

塞曼效应实验：实验报告

刘泓尊 2018011446 计 84

liu-hz18@mails.tsinghua.edu.cn

目录

1 实验目的	2
2 实验仪器	2
3 实验原理	2
3.1 原子磁矩与能级分裂	2
3.2 塞曼能级跃迁	2
3.3 塞曼效应的测量公式	3
4 实验内容	3
4.1 实验步骤	3
4.2 注意事项	4
5 数据处理	4
5.1 原始数据记录表	4
5.2 实验现象记录表	4
5.3 a, b 谱线波数差的计算	6
5.4 磁感应强度 B 的计算	6
5.5 $B - I$ 表格及曲线	6
5.6 思考题	7
6 实验小结	8
A 原始数据附录	9

1 实验目的

1. 了解并利用法布里-珀罗 (F-P) 标准具, 观察汞光谱 $546.1nm$ 绿线在磁场中的分裂现象.
2. 掌握塞曼效应中谱线裂距的测量方法, 加深对原子磁矩及其空间取向量子化的理解.
3. 测量并计算分裂后的子谱线波数差, 与理论值比较, 求出磁感应强度 B 的数值.

2 实验仪器

汞灯, 电磁铁, 聚光透镜, 偏振片, $546nm$ 滤光片, F-P 标准具, 凸透镜, 成像物镜, 测微目镜, 漏磁变压器, 导轨, 稳压稳流电源等.

3 实验原理

3.1 原子磁矩与能级分裂

原子由原子核和电子构成, 所以严格地说, 原子的总磁矩由电子磁矩和核磁矩两部分组成, 但由于后者比前者小三个数量级以上, 所以暂时只考虑电子的磁矩这一部分. 原子中的电子具有轨道角动量 P_L , 轨道磁矩 μ_L 和自旋磁矩 μ_S . 它们有如下关系:

$$\mu_L = \frac{e}{2m} P_L = \frac{e}{2m} \sqrt{L(L+1)} \frac{h}{2\pi}$$

$$\mu_S = \frac{e}{m} P_S = \frac{e}{m} \sqrt{S(S+1)} \frac{h}{2\pi}$$

电子的轨道磁矩和自旋磁矩合成原子的总磁矩 μ . 原子总磁矩在外磁场中受到力矩 $L = \mu \times B$ 的作用, 使角动量发生旋进. 因为 μ_J 和 P_J 在磁场中取向是量子化的, P_J 的分量只能是 h 的整数倍, 所以总共有 $2J+1$ 个 M 值. 这样无外磁场时的一个能级, 在外磁场的作用下则分裂成 $2J+1$ 个子能级, 每个能级有附加能量

$$E_B = Mg\mu_B B = Mg \frac{eh}{4\pi m} B$$

其中 $\mu_B = eh/4\pi m$ 是玻尔磁子.

3.2 塞曼能级跃迁

当电子从高能级到低能级跃迁时, 会释放部分能量; 如果这部分能量以光子形式辐射, 则产生发光现象. 在没有磁场时, 光子能量

$$h\nu = \Delta E = E_2 - E_1$$

在有磁场的情况下, 光子能量

$$h\nu' = \Delta E + (E_{B2} - E_{B1}) = h\nu + (M_2 g_2 - M_1 g_1) \mu_B B$$

相邻环的 $(M_2 g_2 - M_1 g_1)$ 结果都相差 0.5, 因此, 分裂之后相邻子谱线的频率差为

$$\Delta\nu' = 0.5 \frac{\mu_B B}{h}$$

分裂后相邻子谱线波数差为

$$\Delta\tilde{\nu}' = 0.5 \frac{\mu_B B}{hc} = 0.2335 B (cm^{-1})$$

3.3 塞曼效应的测量公式

用透镜把 F-P 标准具的干涉圆环成像在焦平面上，有 $D/2 = \tan \phi$ 。F-P 标准具产生干涉极大的条件为

$$\Delta = 2nd \cos \phi = k\lambda$$

可得

$$2d(1 - \frac{D^2}{8f^2}) = k\lambda$$

可以看到，同一级次中，波长大的子谱线对应圆环直径小。设相隔 n 个环间距的同心环 $a(\lambda_2)$ 和 $b(\lambda_1)$ 所代表的子谱线之间的波数差：

$$\Delta \tilde{\nu} = \frac{1}{2d} \frac{D_k^2(\lambda_2) - D_k^2(\lambda_1)}{D_{k-1}^2(\lambda_2) - D_k^2(\lambda_2)}$$

实验中 $d = 2mm$ 。再由相邻子谱线的波数差

$$\frac{\Delta \tilde{\nu}}{n} = 0.2335B$$

计算出磁感应强度 B 。

光路图如下：

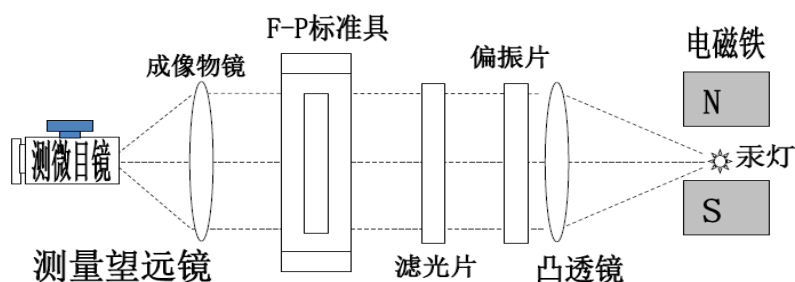


图 1: 光路图

4 实验内容

4.1 实验步骤

1. 调整光学系统，调节各光学部件共轴，调整标准具。使同心干涉圆环进入视野，圆心居中，调节光学系统是圆环最清晰。
2. 用滤光片选择出汞 $546.1nm$ 绿色谱线。
3. 无外磁场时，从测微目镜中观察，有多个线条清晰、亮度均匀的绿色同心圆环 (不同级次)。
4. 有外磁场时，通过目镜观察汞 $546.1nm$ 谱线的塞曼分裂现象。
5. 励磁电流从小到大 ($2.5A, 3.0A, 3.5A, 4.0A, 4.5A$) 过程中，观察干涉圆环形状与励磁电流 (I) 的关系。
6. 在光路中加入偏振片，转动偏振片记下观察结果：偏振片方位、子谱线分裂情况 (π 成分和 σ 成分)。

4.2 注意事项

1. 励磁电流有漂移，每组测量前后检查电流值是否稳定.
2. 在暗室中操作，注意安全.
3. 光学器件轻拿轻放，严禁用手和其它物体触碰 F-P 标准具等光学元件的光学面.
4. 励磁电源所带负载电感大，开、关机时均要求把电流调到最小。在不用使磁场时，及时降低励磁电流并关闭电源.
5. 一定要保证测量望远镜底座固定，否则出现读数抖动，造成整组数据不可用.
6. 最中心的一组圆环一般不可用，从内向外数第一组最清晰的 9 条亮纹作为 K 级，再往外是 $K - 1$ 级.

5 数据处理

选择第一组照片，从内向外数第一组最清晰的 9 条亮纹作为 K 级，观测时取 $a = 7$ (外侧，短波长), $b = 3$ (内侧，长波长).

5.1 原始数据记录表

励磁电流 I/A	环的名称	环左侧位置/像素	环右侧位置/像素	环直径 D/像素
2.5	K 级第 a 环	1319	2985	$D_k(a) = 1666$
	K 级第 b 环	1449	2847	$D_k(b) = 1398$
	K-1 级第 a 环	1017	3293	$D_{k-1}(a) = 2276$
3.0	K 级第 a 环	1307	2997	$D_k(a) = 1690$
	K 级第 b 环	1451	2851	$D_k(b) = 1400$
	K-1 级第 a 环	1013	3303	$D_{k-1}(a) = 2290$
3.5	K 级第 a 环	1303	3003	$D_k(a) = 1700$
	K 级第 b 环	1455	2843	$D_k(b) = 1388$
	K-1 级第 a 环	1005	3309	$D_{k-1}(a) = 2304$
4.0	K 级第 a 环	1295	3009	$D_k(a) = 1714$
	K 级第 b 环	1459	2841	$D_k(b) = 1382$
	K-1 级第 a 环	1001	3313	$D_{k-1}(a) = 2312$
4.5	K 级第 a 环	1293	3013	$D_k(a) = 1720$
	K 级第 b 环	1467	2843	$D_k(b) = 1376$
	K-1 级第 a 环	1003	3317	$D_{k-1}(a) = 2314$

5.2 实验现象记录表

5.2.1 定性观察汞原子的 546.1nm 光谱线在磁场中的分裂（示意图中黑色同心环，代表汞原子绿色谱线的分裂圆环）

1. 在图中标注出，当磁场为 0 时，该谱线位置是图中的哪一条子谱线的位置？
磁场为 0 时，谱线位置是最中间子谱线的位置。或者说在 9 条子谱线中是第 $(9 + 1)/2 = 5$ 个。
2. 随励磁电流的增大，圆环分裂裂距如何变？分裂后各子谱线强度是怎样分布的？
随着励磁电流的增大，圆环分裂间距增加。从公式上看，因为根据 $\Delta v' = 0.5\mu_B B/h$ ，磁场增强时，相邻子谱线频率差增大；分裂后各子谱线强度从内到外先增加后减小，呈现中间强两侧弱

的图样, 分裂后原谱线位置处的子谱线强度最大, 其余子谱线在原谱线位置内外对称分布, 从内向外逐渐减弱。

3. 在垂直于磁场方向, 用偏振片检测每条子谱线的偏振特性: (偏振片上的白色胶带指示其透光轴所在方向), 在图中标出哪些环是 π 线, 偏振方向为 平行 于磁场方向; 哪些环是 σ 线, 偏振方向为 垂直 于磁场方向。

透光轴水平上时, 每一组条纹显示为 3 条子谱线, 是 π 线, 位于中间; 透光轴竖直时, 每一组条纹显示为 6 条子谱线, 是 σ 线, 位于两侧。

图上的标注如下:

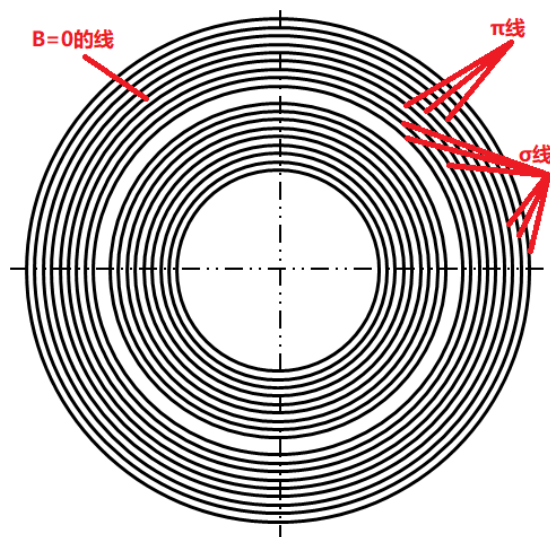


图 2: 以外侧级次为例

5.2.2 示意图是两相邻级次谱线的分裂圆环

1. 标明哪一组是 K 级? 哪一组是 K-1 级?
2. 标出你在采集数据时, 实际记录的 K 级中的子谱线和 K-1 级中的子谱线分别是哪几个环?
见下图:

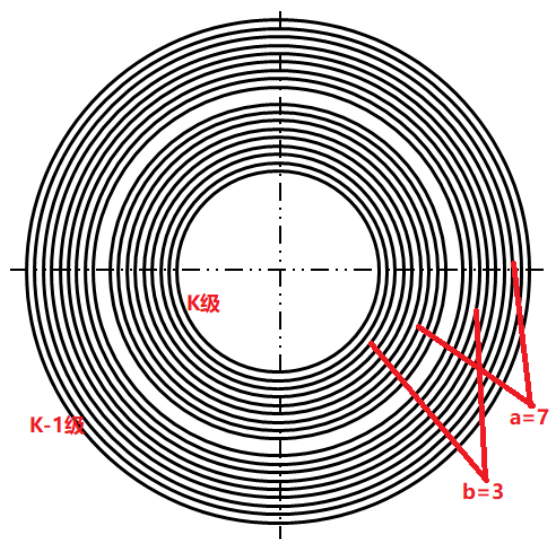


图 3: 问题答案与 a, b 的选取

5.3 a, b 谱线波数差的计算

由实验原理部分的推导，可以得到

$$\Delta\tilde{\nu} = \frac{1}{2d} \frac{D_k^2(\lambda_2) - D_k^2(\lambda_1)}{D_{k-1}^2(\lambda_2) - D_k^2(\lambda_2)}$$

将 $I = 2.5A, 3.0A, 3.5A, 4.0A, 4.5A$ 的数据代入上式得到:

I(A)	$\Delta\tilde{\nu}(cm^{-1})$
2.5	0.85372
3.0	0.93813
3.5	0.99596
4.0	1.06734
4.5	1.11116

5.4 磁感应强度 B 的计算

由相邻子谱线的波数差

$$\frac{\Delta\tilde{\nu}(cm)}{n} = 0.2335B$$

计算得到磁感应强度

$$B = \frac{\Delta\tilde{\nu}(cm)}{0.2335n} (n = 4) = \frac{\Delta\tilde{\nu}(cm)}{0.934} (T)$$

计算得到表格如下:

I(A)	$\Delta\tilde{\nu}(cm^{-1})$	$B(T)$
2.5	0.85372	0.914
3.0	0.93813	1.004
3.5	0.98043	1.066
4.0	1.06734	1.142
4.5	1.11116	1.190

5.5 $B - I$ 表格及曲线

结合所测数据得出 B-I 数据如下:

I(A)	$B(T)$
2.5	0.914
3.0	1.004
3.5	1.050
4.0	1.142
4.5	1.190

拟合得到 $B-I$ 曲线如下:

从曲线中可以看到, $I < 3.50A$ 时, 近似线性增长; $I > 3.50A$ 之后, B 的上升趋势逐渐变缓。

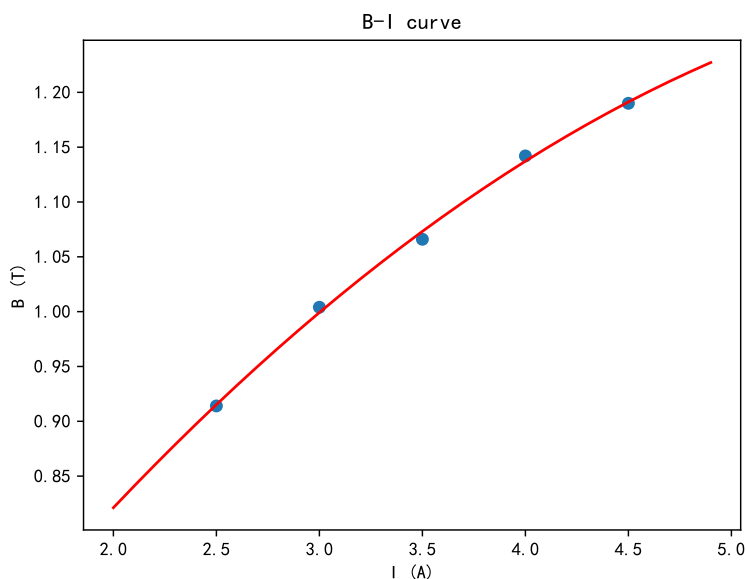


图 4: I-B 关系曲线

5.6 思考题

5.6.1 如果可以沿着磁场逆光方向观测, 你将采用什么方法鉴别塞曼分裂的 σ 成分中的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光?

在实验中, $+\sigma$ 成分经 $1/4$ 玻片后, 当偏振片透振方向在一、三象限时才可观察到, 此时是左旋光; $-\sigma$ 成分经 $1/4$ 玻片后, 当偏振片透振方向在二、四象限时才可观察到, 此时是右旋光。可以根据这点不同来鉴别左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。

5.6.2 如果将 $F-P$ 标准具密封, 逐渐增大平行腔中的气体压强, 同心圆环的形貌将怎样变化?

在常温下, 压强增大, 气体折射率 n 增加。由于产生干涉极大的条件为

$$\Delta = 2nd \cos \phi = k\lambda$$

对于级次 k , 有 n 增大, 则 $\cos \phi$ 减小, ϕ 增大, 远离中心。所以当 p 缓慢增加时, 中心处圆环向外扩大, 干涉圆环从中心“冒”出。此外, 由于

$$-2nd \sin \phi \Delta \phi = \Delta k \lambda$$

令 $\Delta k = 1$, 得到相邻两环的角间距 $\phi_k = \phi_{k+1} = -\Delta \phi \approx \frac{\lambda}{2nd \sin \phi}$ n 增大则角间距变小, 所以条纹变密。

综上, 当压强 p 增大时, 中心处圆环向外扩大, 并且条纹间距变密。

5.6.3 如果只将 $F-P$ 标准具的平行腔的间距逐渐增大, 同心圆环的形貌将怎样变化?

由于产生干涉极大的条件为

$$\Delta = 2nd \cos \phi = k\lambda$$

对于级次 k ，有 d 增大，则 $\cos \phi$ 减小， ϕ 增大，远离中心。所以当 d 逐渐增加时，中心处圆环向外扩大，干涉圆环从中心“冒”出。此外，由于

$$-2nd \sin \phi \Delta \phi = \Delta k \lambda$$

令 $\Delta k = 1$ ，得到相邻两环的角间距

$$\phi_k = \phi_{k+1} = -\Delta \phi \approx \frac{\lambda}{2nd \sin \phi}$$

d 增大则角间距变小，所以条纹变密。

综上，当间距 d 增大时，中心处圆环向外扩大，并且条纹间距变密。

6 实验小结

本次实验我学习了塞曼效应的相关知识，在老师提供的照片中体会到了塞曼分裂现象，从宏观层面感受到了原子磁矩的存在。对于圆环 a, b 的选择，我认为选择较为明亮的圆环能得到比较准确的结果，因为明亮的条纹与暗纹对比度高，因此我选择 3, 7 作为观测的条纹。当然，2, 8 也是不错的选择。

本次实验没有了光学仪器的实操，因此实验过程显得顺利而准确。但是本实验只采用了 5 个电流的数据，使得 $B - I$ 之间的关系没有被充分显现，从拟合结果来看，依然近似线性。

感谢老师的细致准备与悉心指导！

A 原始数据附录

选择第一组照片，从内向外数第一组最清晰的 9 条亮纹作为 K 级，观测时取 $a = 7$ (外侧), $b = 3$ (内侧).

励磁电流 I/A	环的名称	环左侧位置/像素	环右侧位置/像素	环直径 D/像素
2.5	K 级第 a 环	1319	2985	$D_k(a) = 1666$
	K 级第 b 环	1449	2847	$D_k(b) = 1398$
	K-1 级第 a 环	1017	3293	$D_{k-1}(a) = 2276$
3.0	K 级第 a 环	1307	2997	$D_k(a) = 1690$
	K 级第 b 环	1451	2851	$D_k(b) = 1400$
	K-1 级第 a 环	1013	3303	$D_{k-1}(a) = 2290$
3.5	K 级第 a 环	1303	3003	$D_k(a) = 1700$
	K 级第 b 环	1455	2843	$D_k(b) = 1388$
	K-1 级第 a 环	1005	3309	$D_{k-1}(a) = 2304$
4.0	K 级第 a 环	1295	3009	$D_k(a) = 1714$
	K 级第 b 环	1459	2841	$D_k(b) = 1382$
	K-1 级第 a 环	1001	3313	$D_{k-1}(a) = 2312$
4.5	K 级第 a 环	1293	3013	$D_k(a) = 1720$
	K 级第 b 环	1467	2843	$D_k(b) = 1376$
	K-1 级第 a 环	1003	3317	$D_{k-1}(a) = 2314$