

基于气压扫描式 FP 干涉仪观测塞曼效应

Zric 物理学系

摘要: 本实验利用气压扫描式法布里-珀罗干涉仪测量了汞灯 546.1nm 的特征谱线，测量了 F-P 仪的精细度及特征谱线在外加磁场下的塞曼分裂，并分析了各塞曼分裂峰的偏振情况，计算了电子核质比为 $\frac{e}{m_e} = 1.705 \times 10^{11} \text{C/kg}$ ，与参考值的相对误差为 3.0%。

一、引言

塞曼效应描述了外加磁场对原子辐射光谱的影响，是原子物理中典型的量子效应，在量子力学理论的建立当中起了重要作用。塞曼效应的实验观测能进一步加深学生对自旋、角动量耦合等概念的理解。法布里 - 珀罗 (F-P) 干涉仪的分光能力强，能够分辨塞曼分裂的精细谱线结构，因而成为目前教学实验中的首选之一。本实验采用气压扫描式 F-P 干涉仪观察汞的 546.1nm 谱线的塞曼效应及不同偏振光，测量塞曼裂距，并计算电子荷质比^{[1][2]}。

二、实验原理

2.1 角动量及磁矩的耦合

原子中的电子有自旋角动量 \vec{s} 和轨道角动量 \vec{l} ，分别对应自旋磁矩和轨道磁矩。

$$\vec{\mu}_l = -g_l \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{l} , \quad \vec{\mu}_s = -g_s \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{s} \quad (1)$$

其中 μ_B 为玻尔磁子 $g_l = 1, g_s = 2$ 称为朗德 g 因子。两种角动量合成为总角动量 $j = l + s$ ，两种磁矩也合成为总磁矩 $\vec{\mu}_j = \vec{\mu}_s + \vec{\mu}_l$ 。而总磁矩满足 $\vec{\mu}_j = -g_j \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{j}$ ，可以证明故总磁矩的朗德 g 因子：

$$g_j = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)} \quad (2)$$

对多电子原子，存在 J-J, L-S 两种耦合方式。这里仅考虑 L-S 耦合。在 L-S 耦合中，先求所有原子的总轨道角动量 L 和总自旋角动量 S ，再求总角动量 $J = L + S$ ，总磁矩的朗得 g 因子仍然用 (2) 式求得，但是量子数要替换为总角动量量子数 L, S, J 。

2.2 塞曼效应

在外磁场中，原子总能量要增加一项磁场能：

$$\Delta E = -\vec{\mu}_j \cdot \vec{B} = g_J \mu_B M_J B \quad (3)$$

无外加磁场时量子数 L, S, J 相同, M_J 不同的 $2J + 1$ 个能级是简并的, 在外加磁场下, 这些简并能级将分裂为 $2J + 1$ 个独立能级, 这就是塞曼效应。从辐射光谱看, 在没有磁场时从 i 能级跃迁到 f 能级的辐射光的频率为 ν , 即 $h\nu = E_f - E_i$ 。有磁场时 E_f 与 E_i 要增加一项磁场能, 于是有磁场时辐射光频率 ν' 与无外加磁场时的频率 ν 差为:

$$\nu' - \nu = \frac{g_J^{(f)} M_J^{(f)} - g_J^{(i)} M_J^{(i)}}{h} \mu_B B \quad (4)$$

电子跃迁时, 需要遵守选择定则 $\Delta J = 0, \pm 1$ 且初末态 J 不同时为 0; $\Delta M_J = 0, \pm 1$ 。定义 ΔM_J 为末态减去初态, 则电子角动量改变时, 光子角动量要满足角动量守恒。 $\Delta M_J = 0, +1, -1$ 时, 光子的偏振态 (即正对磁场看的偏振) 分别为 π, σ^-, σ^+ 。 π 线的光振动方向与磁场方向平行, σ 线的光振动方向与磁场方向垂直。 π 线在观察方向与磁场方向平行时不可见, 在垂直于磁场方向观察时为线偏振光; σ 线在观察方向与磁场方向平行时为圆偏振光, 在垂直于磁场方向观察时为线偏振光且方向与 π 线互相垂直。

2.3 法布里-珀罗干涉仪

FP 干涉仪主要是由两块平面玻璃板及板间的一个间隔圈组成。平面玻璃板的内表面加工精度要求优于 $1/30$ 波长, 表面镀有高反射膜, 膜的反射率高于 90%。间隔圈用膨胀系数很小的熔融石英材料精加工成一定的厚度, 用来保证两块平面玻璃板之间精确的平行度和稳定的间距^[3]。

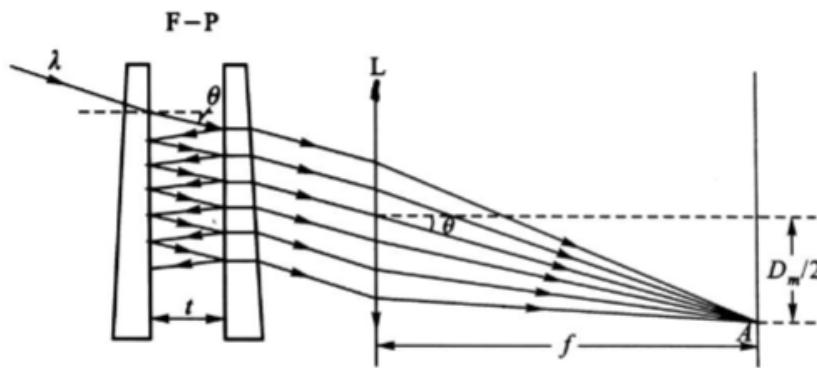


Figure 1 法布里-珀罗干涉仪示意图

设 FP 腔内介质的折射率 n, FP 腔的厚度为 d, 入射光方向于 FP 腔内法线的夹角为 θ , 则相邻两条等倾干涉条纹的光程差为:

$$\Delta = 2nd \cos \theta = k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

同心干涉圆环中心级次 k 最大，随着半径增大，级次 k 逐渐减小。由(5)式可见，当折射率 n 变化时，干涉条纹会发生移动。通过改变 FP 腔内气体的压强，可以改变折射率 n ，从而实现对干涉条纹的扫描。

(1) F-P 干涉仪分辨本领：当两个近似平行入射光波长 $\lambda, \lambda + \delta\lambda$ 相近时，干涉条纹存在重叠，要使两波长的同级次干涉条纹能够分辨开来，必须满足：

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{2nd\sqrt{R}}{(1-R)\lambda} \quad (6)$$

式中 R 表示反射膜的反射率， $\delta\lambda$ 为 F-P 标准具能分辨的最小波长差， $\frac{\lambda}{\delta\lambda}$ 则称为波长为时的分辨本领。

(2) 自由光谱范围与精细度：设近似平行入射光的波长分别为 $\lambda, \lambda + \Delta\lambda$ ，当前者的 $m+1$ 级与后者的 m 级重叠时：

$$\Delta\lambda_F = \frac{\lambda^2}{2nd} \quad (7)$$

式中 $\Delta\lambda_F$ 称为自由光谱范围。它表征了标准具所允许的不同波长的干涉花纹不重叠的最大波长差。即入射波长的区间应小于 $\Delta\lambda_F$ ，否则将发生不同级次花纹的重叠。用波数表示时，自由光谱范围为

$$\Delta\tilde{\nu}_F = \frac{1}{2nd} \quad (8)$$

自由光谱范围 $\Delta\lambda_F$ 与能分辨的最小波长差 $\delta\lambda$ 的比值就是标准具能分辨的干涉亮条纹数（同级次）的最大值，称为精细度 F ：

$$F = \frac{\Delta\lambda_F}{\delta\lambda} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (9)$$

精细度的物理意义是两个相邻干涉序花纹之间能够被分辨的干涉花纹的最大数目^[4]。

三、实验装置与内容

3.1 实验装置

本实验采用 PSZ-IV 气压扫描塞曼效应实验仪进行测量。实验装置如下图所示：

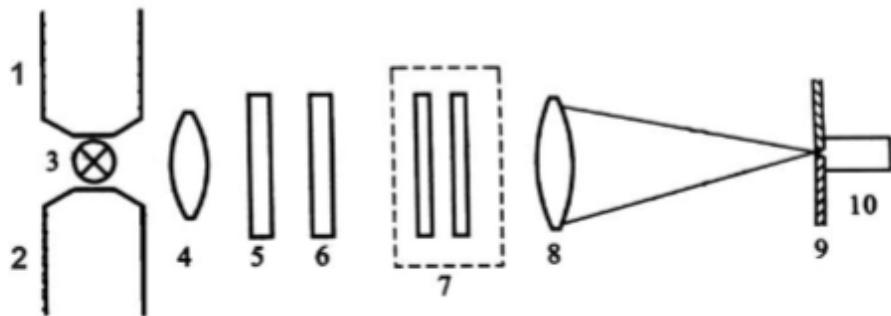


Figure 2 实验装置示意图：1, 2-永磁铁；3-笔形汞灯；4-聚光透镜；5-偏振片；6-干涉滤光片；7-F-P 腔；8-成像透镜；9-小孔光阑；10-光电倍增管

（低压汞灯 3）发射的光线经聚光透镜 4 及干涉滤色片 6 后，以近似平行光的方式照射到 F-P 标准具 7，输出光经成像透镜 8 会聚，可在焦平面处通过小孔光阑 9 经光电倍增管 10 接收光信号。偏振片 5 则用于选取不同偏振态的谱线。光电倍增管接收到的光电流信号很微弱，在 nA 量级，还需要经过微电流放大器进行放大，放大到 0-5 V 的电压信号，这个电信号作为谱线的 Y 轴信号，表示光强大小。谱线的 X 轴信号要从气压扫描式的 F-P 标准具得到，表示干涉光的光程差^[3]。

对于气压扫描式的 F-P 标准具，用步进电机驱动封闭压缩系统，进行气压扫描；由半导体压力传感器给出与压强成正比的信号；这一电信号反馈到步进电机的控制电路，调整步进电机的步速，以保证 F-P 标准具的镜面间的光程差与气压有良好的线性变化。同时通过电路设计把气体压强变成 0-5 V 的电压信号，作为谱线的 X 轴^[5]。

3.2 实验内容

实验的基本内容是用 F-P 标准具观察 Hg 546.1 nm 线的塞曼分裂，分析谱线的偏振成分，测量塞曼分裂间隔及计算电子的荷质比，步骤如下：

1. 开启汞灯，调节各光学元件，使其中心与磁场中心位置等高（先不放偏振片）。调节 F-P 标准具的平行度，使同心圆环干涉条纹随观察角度变化不出现吞吐现象。
2. 装上光电倍增管，用自准直的方法调整同心圆环中心，使其落到针孔上。
3. 扫描观察无磁场谱线和有磁场下的谱线塞曼分裂现象，加上偏振片并调节偏振片透偏方向，分别观察 π 线和 σ 线。
4. 是用高斯计测量磁场大小，数据处理得到塞曼裂距，计算电子荷质比 e/m_e 。

四、实验数据与分析

无磁场下，谱线峰位如下图所示：

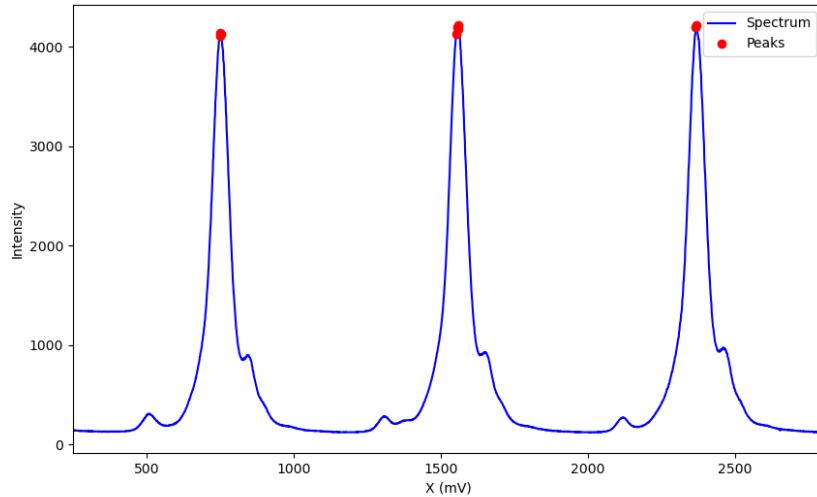


Figure 3 无磁场下的谱线数据

利用程序寻峰给出 3 个峰对应电压值 $V_1 = 741\text{mV}$, $V_2 = 1552\text{mV}$, $V_3 = 2370\text{mV}$, 得到不同级次间电压差平均值 $X_1 = 815\text{mV}$, 对 3 个峰分别计算半峰宽并取平均得 $X_2 = 65\text{mV}$, 进而可得精细度 F:

$$F = \frac{X_1}{X_2} = 12.54 \quad (10)$$

说明仪器精细度良好，光路调整正确。

图像中可以看到同一级次衍射峰图像中有不止有一个峰，每个高峰左右还有两个不对称小峰。这组峰出现的原因不是塞曼能级劈裂，而是由原子核自旋磁矩导致的超精细结构谱线。查阅汞灯的理论谱线可知，谱线的超精细结构主要由 ^{199}Hg 和 ^{201}Hg 产生，本实验中只观察到了由 ^{199}Hg 贡献的超精细结构谱线 [6]。

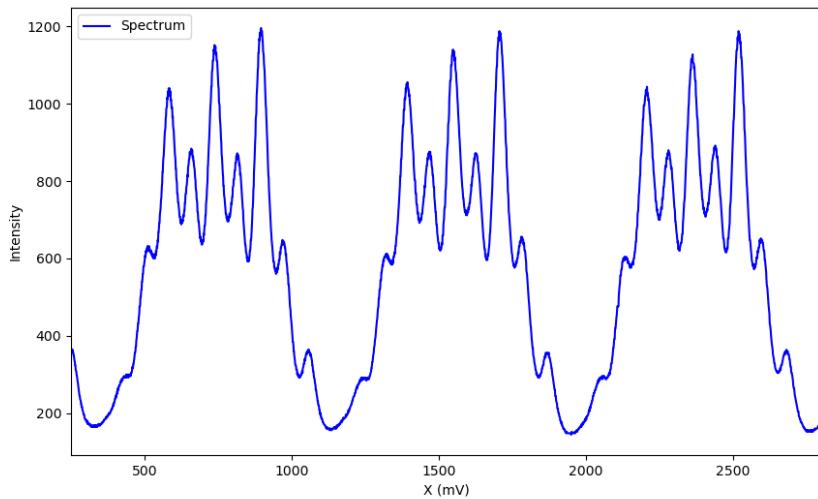


Figure 4 Hg 赛曼分裂谱线图

可以看到在外加磁场下，谱线分裂为 9 条。可以由下面汞的价电子能级图解释：

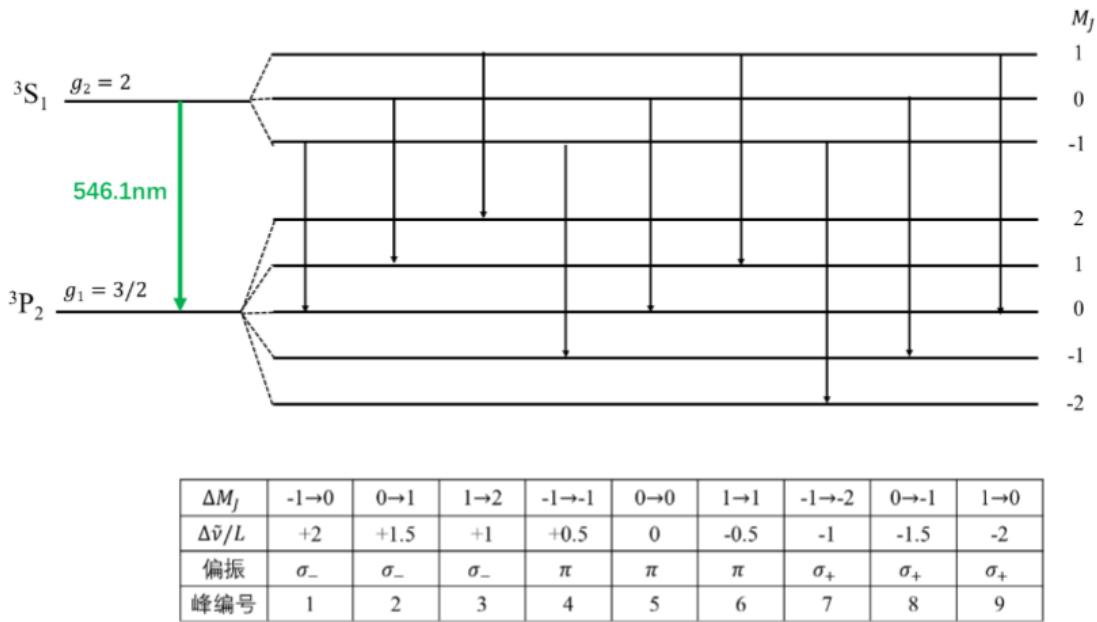


Figure 5 Hg 赛曼能级示意图 [2]

汞的价电子构型 $5d^{10}6s^2$ ，汞的 546.1nm 绿线来自 $(6s7s)^3S_1$ 向 $(6s6p)^3P_2$ 的跃迁。不难由公式 (2) 算出初末态朗德 g 因子为 2 和 $3/2$ 。由于 3S_1 态总角动量 $J=1$ ，加磁场后其将分裂为 3 个能级；而 3P_2 的 $J=2$ ，分裂为 5 个能级。再由选择定则，就可以定出塞曼分裂的 9 条谱线来源，如图 5 表格所示。

由于气压扫描式 F-P 仪给出的 X 轴数据为转换得到的电压值，需要将其转换为波

数差 $\frac{\nu' - \nu}{c}$ 。根据气压扫描式 F-P 仪的工作原理可知，波数差与 X 轴电压差成正比关系。对图 4 当中的测量数据进行寻峰，找到 3 个级次共 27 个峰的峰位电压值，整理如下表 1 所示：

Table 1 赛曼分裂谱线峰位数据

子峰序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
第 1 组峰/mV	421	512	584	659	738	817	896	972	1057
第 2 组峰/mV	1238	1321	1394	1468	1549	1627	1709	1783	1869
第 3 组峰/mV	2047	2135	2207	2281	2362	2440	2520	2598	2682

用高斯计测量汞灯处外加磁场大小 $B = 1076.4\text{mT}$, F-P 标准具间距 $d = 2.00\text{mm}$, 折射率近似取为 1, 对应 F-P 仪的自由光谱范围 $\Delta\tilde{\nu}_F = \frac{1}{2nd} = 250\text{m}^{-1}$ 。对表 1 中 3 组不同级次峰数计算整体平移偏差取平均, 得到相邻两级次间电压差 $L_1 = 812\text{mV}$, 对应自由光谱范围 $\Delta\tilde{\nu}_F$; 对 3 组中每一组谱线计算子峰赛曼分裂间距 $\Delta\nu$ 并对 3 组取平均, 得到同级次中相邻两峰位电压差 $L_2 = 79\text{mV}$, 对应赛曼裂距 $\Delta\nu$ 。因此可以使用 L_1, L_2 比例关系得到电子赛曼裂距的波数表示, 计算出电子荷质比。

电子荷质比计算：根据(4)式可知，塞曼裂距 $\Delta\nu$ 与电子荷质比 e/m_e 的关系为：

$$\Delta\nu = \frac{g_J^{(f)} M_J^{(f)} - g_J^{(i)} M_J^{(i)}}{h} \mu_B B = \frac{eB}{8\pi c m_e} \quad (11)$$

进而得到电子荷质比表达式, 这里 $g_J^{(f)} = 3/2$, $g_J^{(i)} = 2$:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8\pi c \Delta\nu}{B} = \frac{8\pi c \Delta\tilde{\nu}_F L_2}{B L_1} = 1.705 \times 10^{11} C/kg \quad (12)$$

相对标准值 $1.759 \times 10^{11} C/kg$, 误差约 3.0%, 说明实验测量较为准确。在光路中加上偏振片, 调节透光方向后测量得到 σ 谱线和 π 谱线数据如下图所示:

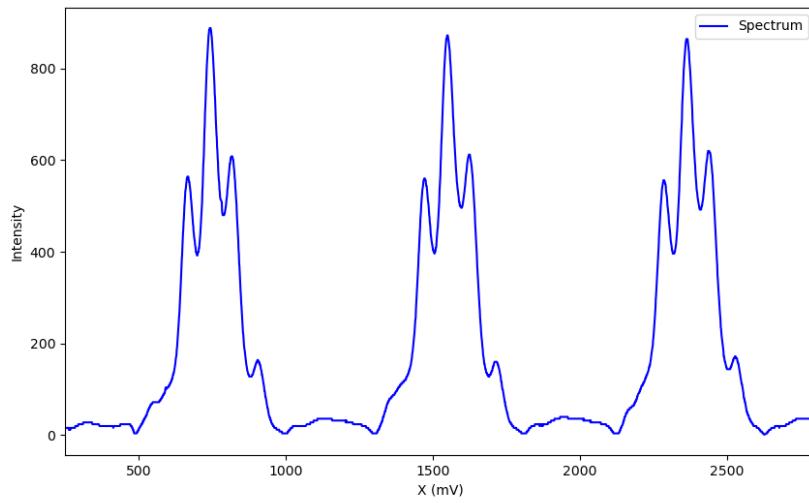


Figure 6 π 线谱线图

由于测量仪器自动把零点以下信号取为正值，导致图像中两个不同级次的峰间存在幅度很小的假峰，实际并不存在，仅关注强度在 50 以上的峰即可。图中同一级次下， π 线有 3 个峰，且强度最大的 3 个峰以外有两个幅度很小的假峰，对于核自旋磁矩引起的超精细谱线。 π 线在垂直于磁场方向观察时为线偏振光，且方向与 σ 线互相垂直。将偏振片旋转 90 度，得到 σ 线谱线图如下：

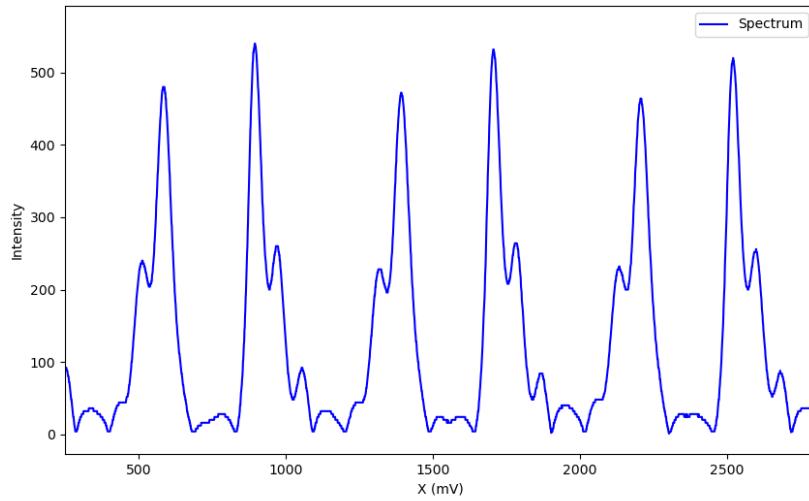


Figure 7 σ 线谱线图

可以看到 π 线和 σ 线的谱线峰位叠加在一起和无偏振片时的谱线峰位一致，说明偏振片选择了不同偏振态的光，但并没有改变谱线的能级分裂情况，符合理论预期。

图中同一级次下，可以看到 σ 线有 6 个峰，3 个为左旋圆偏振，3 个为右旋圆偏振，符合图 5 中选择定则的要求。

五、 实验结论

本实验利用气压扫描式法布里-珀罗干涉仪测量了汞灯 546.1nm 的特征谱线及其在外加磁场下的塞曼分裂，观察并分析了各塞曼分裂峰的偏振情况。根据无磁场下谱线数据计算出仪器精细度 F 为 12.54，说明仪器调整良好。在外加约 1T 磁场下观察到谱线分裂为 9 条，符合塞曼效应理论预期。

通过精确测量塞曼裂距，计算了电子的核质比为 $\frac{e}{m_e} = 1.705 \times 10^{11} \text{C/kg}$ ，与参考值的相对误差为 3.0%。此外还观察了沿垂直磁场方向的塞曼分裂谱线的偏振态及偏振方向， π 线共有 3 条、 σ 线共 6 条，符合理论预期。

六、 参考文献

- [1] 王建春 and 周伟. 近代物理实验塞曼效应问题引导式探究教学实践. 物理与工程, 32(03):46–49, 2022.
- [2] 杨福家. 原子物理学. 高等教育出版社, 北京, 第 2 版 edition, 1990.
- [3] Psz-iv 气压扫描塞曼效应实验仪说明书. <http://www.jcgdz.com/adminlg/editor1/UploadFile/2010826193514447.doc>.
- [4] 赵凯华. 新概念物理教程-光学. 高等教育出版社, 北京, 2nd edition, 2021.
- [5] 戴乐山 and 戴道宣. 近代物理实验. 复旦大学出版社, 上海, 1995.
- [6] 陈星 and 潘正权. Hg 绿谱线超精细结构分析及相互作用常数计算. 大学物理, 25(06):36–39, 2006.
- [7] Fabry–p’erot interferometer. https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry%E2%80%93P%C3%A9rot_interferometer, accessed 2025-11-02. Wikipedia.