

## 实验6 塞曼效应

1896年塞曼（Zeeman）发现当光源放在足够强的磁场中时，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。后人称此现象为塞曼效应。

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  $L=eB/4\pi mc$ ）。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。1925年，乌仑贝克和吉兹米特为了解释反常塞曼效应，提出了电子自旋的假设，应用这一假设能很好地解释反常塞曼效应，也可以说，反常塞曼效应是电子自旋假设的有力根据之一。

从塞曼效应的实验结果中可以得到有关能级分裂的数据，即由能级分裂的个数可以知道能级的J值，由能级的裂距可以知道g因子。因此直到今天塞曼效应仍是研究能级结构的重要方法之一。而反常塞曼效应的研究推动了量子理论的发展和实验手段的进步，近年来在原子吸收光谱分析中用它来扣除背景，以提高分析的精度。在天文工作上，用塞曼效应来测量太阳和星体表面的磁场强度等等。

### [预习提要]

- (1) 什么是塞曼效应？分裂谱线与原子能级的关系如何？
- (2) 什么叫偏振光？它的分类和辨别方法？
- (3) 法布里-珀洛标准具的结构及其用途？
- (4) 如何观察塞曼效应的线偏振和圆偏振？

### [实验要求]

- (1) 学习调节法布里-珀洛标准具的方法，养成一丝不苟的严谨的科学实验态度。
- (2) 定性地观察塞曼效应现象，从而区分分裂谱线的成分；定量地测量分裂谱线 $\pi$ 分量的直径，从而掌握一种计算荷质比的方法。

### [实验目的]

- (1) 通过对Hg5461Å光谱线的塞曼效应的研究，观察磁场对谱线的影响（包括谱线分裂的数量和各分量的偏振态）；用望远镜的测微目镜，测出 $\pi$ 分量的直径，从而计算荷质比e/m。
- (2) 学会使用法布里-珀罗（Fabry-Perot）标准具。

### [实验器材]

电磁铁；笔型汞灯；供电箱；法布里-珀罗标准具；滤色片；偏振片；1/4波片；读数望远镜；导轨；滑座；显示器；数字毫特计。

### [实验原理]

#### (一) 塞曼效应

将光源置于磁场中时，光源所发出的光谱线将会分裂成波长很靠近的几条偏振化的分线，这种现象称为塞曼效应。

塞曼效应是由于原子的总磁距受外磁场作用而产生的。设原子在无外磁场时的某个能级的能量为 $E_0$ ，相应的总角动量量子数、轨道量子数、自旋量子数分别为J、L、S。当原子处于磁感应强度为B的外磁场中时，这一原子能级将分裂为 $2J+1$ 层。其各层能量为：

$$E=E_0 + Mg \mu_B B \quad (2-6-1)$$

式中 M 为磁量子数, 可取 J、J-1、……、-J 共 2J+1 个值; g 为朗德因子;  $\mu_B$  为玻尔磁距

( $\mu_B = \frac{hc}{4\pi m}$ ); B 为磁感应强度。

$$\text{对 L-S 耦合: } \mathbf{g} = \mathbf{1} + \frac{\mathbf{J}(\mathbf{J} + \mathbf{1}) - \mathbf{L}(\mathbf{L} + \mathbf{1}) + \mathbf{S}(\mathbf{S} + \mathbf{1})}{2\mathbf{J}(\mathbf{J} + \mathbf{1})} \quad (2-6-2)$$

设无外磁场时, 光源某条光谱线波数

$$\tilde{\gamma}_0 = \frac{1}{hc} (E_{02} - E_{01}) \quad (2-6-3)$$

式中 h 为普朗克常数, c 为光速。

那么当原子处于外磁场中时, 这条光谱线就分裂为若干条分线, 每条分线波数:

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma} &= \tilde{\gamma}_0 + \Delta\tilde{\gamma} = \tilde{\gamma}_0 + \frac{1}{hc} (\Delta E_2 - \Delta E_1) = \tilde{\gamma}_0 + (\mathbf{M}_2 \mathbf{g}_2 - \mathbf{M}_1 \mathbf{g}_1) \mu_B \mathbf{B} / hc \\ &= \tilde{\gamma}_0 + (\mathbf{M}_2 \mathbf{g}_2 - \mathbf{M}_1 \mathbf{g}_1) \mathbf{L} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta\tilde{\gamma} = \tilde{\gamma} - \tilde{\gamma}_0 = (\mathbf{M}_2 \mathbf{g}_2 - \mathbf{M}_1 \mathbf{g}_1) \mathbf{L} = (\mathbf{M}_2 \mathbf{g}_2 - \mathbf{M}_1 \mathbf{g}_1) \frac{\mathbf{Be}}{4\pi mc} \quad (2-6-4)$$

脚标 1、2 分别表示原子跃迁后和跃迁前所处的能级, 式中 L=46.7B 为洛伦兹单位, 式中外磁场 B 的单位为 T (特斯拉), 波数 L 的单位为米<sup>-1</sup> [特斯拉]<sup>-1</sup>。

$M_2$ 、 $M_1$  还应服从下列选择定则:

$$\Delta M = M_2 - M_1 = \pm 1$$

$$\Delta M = 0 \quad (\text{当 } \Delta J = 0 \text{ 时, } M_2 = 0, \rightarrow M_1 = 0 \text{ 时除外}) \quad (2-6-5)$$

各光线的偏振态, 如表 2-6-1 所示。

表 2-6-1

选择定择	$\vec{\mathbf{K}} \perp \vec{\mathbf{B}}$ (横向)	$\vec{\mathbf{K}} // \vec{\mathbf{B}}$ (纵向)
$\Delta M = 0$	线偏振光 $\pi$ 成分	无光
$\Delta M = +1$	线偏振光 $\sigma$ 成分	右旋圆偏振光
$\Delta M = -1$	线偏振光 $\sigma$ 成分	左旋圆偏振光

表中  $\vec{\mathbf{K}}$  为光波矢量;  $\vec{\mathbf{B}}$  为磁感应强度矢量;  $\sigma$  表示光波电矢量  $\vec{\mathbf{E}} \perp \vec{\mathbf{B}}$ ;  $\pi$  表示光波电矢量  $\vec{\mathbf{E}} // \vec{\mathbf{B}}$ 。

## (二) Hg5461Å 谱线的塞曼效应

Hg5461Å 谱线产生于原子态  $6S7S^3S_1$  到  $6S6p^3p_2$  的跃迁, 两原子态的有关量子数, 朗德 g 因子及 Mg 的数值, 列于表 2-6-2。

表 2-6-2

原子态符号	$3S_1$	$3P_2$
L	0	1
S	1	1
J	1	2
g	2	3/2
M	1、0、-1	2、1、0、-1、-2
Mg	2、0、-2	3、3/2、0、-3/2、-3

考虑到选择定则(2-6-5),由表 2-6-2 即可得出 Hg5461Å 谱线的塞曼分裂的谱线,如图 2-6-1 所示。由图可见, Hg5461Å 谱线分裂为波数等间距、偏振态不相同的九条线。

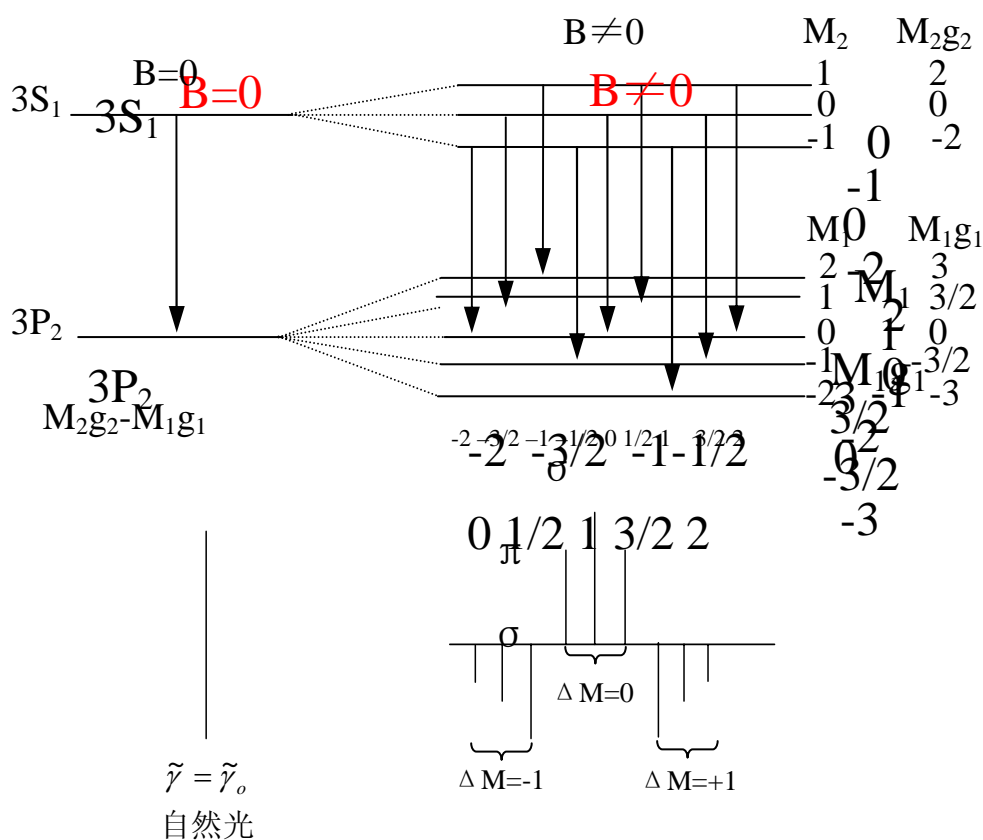


图 2-6-1 Hg5461Å 谱线在磁场作用下的能级分裂图

### (三) 法布里—珀洛标准具

#### 1. 法布里—珀洛标准具的介绍

塞曼效应产生的分线的波数间距 $\Delta \nu$ 很小,因此必须采用高分辨本领的仪器。本实验采用法布里—珀洛标准具。

法布里—珀洛标准具是由平行放置的两块平面玻璃板堆成,两板相对平面上镀有高反射系数的薄银膜,两膜层平面间用热膨胀系数很小的材料作成的间隔环固定起来,每个平面玻璃板的两面有一很小的夹角,由于两镀膜面平行,若用扩展光源,则产生等倾干涉条纹。具有相同的入射角的光线在垂直于观察方向的平面上的轨迹是一组同心圆。若在光路上放置透

镜，则在透镜焦平面上得到一组同心圆环形条纹图样。

由图 2-6-2 可见，在透射光束中，相邻光束的光程差： $\Delta = 2nd \cos \varphi$  (2-6-6)

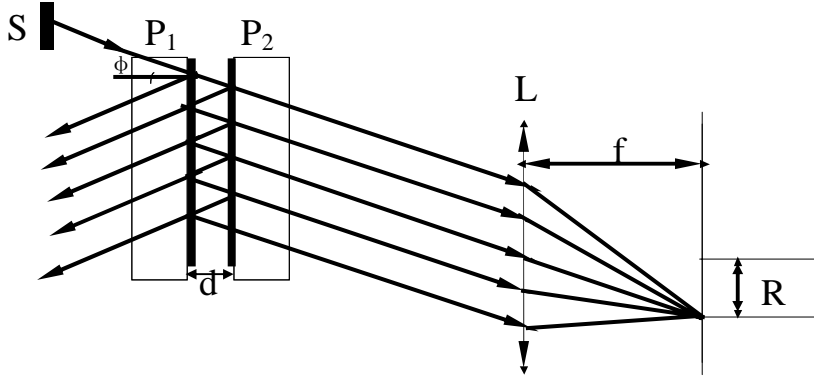


图 2-6-2 F-P 标准具的光路图

在空气中  $n=1$

$$\Delta = 2d \cos \varphi \quad (2-6-7)$$

产生亮条纹的条件为：

$$2d \cos \varphi = K\lambda \quad (2-6-8)$$

其中  $K$  为干涉级次， $\lambda$  为入射光波长。

图 2-6-2 中  $P_1$ 、 $P_2$  为 F—P 标准具两平面玻璃板， $d$  为两镀膜面间距， $L$  为会聚透镜， $f$  为其焦距， $\varphi$  为镀膜面间反射光与平面法线夹角， $R$  为干涉环半径。

下面，我们讨论表征标准具特征的两个参量。

(A) 自由光谱范围  $\Delta \tilde{\lambda}_{FSR}$  (或  $\Delta \tilde{\gamma}_{FSR}$ )

如果入射光波不是单一波长，而是在  $\lambda$  和  $\lambda + \Delta \tilde{\lambda}$  之间的波长范围内，则  $\Delta \tilde{\lambda}_{FSR}$  定义为：

$$\kappa(\lambda + \Delta \tilde{\lambda}_{FSR}) = (\kappa + 1)\lambda \quad (2-6-9)$$

$$\text{则} \quad R_{\kappa}(\lambda + \Delta \tilde{\lambda}_{FSR}) = R_{\kappa+1}(\lambda) \quad (2-6-10)$$

(2-6-10) 式表示：波长为  $\lambda + \Delta \tilde{\lambda}_{FSR}$  的第  $\kappa$  级亮条纹和波长为  $\lambda$  的第  $\kappa+1$  级亮条纹在

透镜焦平面上发生重迭。显然，若  $\Delta \lambda < \Delta \tilde{\lambda}_{FSR}$  则入射光波长为  $\lambda + \Delta \lambda$  的各波的第  $\kappa$  级亮条纹，将按波长大小的次序分布在入射光波长为  $\lambda$  的第  $\kappa$  级亮条纹交叉的现象。由此可见，自由光谱范围表征标准具产生的干涉条纹不重叠的范围，也称为标准具常数。

由 (2-6-8) 式知， $\Delta \tilde{\lambda}_{FSR}$  是一个与  $\lambda$ 、 $d$ 、 $\varphi$  均有关的量，通常取  $\varphi=0$ ，

则 
$$\Delta \tilde{\lambda}_{\text{FSR}} = \frac{\lambda^2}{2d} \quad (2-6-11)$$

使用 F—P 标准具时常取波长区间小于自由光谱范围的光。本实验是用滤色镜从汞放电管光源中取出 5461Å 谱线。

(B) 分辨本领

F—P 标准具的镀银面反射系数愈大，由透射光所得干涉亮纹愈细锐，因而刚能分辨的两相邻亮条纹几何间隔愈小，相应的两相邻波长的波长差  $\Delta \tilde{\lambda}$  愈小。故分辨本领定义为：

$$R_0 = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = KN_e \quad (2-6-12)$$

式中 K 是干涉条纹，由于  $2d=K\lambda$ ，故 d 愈大，K 愈大， $R_0$  也愈大； $N_e$  为有效光束数目，是一个随系数变化的量，为了获得高分辨本领，反射系数须在 90% 以上。

例如对  $\lambda=5461\text{Å}$ ， $d=5\text{mm}$  的标准具，当反射系数等于 0.9 时，可得  $\lambda/\Delta\lambda \approx 5.5 \times 10^5$ ，故对 5461Å 的光，能分辨的波长差为 0.01Å。因此可见，F—P 标准具是一种分辨本领很高的光学仪器。

(2) 、用标准具，测量波长差及 e/m

如图 2-6-2 所示：

$$R_h = ftg\varphi$$

或者用直径表示

$$D_k = 2ftg\varphi \quad (2-6-13)$$

当  $\varphi$  很小时， $\varphi = \frac{D_k}{2f}$ ，由此  $\cos \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2} = 1 - \frac{D_k^2}{8f^2}$  (2-6-14)

代入式 (2-6-8)，有

$$2d(1 - D_k^2/8f^2) = K\lambda$$

由此

$$D_k^2 = 8f^2(1 - \frac{K\lambda}{2d}) \quad (2-6-15)$$

对于同一波长  $\lambda$ ，相邻两次级 K 和  $K-1$  圆环直径的平方差，由 (2-6-15) 式可得

$$\Delta D^2 = D_{k-1}^2 - D_k^2 = 4\lambda f^2 / d \quad (2-6-16)$$

对于同一干涉级次，不同波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 + \Delta \tilde{\lambda}$ ) 而言，由 (2-6-15) 式可得：

$$\Delta \lambda = \frac{d}{4Kf^2} [D^2(\lambda_1) - D^2(\lambda_2)] \quad (2-6-17)$$

将 (2-6-16) 式代入 (2-6-17)，得：

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{K} \cdot \frac{D_k^2(\lambda_1) - D_k^2(\lambda_2)}{D_{k-1}^2 - D_k^2} \quad (2-6-18)$$

当  $\varphi$  很小时,  $\cos\varphi \approx 1, K \approx 2d/\lambda$ , 所以

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \cdot \frac{D_k^2(\lambda_1) - D_k^2(\lambda_2)}{D_{k-1}^2 - D_k^2} \quad (2-6-19)$$

利用波数表示:

$$\Delta\tilde{\gamma} = \frac{1}{2d} \cdot \frac{D_k^2(\lambda_1) - D_k^2(\lambda_2)}{D_{k-1}^2 - D_k^2} \quad (2-6-20)$$

由公式 (2-6-20), 即可利用标准具测量波长差或波数差。

由公式 (2-6-4)、(2-6-20) 得:

$$\Delta\tilde{\gamma} = \frac{1}{2d} \cdot \frac{D_k^2(\lambda_1) - D_k^2(\lambda_2)}{D_{k-1}^2 - D_k^2} = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{Be}{4\pi mc} \quad (2-6-21)$$

如以正常塞曼效应为例, 其所分裂的波数差  $\Delta\tilde{\gamma} = L = \frac{eB}{4\pi mc}$ , 将它代入公式 (2-6-20)

中得: 
$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi c}{dB} \cdot \left( \frac{D_k^2(\lambda_1) - D_k^2(\lambda_2)}{D_{k-1}^2 - D_k^2} \right) \quad (2-6-22)$$

只要测出 (2-6-22) 式右边各量, 就可计算电子的荷质比  $e/m$ 。

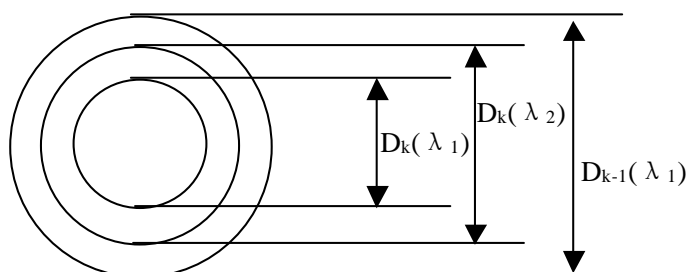


图 2-6-3 F-P 标准具干涉环直径的测量

## [实验内容]

### 1. 标准具的调节

在导轨上放好标准具和望远镜, 使它们的光轴与汞灯在同一水平线上 (聚光镜与滤色片已装在标准具内)。打开电源, 点亮汞灯, 在不加磁场的情况下观察显示屏上的干涉环, 若不够清晰或不圆则需要调节标准具的三个螺钉和望远镜的焦距, 直到屏上的圆环清晰, 照度均匀, 并且环的圆心在显示屏的中心。判断的标准是: 用单色光照明标准具, 从它的透射方向观察, 可以看见一组同心干涉圆环。当观察的眼睛上下左右移动时, 如果标准具两个内表面是严格平行的, 即各处的  $d$  值相同, 圆环的大小不随眼睛的移动而变化。若标准具两内表面成楔形 (楔角很小), 当眼睛移动的方向是  $d$  增大的方向, 则有干涉圆环从中心“冒出来”,

或中心处的圆环向外扩大。这时就把这个方向的螺丝压紧，或把相反方向的螺丝放松，经过这样多次的细心调节后，可达到圆环不随眼睛的移动而变化。

## 2. 观察横向塞曼效应

逐渐增加磁场强度，会看到圆环逐渐变粗，直到分裂成九条谱线。在标准具与望远镜之间放上偏振片，将偏振片的偏振方向分别置于水平和垂直方向，看看谱线的变化情况，分辨出哪些是  $\pi$  成分，哪些是  $\sigma$  成分。

移动望远镜的测微目镜，测出各圆环的直径，再由公式 (2-6-22) 计算荷质比：

$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi c}{dB} \cdot \left( \frac{D_k^2(\lambda_1) - D_k^2(\lambda_2)}{D_{k-1}^2 - D_k^2} \right)$$

## 3. 观察纵向塞曼效应

将电磁铁的磁芯抽出，转动电磁铁  $90^\circ$  后，让汞灯的光从电磁铁的磁极芯射出，再将标准具向前移动与电磁铁极芯孔相靠近，观察塞曼效应的纵向。当磁场增加时，会看到  $\pi$  成分的三个环已不存在，只剩下  $\sigma$  成分的六个外环。在偏振片前加上  $1/4$  波片，使圆偏光变为线偏光，再转动偏振片，会区分出左、右旋圆偏振光。

### [数据处理]

移动望远镜的测微目镜，测出  $\pi$  成分相邻二组圆环的直径（每组数据测十次），求其平均值，算出  $e/m$  的值，计算相对误差  $E_{e/m}$  的值。

### [注意事项]

1. 用毫特计时，其探头一定不要碰硬物。
2. 电磁铁长时间通过较大的电流（1A 以上）时，线圈会发热，故在观察和测量完后，要及时减少电流为零。

### [思考题]

1. 从塞曼分裂谱中如何确定能级的 J 量子数？
2. 根据塞曼分裂谱的裂距如何确定能级的 g 因子？

### [参考文献]

1. 母国光，战元令. 光学. 北京：人民教育出版社，1982
2. 褚圣麟. 原子物理学. 北京：人民教育出版社，1979
3. 苟清泉. 普通物理学，原子物理部分. 北京：人民教育出版社，1961
4. 刘乐书，樊光汉. 近代物理实验. 成都：电子科技大学出版社，1998
5. 吴思诚，王祖铨. 近代物理实验. 北京：北京大学出版社，1986