# 塞曼效应实验

# 背景资料

- 荷兰物理学家塞曼（P ZeemaK）于1896年发现，把光源放在足够强的磁场中，原来的一条光谱分裂为几条偏振的谱线，分裂的条数随能级的类别而不同，后人称此现象为塞曼效应。塞曼由于发现了这一效应，荣获了1902年度诺贝尔物理奖。
- 早年把那些谱线分裂为三条,而裂距按波数计算正好等于一个洛伦兹单位的现象叫做正常塞曼效应(洛伦兹单位 )。正常塞曼效应用经典理论就能给予解释。实际上大多数谱线的塞曼分裂不是正常塞曼分裂,分裂的谱线多于三条,谱线的裂距可以大于也可以小于一个洛伦兹单位,人们称这类现象为反常塞曼效应。反常塞曼效应只有用量子理论才能得到满意的解释。
- 塞曼效应的发现，为直接证明空间量子化提供了实验依据，对推动量子理论的发展起了重要作用。直到今日，塞曼效应仍是研究原子能级结构的重要方法之一。

# 一、实验目的

1、观察汞的546.1nm谱线在磁场中分裂的情况，加深对原子结构的认识；

2、测量上述谱线在磁场中分裂的裂距，求出e/m值；

3、学习法布里——珀罗标准具的原理、调节和使用。

# 二、实验原理

## 1、谱线在磁场中的分裂：

由量子理论，当光源处于磁场强度为B的磁场中时，能级E要发生分裂，其附加能量

$$\Delta E = Mg\mu_B B$$

式中M为磁量子数；g是朗德因子；$\mu_B$为玻尔磁子，其大小为

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.274 \times 10^{-24} J \cdot T^{-1}$$

式中e和$m_e$分别是电子的电量和质量。

- 设频率为$\nu$的谱线是由原子的上能级$E_2$跃迁到下能级$E_1$所产生

$$h\nu = E_2 - E_1$$

在磁场中能级$E_2$和$E_1$将发生分裂产生子能级，附加的能级分别为$\Delta E_2$和$\Delta E_1$，产生频率为$\nu'$的新谱线

$$h\nu' = (E_2 + \Delta E_2) - (E_1 + \Delta E_1) = (E_2 - E_1) + (\Delta E_2 - \Delta E_1)$$

$$h\nu' = h\nu + (M_2 g_2 - M_1 g_1)\mu_B B$$

谱线的频率变化为：

$$\Delta\nu = \nu' - \nu = \frac{1}{h}(\Delta E_2 - \Delta E_1) = (M_2 g_2 - M_1 g_1)\frac{e}{4\pi m}B$$

相应的波数差为

$$\Delta\sigma = \frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} = \frac{\Delta\nu}{c} = (M_2 g_2 - M_1 g_1)\frac{L}{c}$$

式中L为

$$L = \frac{\mu_B B}{h} = \frac{eB}{4\pi m_e c}$$

其中洛伦兹单位 $L = B \times 46.7 m^{-1} \cdot T^{-1}$

汞**绿线546.1nm**是$^3S_1 \rightarrow {}^3P_2$ 跃迁的结果，按LS耦合情况下g因子计算公式：

$$g = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}$$

可得能级$^3S_1$的g值，g=2;能级$^3P_2$的g值，g=3/2。两能级的M取值为：$M_2$=1，0，-1和$M_1$=2，1，0，-1，-2。

根据选择定则：

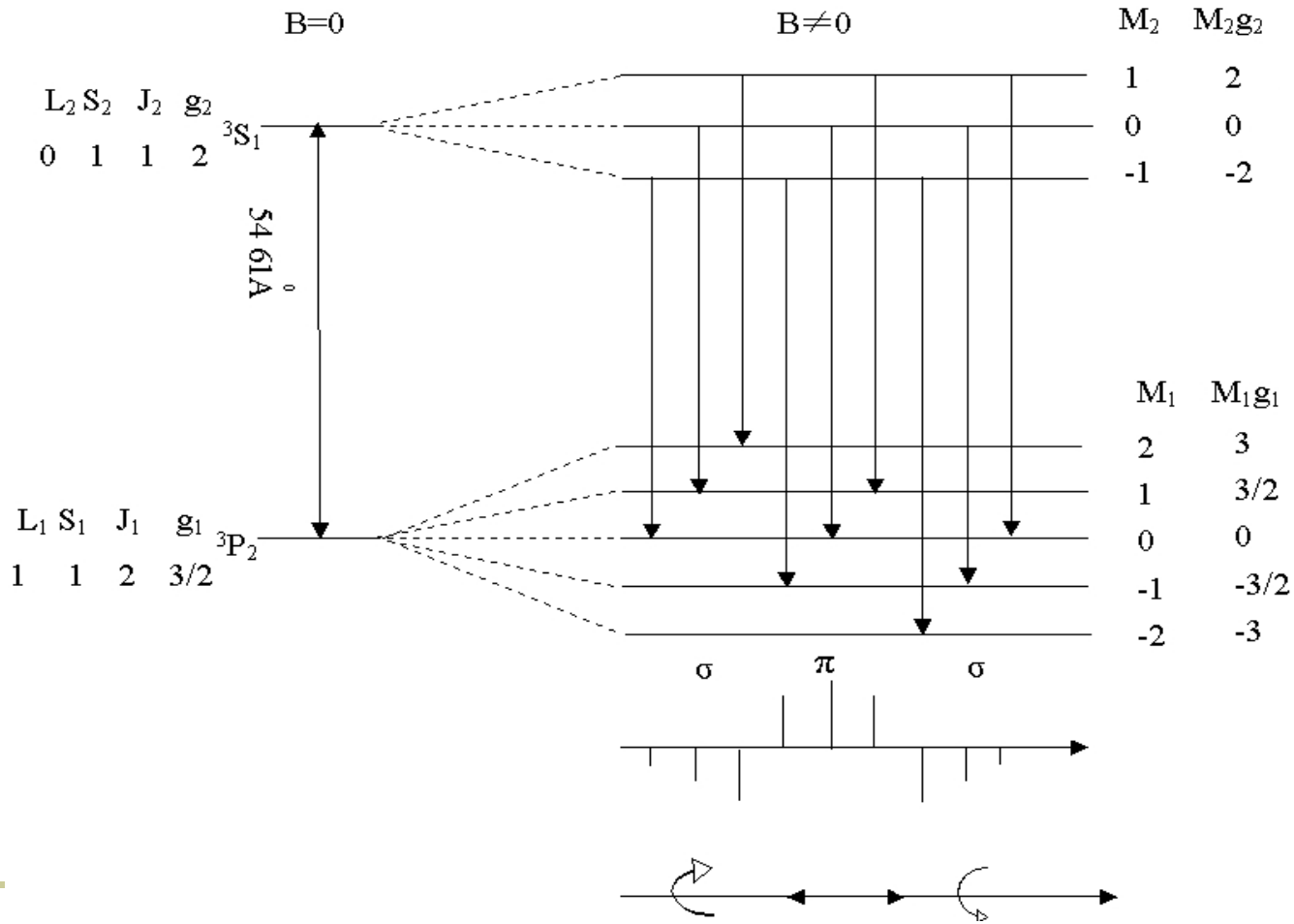
（当$\Delta J$=0时，**$\Delta M$**被禁止），当 $\Delta M$ =0时，产生的偏振光为 $\pi$ 成分。垂直于磁场观察时（横效应），线偏振光的振动方向平行于磁场。平行于磁场观察时，$\pi$成分不出现。

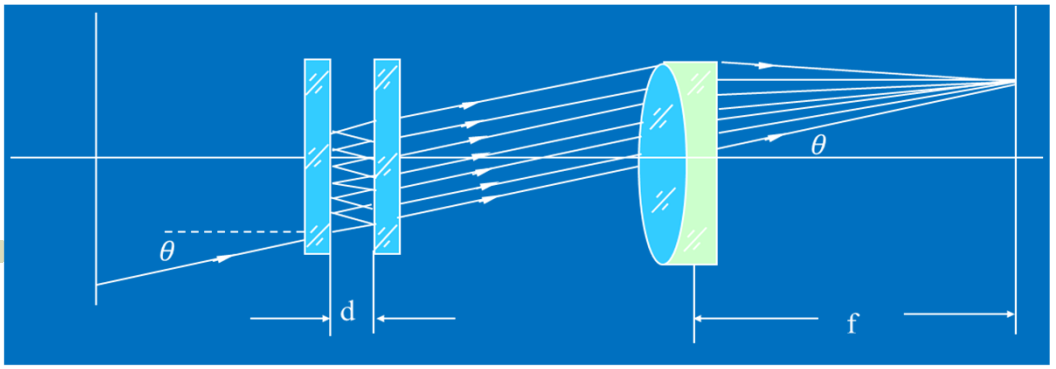
当 $\Delta M=\pm 1$时，产生σ线。沿垂直于磁场方向观察时(横效应)， σ线为振动方向垂直于磁场的线振动光。沿磁场方向观察时， σ线为圆偏振光。

对汞绿线546.1nm谱线，选择定则允许的跃迁共有九种。因此，原来的谱线将分裂成九条谱线。分裂后的九条谱线是等距的，间距都为L/2。各线段的长度表示谱线的相对强度。

用上面所述的方法，可以求出它的塞曼分裂。下图表示在外磁场作用下，汞绿线能级的分裂情况。

在外磁场作用下，$^3S_1$和$^3P_2$ 能级的分裂






## 2. 用标准具测量波数差

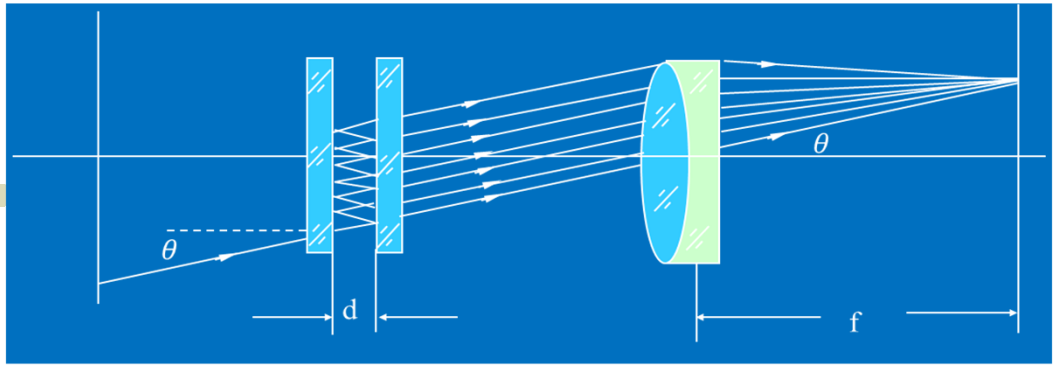
法布里—珀罗标准具（F-P标准具）由平行放置的两块平面玻璃和夹在中间的一个间隔圈组成。内表面上镀有高反射膜，间隔圈用膨胀系数很小的石英材料制作，用来保证两块平面玻璃板之间有很高的平行度和稳定的间距。再用三个螺丝调节玻璃上的压力来达到精确平行。

当单色平行光束以某一小角度$\theta$入射到标准具的平面上时，光束分别形成一系列相互平行的反射光束及透射光束。这些相邻光束之间有一定的光程差$\Delta l$。

$$\boxed{\Delta l = 2nd\cos\theta}$$

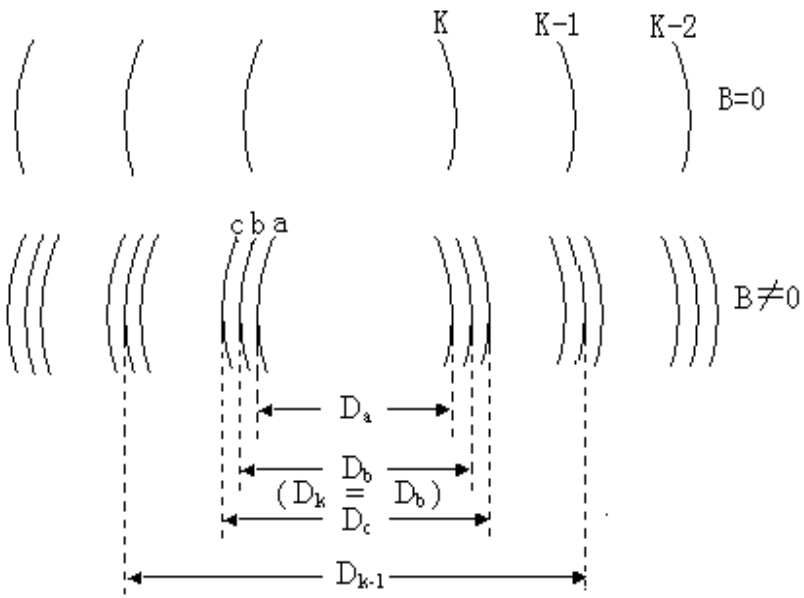
式中$d$为两平行板之间的距离，在空气中折射率近似为$n = 1$。这一系列互相平行并有一定光程差的光束将在无限远处或在透镜的焦面上发生干涉。当光程差为波长的整数倍时产生相长干涉，得到光强极大值：

$$\boxed{2d\cos\theta = K\lambda}$$




由上图可得

$$\boxed{\cos\theta = \frac{f}{\sqrt{f^2 + (D/2)^2}} \approx 1 - \frac{1}{8}\frac{D^2}{f^2}}$$

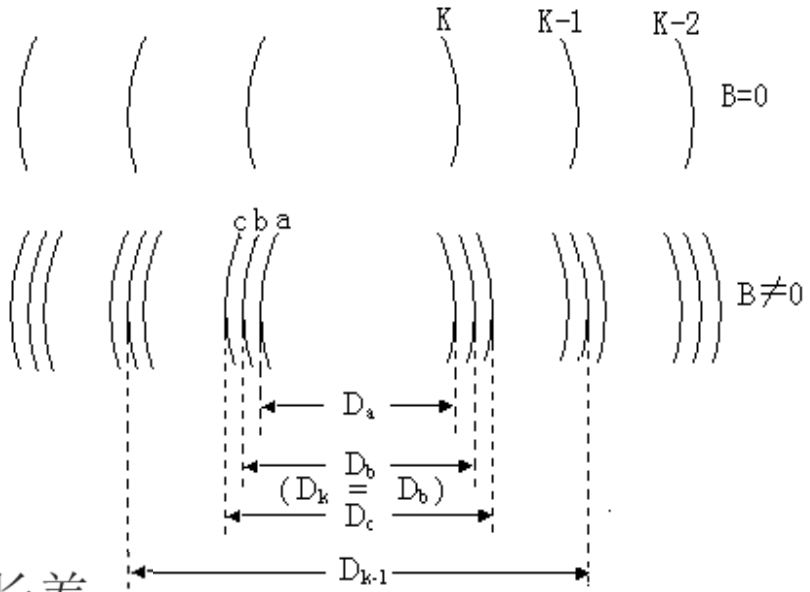



把该式子带入 $\boxed{2d\cos\theta = K\lambda}$

可得到

$$2d[1 - \frac{1}{8}\frac{D^2}{f^2}] = K\lambda$$

$$2d[1-\frac{1}{8}\frac{D^2}{f^2}]=K\lambda$$




对同一波长的相邻两级K和K-1,花纹的直径平方差用 表示,得

$$\Delta D^2 = D^2{}_{K-1} - D^2{}_K = \frac{4f^2\lambda}{d}$$

对同一干涉级，不同波长$\lambda_a$和$\lambda_b$的波长差

$$\Delta\lambda = \lambda_a - \lambda_b = \frac{d}{4f^2K}(D^2{}_b - D^2{}_a) = \frac{\lambda}{K}\frac{D^2{}_b - D^2{}_a}{D^2{}_{k-1} - D^2{}_K}$$

测量时所用的干涉花纹只是在中心花纹附近的几个干涉级。考虑到标准具间隔圈的长度比波长大得多，中心花纹的干涉级次是很大的，因此用中心花纹的干涉级次代替被测花纹的干涉级次，引入的误差可以忽略不计，即$K = 2d/\lambda$，带入上式可得

$$\Delta\lambda_{ab} = \lambda_a - \lambda_b = \frac{\lambda^2}{2d}\frac{D^2{}_b - D^2{}_a}{D^2{}_{K-1} - D^2{}_K}$$

用波数差表示为

$$\Delta\sigma_{ab} = \sigma_a - \sigma_b = \frac{1}{2d}\frac{\Delta D_{ab}^2}{\Delta D^2}$$

$$(\text{其中 } \Delta D_{ab}^2 = \Delta D_b^2 - \Delta D_a^2)$$

将该式代入式子 $\Delta\sigma = \frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} = \frac{\Delta\nu}{c} = (M_2 g_2 - M_1 g_1)\frac{L}{c}$

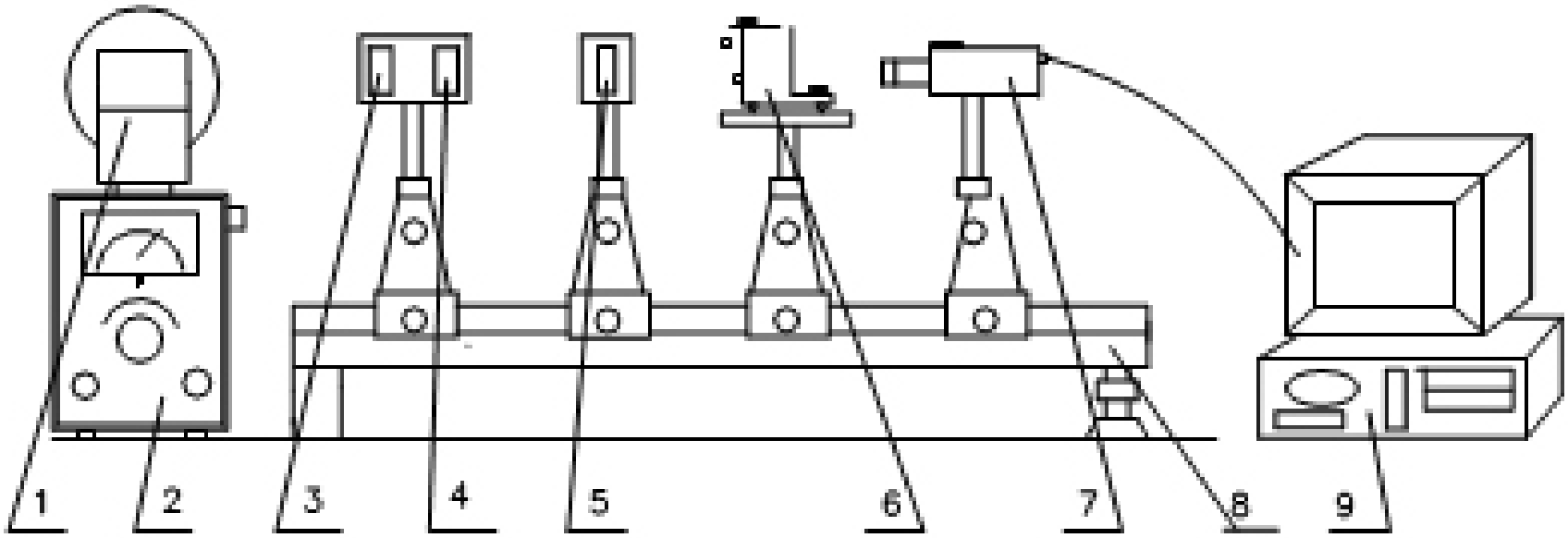
**便得电子荷质比的公式：**

$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi c}{(M_2 g_2 - M_1 g_1)Bd}\left(\frac{D^2{}_b - D^2{}_a}{D^2{}_{K-1} - D^2{}_K}\right)$$



标准值 $e/m = 1.76 \times 10^{11}\ C/\mathrm{kg}$

# 三、实验装置图



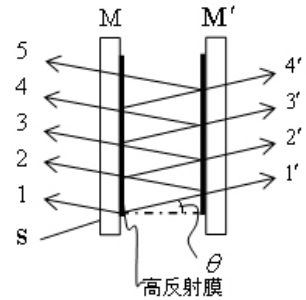

1—电磁铁　2—电源　3—透镜　4—偏振片　5—干涉滤光片

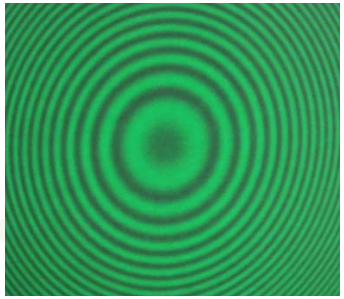
6—F-P 标准具　7—CCD　8—导轨　9—电脑

图 2　实验装置示意图

# 三、实验装置图

# 四．实验步骤



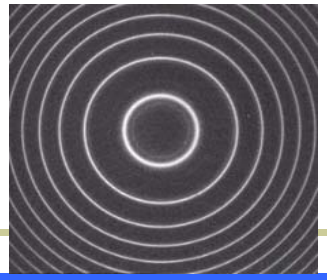
1、调节光路

（1）调节光路上各光学元件等高共轴，打开汞灯，使光束通过每个光学元件的中心。由于标准具前已放置滤光片，可以看到标准具视场中布满绿色的干涉条纹。

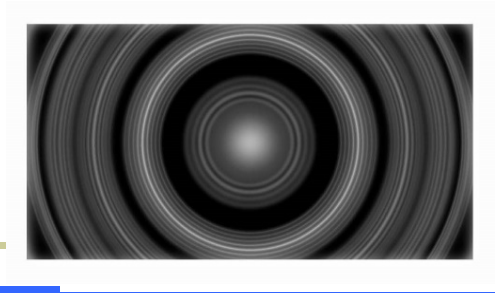
（2）调节标准具。眼睛在垂直于标准具平面内上、下、左、右移动时，若看到干涉圆环有缩冒现象，应调节标准具的三个调节旋钮，直到无明显缩冒现象为止。

2、定性观察

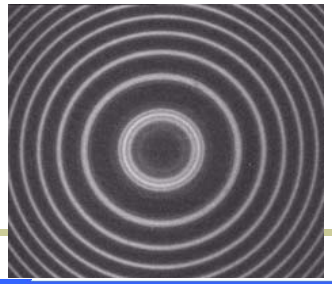
缓慢地增大磁场B，可观察到细锐的干涉圆环逐渐变粗，然后发生分裂。随着磁场B的增大，谱线的分裂宽度也在不断增宽，当励磁电流达到1A左右（电流值一般在0.5～1.3A范围进行调节）时，谱线由一条分裂成九条，而且很细。当旋转偏振片为0°、45°、90°各不同位置时，可观察到偏振性质不同的$\pi$成分和$\sigma$成分。



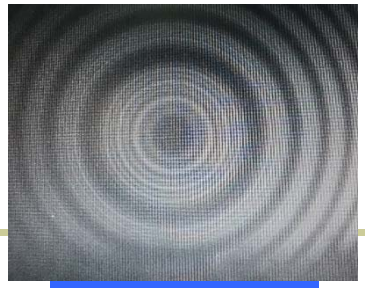
未加磁场的谱线



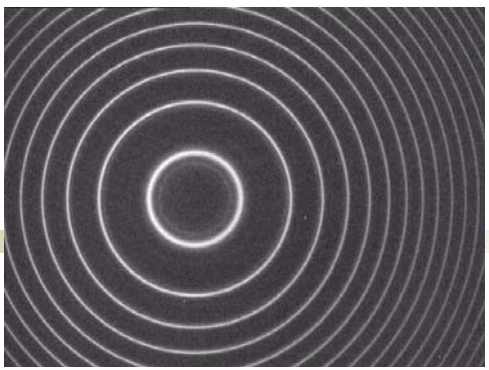
加磁场的谱线

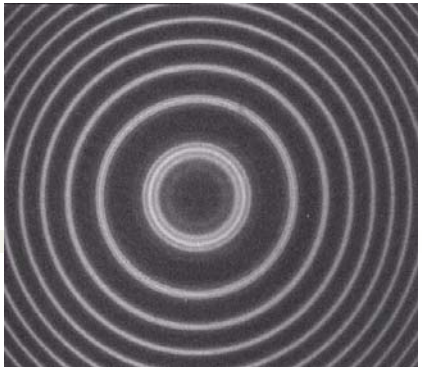


塞曼$\pi$分量



塞曼σ分量





3、实验测量

（1）旋转偏振片，找到分裂清晰的π线，以同一格式分别保存未加磁场和加上磁场的两个干涉图；用高斯计测量磁场强度B值并记下此数值（测量10次取平均值）。

（2）用“塞曼效应智能分析软件”分别打开已保存的两个图像，未加磁场时的干涉图像用来确定干涉圆环的圆心坐标，加上磁场后分裂的干涉图用来测量各个干涉级的直径值，记录各个干涉级的直径值，计算$\Delta D^2$和$\Delta D_{ab}^2$，其中$D_b^2 - D_a^2$取三个干涉级中各干涉级相邻条纹的直径的平方差的平均值，$D_{K-1}^2 - D_K^2$取三个干涉级所对应的中间条纹之间的直径平方差的平均值。

（3）利用测量和计算所得数据分别求出波数差和电子荷质比的值，将实验所得的结果与理论值进行比较，计算百分误差。

# 五． 注意事项

1、F-P标准具只是放在光具座上，移动时要小心移动并用手做好保护，以免摔坏。

2、汞灯不能频繁开关。

3、F-P标准具及其它光学器件的光学表面，都不要用手或其他物体接触。

4、以同一格式分别保存未加磁场和加上磁场的两个干涉图时光具座上的光具必须处于同一状态。

# 六、思考题

1、什么叫塞曼效应、正常塞曼效应、反常塞曼效应？

2、反常塞曼效应中光线的偏振性质如何？并加以解释。

3、如何判断F-P标准具已调好？

# 作业布置

- 根据实验要求完成相应的实验报告撰写。