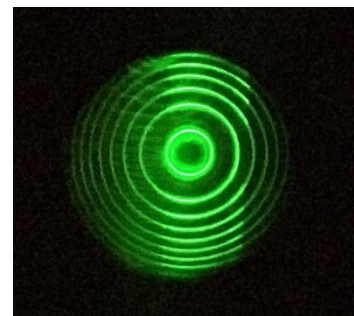


图5 观察到的干涉圆环

观察 X-Y 记录仪图像。确认精确度足够高 (Zeeman 子能级半高宽小于 1/15 周期)。

然后, 将永磁体提上来, 再次扫描气压, 得到加磁场之下的 Hg 光谱。

### 2.3 观察 $\pi$ 成分与 $\sigma$ 成分

加上偏振片调节其角度, 设法使与  $B$  垂直的  $\sigma$  光成分消失 (被滤去), 仅留下中间三条  $\pi$  光谱线, 观察。将偏振片旋转  $90^\circ$  并微调, 使与  $B$  平行的  $\pi$  光消失, 仅留下  $\sigma$  光谱, 观察。

### 2.4 测量电子荷质比

测量 2.2 中得到的 Zeeman 分裂的光谱中的  $L$ : 最近两个相同的 Zeeman 子能级之间的距离 (即 F-P 具相位差一周导致的一个周期); 以及  $d$ : 两个 Zeeman 子能级之间的距离。

根据  $\frac{d}{L} = \frac{\Delta\tilde{\nu}}{\Delta\tilde{\nu}_F} = \frac{e}{m_e} \frac{Bl}{4\pi c}$ , 用高斯计测量磁场  $B$ , 算出电子质荷比

$$\frac{e}{m_e} = \frac{4\pi cd}{LBl} \quad (8)$$

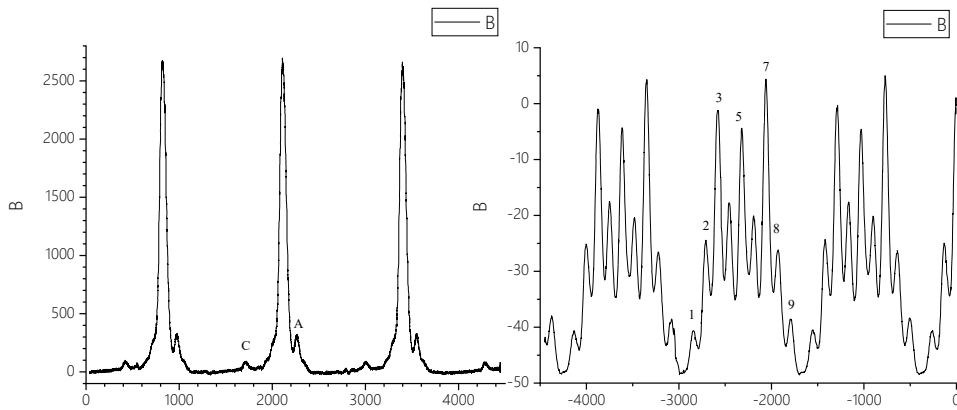


图 6 无磁场的图像

图 7 加磁场的图像

## 3 实验结果和分析

### 3.1 无磁场时的光谱

无磁场时得到如图 6 的光谱。其中, 除了最高的主峰外, 其附近还可见 C, A 峰。但 h, f 等峰无法被直接观测到。上述峰指 Hg 的  $m=199, 201$  同位素的  $F=I+J$  耦合产生的超精细结构能级, 其理论如图 8。[7]

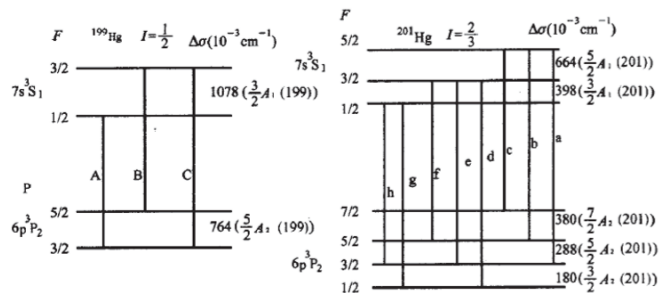


图 8 Hg 的同位素超精细结构能级间距理论值

### 3.2 加磁场后的光谱

加磁场后得到如图 7 的光谱。可以看到, 谱线每个周期出现 9 个间距相等, 强度不一的峰, 符合理论。为了表述方便, 按波数从小到大依次称为峰 1~9。

9 个峰强度大小大概可以分为 3 个层次:  $(3,5,7) > (2,4,6,8) > (1,9)$ 。比较、分析各个峰强度大小可得:

从  $M_2 = +1$  出发, 最倾向于增加  $M$  到 2; 最不倾向于减小  $M$  到 0;

从  $M_2 = -1$  出发, 最倾向于减小  $M$  到 -2; 最不倾向于增加  $M$  到 0;

从  $M_2 = 0$  出发, 最倾向于维持  $M = 0$ 。

9 个峰的强度显示出左右对称性。分析, 左右对称对应的 2 个峰的初始能级  $M_2$  与目标能级  $M_1$  为相反数, 因此强度应该相当。而些微不对称性 (如峰 7 高于峰 3) 可能源于 A、C 等超精细结构峰的叠加。

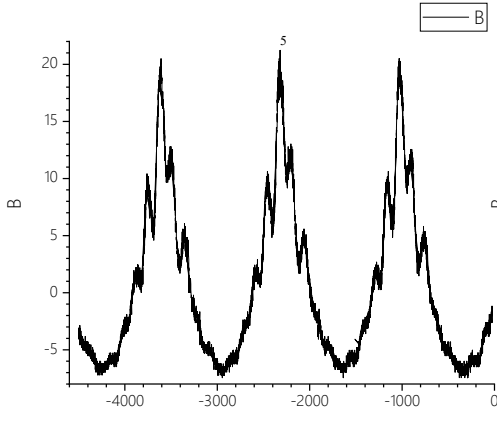


图9  $\pi$  成分

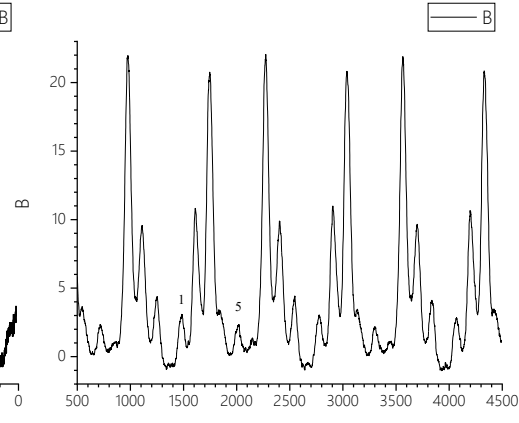


图10  $\sigma$  成分

### 3.3 观察 $\pi$ 成分与 $\sigma$ 成分

按照步骤 2.3 得到  $\pi$  成分与  $\sigma$  成分的图像，分别如图 9，10；图线的“粗细”不同是由于  $\sigma$  成分图像用“平滑化”处理过，数据的涨落被去掉了，而图 9 未处理；但“平滑化”与否不影响图线各特征峰本身的显现。

可以看出， $\pi$  成分包含峰 4, 5, 6；而  $\sigma$  成分包含峰 1, 2, 3, 7, 8, 9。这符合前述理论。

$\pi$  成分图的峰 3、7 与  $\sigma$  成分的峰 5 均难以去除。这可能是因为手动调节比较粗糙，无法使滤光片恰好到达与  $B$  垂直/平行的角度；也可能是某些超精细结构能级在此处显现。

### 3.4 测量电子荷质比 $e/m_e$

计算中物理常数统一取 CODATA 2018 值<sup>[1]</sup>： $c = 299792458 \text{ m/s}$ ；（理论值） $e/m_e = 1.75882001076(53) \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 。实验室给出的 F-P 器  $l = 1.998\text{mm}$ ，也视为精确。

将图 7 对应数据的三个完整周期中的各个峰位置记录下来，分别按周期中位置与所属周期做线性拟合，分别求出 3 组的  $L$  和 9 组的  $d$ （设同周期内相邻峰间距  $L$ ，以及不同周期对应的同一峰之间距离为  $d$ ），分别取平均值计算不确定度（拟合得到的不确定度与取均值时不确定度的叠加），得到  $d = 130.8 \pm 0.5$ ； $L = 1291.4 \pm 1.9$ 。高斯计测量  $B = (1.12 \pm 0.02) \text{ T}$ 。

根据(8)得， $e/m_e = (1.706 \pm 0.017) \times 10^{11} \text{ C/kg}$ ，比理论值偏低 3.0% 或 1.7 个标准差。

### 3.5 测量 $e/m_e$ 的误差分析

磁场  $B$  的相对不确定度为 1.8%，是结果不确定度的主要贡献。不确定度主要来源于估读；因为高斯计的使用特点是需要手持高斯计调整其位置、方向使探头感应面与磁场垂直，表现为很容易读到比实际值更低的读数（因此实验中读最大值的数据）；且读取数据的位置也无法准确代表 Hg 灯之前所在的位置，所以这样的磁场测量是略为粗糙的。

$d$  与  $L$  是通过 Zeeman 分裂光谱的各峰峰位得出的。在所采取的统计中，各个峰地位均等；而如果直接计算出各个  $L$ 、 $d$  取均值则会受较多中间数据的影响。造成峰位置偏离的可能原因较多，包括基底（含有各种超精细结构的峰）叠加在峰附近，造成峰值的读取数值向基底的“坡”处偏离；X 轴数据与实际光谱波数位置不匹配，比如气压感应器未准确或实时反映 F-P 器间距处气压、气压与折射率间关系偏离线性等；谱线存在一定宽度造成读取峰值的偏离（可能是因为谱线本身结构导致展宽，或 F-P 具导致）；等等。

$d$  的相对不确定度为 0.4%，不是  $e/m_e$  相对不确定度的主要贡献。 $L$  的绝对标准差比  $d$  稍大，也是由于读取峰位置的偏差，但  $L$  比  $d$  大一个量级，因此相对不确定度仅为 0.15%，也不是  $e/m_e$  相对不确定度的主要贡献。

要确定产生误差的具体原因并降低误差，还需要更为深入、精细的实验以验证、测量。

## 4 实验结论

本实验使用气压式 Fabry-Pérot 干涉仪观测了 Hg 546.1nm 线光谱；并施加磁场观察了其 Zeeman 效应，验证了该线的 Zeeman 效应特点是：有 9 条间距相等，几率不一，且几率大致以初始与目标能级相反数为对称的谱线；并使用偏振片筛选其  $\pi$  成分与  $\sigma$  成分，验证了  $\pi$  成分为位置在中间的 3 条谱线，而  $\sigma$  成分为两旁的其他 6 条谱线。

并且，通过测量所施磁场  $B$ ，以及所得光谱上 Zeeman 分裂间距与已知物理值的 F-P 具自由光谱范围之比，采用线性拟合法，得到电子质荷比  $e/m_e = (1.706 \pm 0.017) \times 10^{11} \text{ C/kg}$ ，相对不确定度 1.8%，比理论值偏低 3.0% 或 1.7 个标准差。然后，对这一测量的误差进行了分析，高斯计测磁场  $B$  是此次测量中  $e/m_e$  相对不确定度的主要贡献。

### 附表：图 7 读得的峰位置数据

-4132.989	-2841.499	-1550.550
-4003.789	-2708.593	-1419.925
-3878.271	-2580.969	-1293.201
-3750.945	-2456.750	-1165.029
-3614.364	-2321.237	-1029.130
-3480.211	-2192.390	-900.391
-3352.695	-2059.805	-770.711
-3223.863	-1927.786	-639.136
-3079.147	-1794.574	-504.390

### 参考文献：

- [1] CODATA Internationally recommended 2018 values of the fundamental physical constants. <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>.
- [2] 杨福家. 原子物理学[M], 4e. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [3] 赵凯华. 新概念物理教程: 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [4] Wikipedia - Fabry-Pérot interferometer. [https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry-Pérot\\_interferometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry-Pérot_interferometer).
- [5] Fudan Physics Teaching Lab. <http://phylab.fudan.edu.cn/doku.php?id=exp:zeeman>.
- [6] 吴思诚, 王祖铨. 近代物理实验[M], 2e. 北京: 北京大学出版社, 1995.
- [7] 陈星, 潘正权. Hg 绿谱线超精细结构分析及相互作用常数计算[J]. 大学物理, 2006, 25(6): 36-39.