

Hg 546.1nm 线 Zeeman 效应观测与测量电子质荷比

16307110262 俸昊嵘¹

(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 π 成分与 σ 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; π 成分; σ 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 π 成分与 σ 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^[2]

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 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。 $B=0$ 时, 各 Zeeman 子能级则简并。设 Bohr 磁子 $\mu_B = \frac{eh}{2m_e}$, 则附加在各子能级上的 μ 与 B 相互作用能

$$E = -\mu \cdot B = M g \mu_B B \quad (1)$$

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 ΔM 不同的 3 组, 分别为 $\Delta M = -1$ 的左旋圆偏振 σ^- (图 1 中为 δ^- ; 下同)、 $\Delta M = 1$ 的右旋圆偏振 σ^+ 和 $\Delta M = 0$ 的 π 。

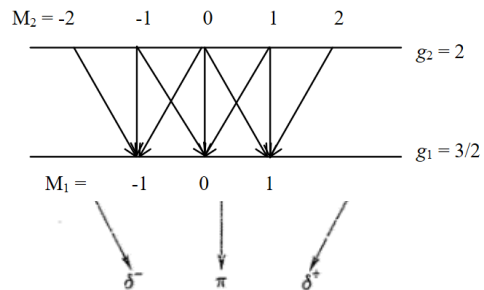


图 1 Hg 546.1nm 线的 Grotrian 图

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 (相邻谱线间距对应 $\Delta \Delta(Mg) = 1/2$), 其中 $\Delta \tilde{\nu}$ 最大的三条为 σ^+ ; 最小的三条为 σ^- ; 中间的三条为 π 。

实验中, 垂直于 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^[3-5]

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。

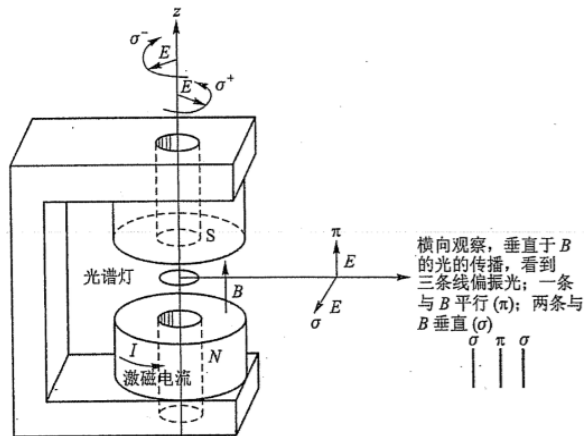


图 2 横向观察的偏振特性^[2]

对入射的角度 θ , 相位为 $\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \Delta L = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) 2nl \cos \theta$. (5), 即波数 $\tilde{\nu} = \lambda^{-1} \propto n$.

透射率 $T_e = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos(\delta)} = \frac{1}{1+F\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}$ (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。

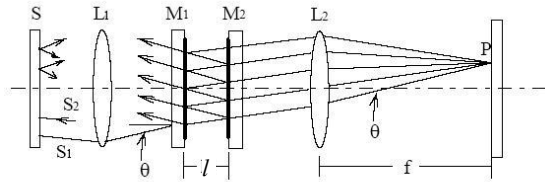


图 3 F-P 标准具示意图

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: $\Delta\tilde{\nu}_F = 1/(2nl)$ (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^[5-6]

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。

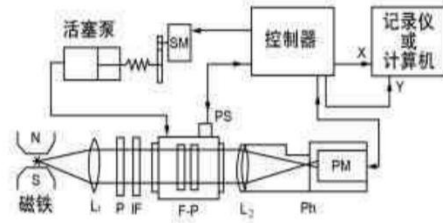


图 4 塞曼效应实验装置

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。

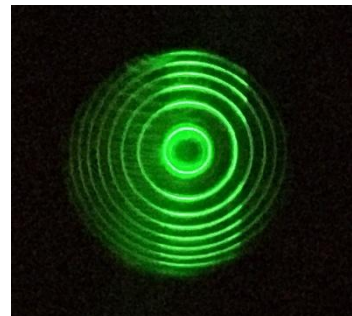


图 5 观察到的干涉圆环

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, 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 π 成分与 σ 成分

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

$$\text{根据 } \frac{d}{L} = \frac{\Delta\tilde{\nu}}{\Delta\tilde{\nu}_F} = \frac{e}{m_e} \frac{Bl}{4\pi c}, \text{ 用高斯计测量磁场 } B, \text{ 算出电子质荷比 } \frac{e}{m_e} = \frac{4\pi cd}{LBl} \quad (8).$$

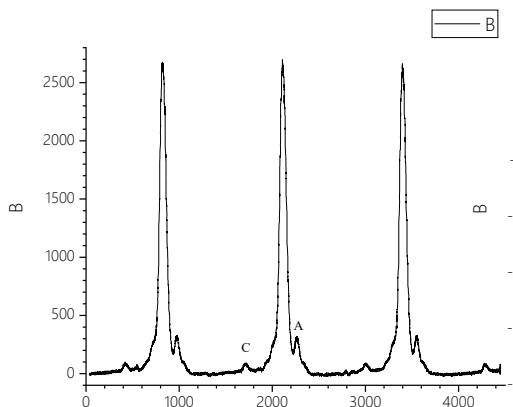


图 6 无磁场的图像

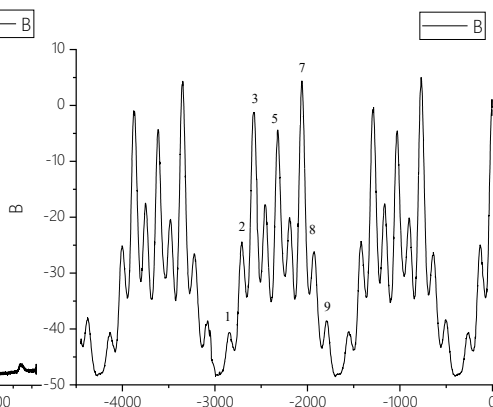


图 7 加磁场的图像

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]

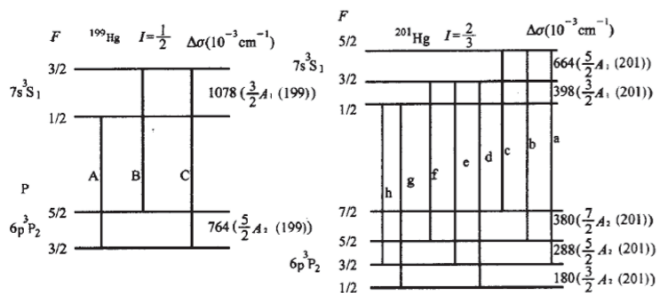


图 8 Hg 的同位素超精细结构能级间距理论值

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：1、从 $M_2=0$ 出发的谱线强度较大；2、从某个 M_2 出发后，可供选择的 ΔM 的几率是比较均等的。3、从 $M_2 = \pm 2$ 的子能级出发的粒子较少。

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、

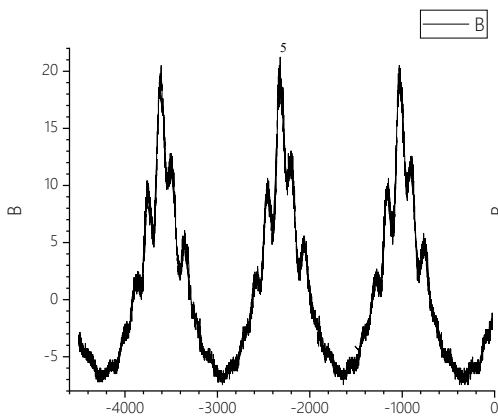


图 9 π 成分

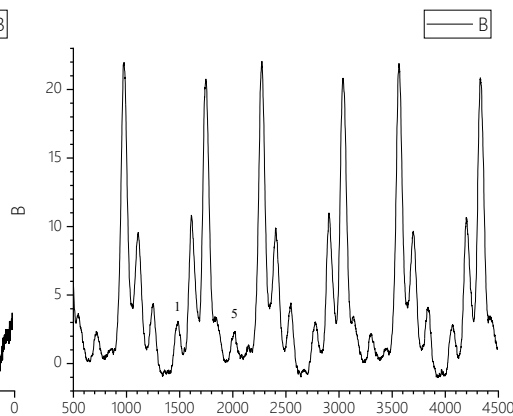


图 10 σ 成分

C 等超精细结构峰的叠加。

3.3 观察 π 成分与 σ 成分

按照步骤 2.3 得到 π 成分与 σ 成分的图像，分别如图 9, 10；图线的“粗细”不同是由于 σ 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， π 成分包含峰 4, 5, 6；而 σ 成分包含峰 1, 2, 3, 7, 8, 9。这符合前述理论。

π 成分图的峰 3、7 与 σ 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^[1]： $c = 299792458 \text{ m/s}$ ；（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，并分别求出同周期内相邻峰间距 L ，以及不同周期对应的同一峰之间的距离 d ，并将这些数据取平均值与计算不确定度。得到： $d = 131 \pm 5$ ； $L = 1291 \pm 3$ 。又，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 ，分别取平均值计算不确定度（拟合得到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，按第一种统计， $e/m_e = (1.71 \pm 0.07) \times 10^{11} \text{ C/kg}$ ，比理论值偏低 2.8% 或 0.7 个标准差。按第二种统计， $e/m_e = (1.706 \pm 0.017) \times 10^{11} \text{ C/kg}$ ，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%，是第二种统计中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。其中，第一种统计中， d 的相对不确定度较大，为 3.4%，是 e/m_e 相对不确定度 3.9% 的主要贡献。对于每个周期， d 本质上只与峰 1 与峰 9 的位置有关，所以这两个峰的测量偏差即会对 d 的值造成影响。而中间峰 2~8 的位置偏差则会加倍增加标准差。（第二种统计的优势，即各个峰地位均等。）而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。 L 的绝对标准差量级与 d 相当，也是由于读取峰位置的偏差。但 L 比 d 大一个量级，因此在第一种统计中，相对不确定度也小一个量级，为 0.25%，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 π 成分与 σ 成分，验证了 π 成分为位置在中间的 3 条谱线，而 σ 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（第二种统计），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.
- [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.