

基于塞曼效应实验装置的微扰论实验研究

贺煜¹ 王志强² 马超尘³

(1. PB05203093 2. PB05203042 3. PB05203092)

摘要: 本文利用塞曼效应的实验装置进行了氢原子和汞原子的 Stark 效应研究, 结合汞原子的塞曼效应实验, 验证了量子力学的微扰论; 同时给出了氢原子激发态电偶极矩存在的证明; 并对大学物理实验中的塞曼效应实验给出一些创新性的方案。

关键词: 微扰论, 斯塔克 (Stark) 效应, 塞曼 (Zeeman) 效应, 原子激发态电偶极矩, 哈密顿量

1 引言

(1) 塞曼效应实验是原子物理学中的一个经典实验, 以直观的能级分裂展示了原子能级离散性, 对其精确的处理及解释需要量子力学的理论。对塞曼效应实验仪器稍加改进就可以进行 Stark 效应的实验, 而 Stark 效应也是一种量子效应, 通过这个实验, 可以直接验证量子力学中的微扰论。

(2) 由于斯塔克效应, 对原子电子引入的哈密顿量改变为

$$H' = e \vec{E} \sum_i \vec{r}_i = e E r \cos \theta = e E a_0 \left(\frac{r}{a_0} \right) \cos \theta \quad (1)$$

从而使得原子能级发生移动, 在本实验上将体现为干涉环的位置的移动, 同时环的宽度也将发生改变。由于斯塔克效应能级裂矩大小与塞曼效应量级接近故可以用到塞曼效应实验的光学分析仪器, 通过摄谱, 对比谱线将发现这种变化。

(3) 将上述(1)式与电偶极矩定义式 $P = e \sum_i \vec{r}_i$ 对比可知

$$H' = \vec{E} \cdot \vec{P} \quad (2)$$

故通过斯塔克效应的存在与否可以检验原子的电偶极矩。又由于氢原子斯塔克效应能级劈裂裂距的大小与其精细结构在一个量级上, 通过光谱干涉环的对比 (在不加滤波片时, 其干涉环的宽度主要由精细结构造成), 就可以直接检验理论的正确性。

(4) 我们小组由此出发进行了一系列实验, 得到了预期的结果, 同时还有一些意想不到的收获。

首先, 我们做了氢灯在加电场和不加电场情况下的对比, 因为不加电场时能级的分裂主要由能级精细结构造成, 其直接影响谱线的宽度。加上电场后引入了斯塔克效应, 通过比较加电场前后谱线变化, 即可知斯塔克效应对能级影响的程度。

我们又做了汞灯在加电场和不加电场时的比较, 验证汞在激发态是否存在线性斯塔克效应。

最后我们拍摄了汞灯在磁场中加电场和不加电场的谱线情况, 因为汞的塞曼效应能级已经有正确的理论结果, 通过比较差异, 可以判断汞斯塔克效应能级与塞曼效应能级的关系。

2 实验原理

(A) Stark 效应的理论分析

在不考虑氢原子的电子自旋和相对论因素时, 其能量本征方程为

$$\begin{cases} H_0 |nlm\rangle = E_n |nlm\rangle \\ E_n = -\frac{e^2}{2a_0 n^2} \\ |nlm\rangle = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \psi) \end{cases} \quad (3)$$

1. 当主量子数 $n=2$ 时 $E_2 = -\frac{e^2}{8a_0}$, 当主量子数 $n=3$ 时 $E_3 = -\frac{e^2}{18a_0}$. 当存在

在外场微扰时 $H = H^0 + H'$, 其中

$$H' = e \vec{E} \sum_i \vec{r}_i = eEr \cos \theta = eEa_0 \left(\frac{r}{a_0}\right) \cos \theta \quad .$$

(4)

在同一主量子数 $n=2$ 里, 未加电场前能级四重简并, 其态矢 $|nlm\rangle$ 分别为 $|200\rangle, |210\rangle, |211\rangle, |21-1\rangle$, 而 H' 在这个四维空间的矩阵元为 $\langle \psi_{2l'm'} | eEr \cos \theta | \psi_{2lm} \rangle$, 经过计算可知其不为零的矩阵元仅有

$H'_{200,210} = H'_{210,200} = -3aeE$ (a 为玻尔半径), 故有

$$H' = \begin{bmatrix} 0 & -3aeE & & \\ -3aeE & 0 & & \\ & & 0 & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

解关于简并能级一级修正量的久期方程, 有其四个本征值为 $(0, 0, -3aeE, 3aeE)$. 故可知氢原子 $n=2$ 的态四重简并部分解除, 分裂为三个能级, 分别为 $E_2 = E_2^{(0)}, E_2^{(0)} - 3aeE, E_2^{(0)} + 3aeE$. (6)

2. 当主量子数 $n=3$ 时解法同上, 在此仅给出结果, 详见参考文献[1]。

其 H' 的矩阵形式变为

$$H' = \begin{bmatrix} 0 & & & & & & \\ & 0 & C & & & & \\ & C & 0 & & & & \\ & & & 0 & A & 0 & \\ & & & A & 0 & B & \\ & & & 0 & B & 0 & \\ & & & & & & 0 & C \\ & & & & & & C & 0 \\ & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由此解其一级修正量久期方程。例如其中 3×3 块对应方程为

$$\begin{vmatrix} -\Delta E & A & \\ A & -\Delta E & B \\ & B & -\Delta E \end{vmatrix} = 0 \quad \text{其中} \quad \begin{aligned} A &= -3\sqrt{3}eEa \\ B &= -3\sqrt{6}eEa \\ C &= -\frac{9}{2}eEa \end{aligned}$$

(8)

$$(-\Delta E)((-\Delta E)^2 - B^2) - A(-A\Delta E) = 0 \quad (9)$$

得到特征值只有三个： $\Delta E_1 = 9eEa, \Delta E_2 = -9eEa, \Delta E_3 = 0$

再很容易可以解得 2×2 块得到特征值 $\Delta E_4 = \frac{9}{2}eEa, \Delta E_5 = -\frac{9}{2}eEa$ ，分析后有 E_3 能级在外电场中分裂为 5 条谱线，间隔 $\frac{9}{2}eEa$ ，如下图 1 所示：

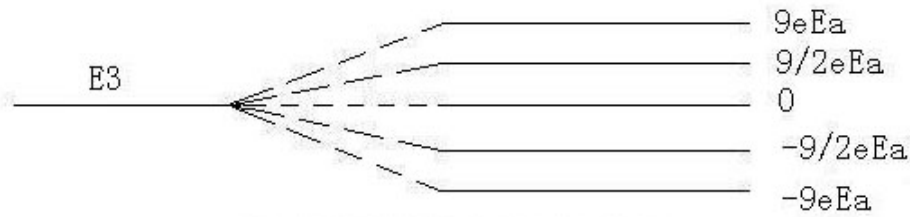


图1 加电场后能级E3分裂图

(10)

3. 同由文献 [1] 可知若计及平方斯塔克效应，其能量修正项为 $n \times 10^3 (4\pi\epsilon_0) E^2 a^3$ (n 为常数)，则其能量扰动与线性斯塔克效应扰动的比值为：

$$\frac{\Delta E(2)}{\Delta E(1)} \approx \frac{E^2 a_o^2 (4\pi\epsilon_0) \times 10^2}{10Ea_o} = 10Ea_o 4\pi\epsilon_0 = 3.125 \times 10^{-15} \ll 1 \quad (11)$$

故对于氢原子，在本实验中不必考虑平方斯塔克效应。所以对应氢原子巴尔末线系的 H_α 线（656.570nm，红光，由 $n=3$ 跃迁至 $n=2$ ），由上边的计算结果 (6)，(10) 可知

$$\Delta E(stark)_{\max} = 9eEa_o + 3eEa_o = 12eEa_o \quad (12)$$

(B) 塞曼效应的简明理论分析

在磁场中原子的哈密顿量一般写为

$$H = H_0 + \zeta(r) \vec{L} \cdot \vec{S} + \frac{eB}{2\mu c} (L_z + 2S_z) + \frac{e^2}{8\mu c^2} B^2 (x^2 + y^2) \quad (13)$$

由于其中

$$\left. \frac{\text{含} B^2 \text{项}}{\text{含} B \text{项}} \right|_{B=0.74T} = \frac{eB\rho_B^2}{4\hbar c} = \frac{B\rho_B^2}{4 \times 137e} = \frac{0.74 \times (10^{-10})^2}{4 \times 137 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 0.843 \times 10^{-4} < 10^{-4} \quad (14)$$

在我们的实验中 $B=0.74T$ ，故可以忽略由 B^2 项带来的影响，

$$\therefore H = H_0 + \zeta(r) \vec{L} \cdot \vec{S} + \frac{eB}{2\mu c} (L_z + 2S_z)$$

由参考文献[3]有，将其哈密顿量带入本征方程后

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{eB}{2m} \langle bLSJM | (\vec{j}_z + \vec{s}_z) | bLSJM \rangle \\ &= \frac{eB}{2m} (M\hbar + \langle bLSJM | \vec{s}_z | bLSJM \rangle) \\ &= g \frac{eb}{2m} M\hbar \\ &= \Delta Mg \mu_B B \\ &= 2 \times 0.927 \times 10^{-23} \times 0.74 \\ &= 1.37196 \times 10^{-23} J \end{aligned} \quad (15)$$

注：其中 $g = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}$, $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$

(C) 精细结构能级位移

考虑到相对论质量修正，自旋轨道耦合，原点附近相对论修正三个因素后，由文献[4]给出的氢原子精细结构能级位移公式为：

$$\Delta E = -\frac{a^2 E_n}{n^2} \times \left(\frac{3}{4} - \frac{n}{j + \frac{1}{2}} \right) = n \times 10^{-5} \text{ev} = n \times 10^{-24} J \quad (16)$$

我们需要的只是数量级上的估计，因此仅给出能级大小，其中 n 代表一个常数。

(D) 实验观测部分的理论分析

(1) 改进后的塞曼效应的实验装置

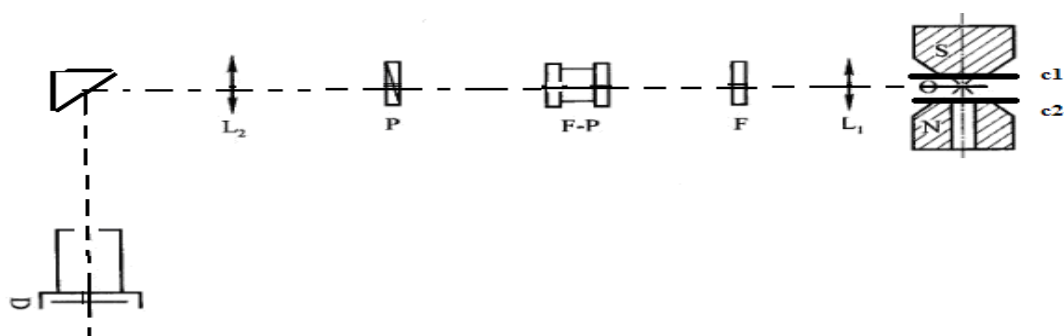


图 2.塞曼效应装置图

其中 O 为光源，实验中用氢辉光放电管； N 、 S 为电磁铁的磁极，电磁铁用直流电源供电。我们在 N 和 S 机之间加入两个铜片 $c1, c2$ 用来做电极，在氢灯周围产生强电场。铜片的规格为 $5.00\text{cm} \times 1.76\text{cm}$ ，相距 1.08cm 。在铜片上分别引出两根导线，接直流电源，其电压在 920V 左右。

L_1 为会聚透镜，使通过标准具的光强增强。 P 为偏振片，用以鉴别偏振方向。 F 为透射干涉滤光片，根据波长选择 $F-P$ 标准具 ($d=2\text{mm}$)。 L_2 为成像透镜，经过摄谱装置后使 $F-P$ 标准具的干涉纹成像在暗箱的焦平面上。通过过摄谱，读谱即可研究 Stark 效应。

(2) 测量仪器的参数性能分析

实验中我们先用塞曼效应仪器对干涉谱线照相，然后在底片放大仪器上对曝光的底片进行测量。塞曼效应仪器光路部分分析：

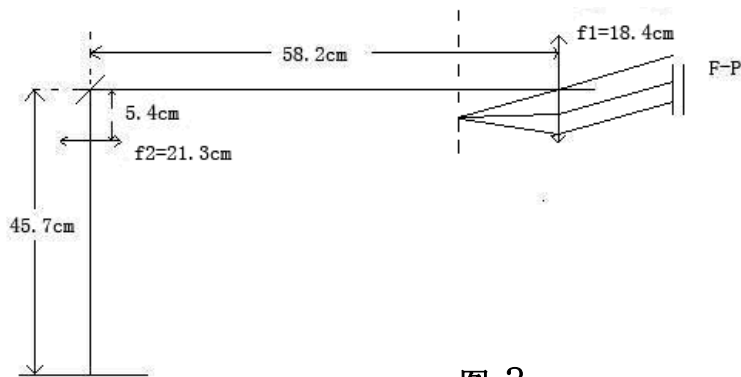


图 3

F-P 标准具出来的干涉光线在透镜 F1 焦平面上成像 A，这个像最终在透镜 F2 的焦平面上成像 B，而底片就是记录的这个像。B 相对于 A 的放大率为 $V = \frac{45.7 - 5.4}{58.2 - 18.4 + 5.4} = 0.89$

(17)

底片放大器上投出底片的像，仪器的放大率为 16

(3) F—P 标准具光路图分析

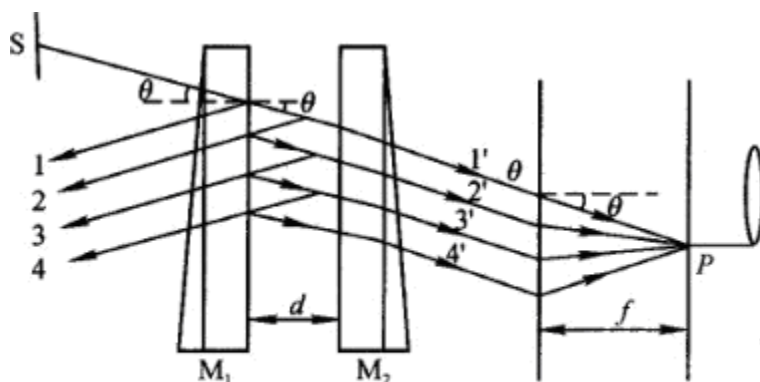


图 4 标准具光路图

上图为 F—P 标准具光路，可见出射角 θ 和圆环直径 D ，透镜焦距 f

间的关系为 $\tan \theta = \frac{D}{2f}$ ，对于靠近中心的圆环， θ 很小，近似有 $\theta \approx \tan \theta$ ，

$$\therefore \cos \theta = 1 - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \approx 1 - \frac{\theta^2}{2} = 1 - \frac{D^2}{8f^2} \quad (18)$$

又对于法布里珀罗标准具有（各符号定义见上图）

$$2d \cos \theta = k\lambda \quad (19)$$

将 (18) 代入 (19) $2d \cos \theta = 2d(1 - \frac{D^2}{8f^2}) = k\lambda$

(20) 又因为能量相对跃迁能级差为微小扰动, 设原来为

$$2d(1 - \frac{D_0^2}{8f^2}) = k\lambda_0 \quad (21)$$

加上电场 (磁场) 后 $2d(1 - \frac{D^2}{8f^2}) = k\lambda$ (22)

则 (22) - (21) 得 $k\Delta\lambda = -2d \frac{D^2 - D_0^2}{8f^2}$ (23)

又 $\lambda = \frac{c}{\nu} \Rightarrow d\lambda = -\frac{c}{\nu^2}d\nu \Rightarrow \Delta\lambda = -\frac{c}{\nu^2}\Delta\nu$ (24)

所以 $\frac{kc}{\nu^2}\Delta\nu = 2d \frac{D^2 - D_0^2}{8f^2}$ (25)

令 $D = D_0 + \Delta D$, 有 $D^2 - D_0^2 \approx 2D_0\Delta D$

$$\therefore \frac{kc\Delta\nu}{\nu^2} = \frac{2d2D_0\Delta D}{8f^2} = \frac{hkch\Delta\nu}{(h\nu)^2} = \frac{hkc\Delta E}{E^2} \quad (26)$$

得到 $\Delta D = \frac{hkc\Delta E}{E^2} \cdot \frac{2f^2}{dD_0}$ (27)

此即直径变化和能级扰动之间的关系式。其中 h, c 为常数, k 为最大干涉级, d 为 F-P 标准具的两个反射镜间距, E 为跃迁能级差, ΔE 为扰动量, f 为焦距, D 为干涉环直径。

3 实验内容

(A) 使用 2mm 的 F-P 标准具, 调节光路共轴, 再调节 F-P 标准具到其最佳分辨状态, 即要求两个镀膜面完全平行。此时用眼睛直接

观察 F-P 标准具，当眼睛上、下、左、右移动时，圆环中心没有吞吐现象，且目镜中观察各级条纹都非常清晰。

(B) 将氢灯放在两个铜片中间，然后把铜片的引线连接至高压电源上，要求电源电压稳定，且在 1000V 左右。同时用万用表测量电源电压，防止电压波动造成谱线移动。

(C) 给氢灯通电，待氢灯稳定且亮度最佳后，从目镜观察谱线，调节目镜位置及全反射棱镜的位置，使得干涉环为红光 ($n=3$ 能级向 $n=2$ 能级跃迁产生)，且使环的亮度，锐度均最佳。

(D) 换上摄谱仪，继续调节成像透镜的位置，使得环心在摄谱仪中央，且亮度，锐度均处于理想状态。

(E) 再装入预先准备好的底片，曝光 12min, 取下底片同时标号，防止混淆。注意在曝光开始后的第 1 分钟，第 6 分钟，第 12 分钟分别读取三次铜片之间的电压，然后取其平均值。

(F) 关掉铜片的电源，然后换上另一张底片，摄谱 12min 后取下，注意操作过程中不要改变仪器光路状态。

(G) 将两张摄完谱后的底片盒拿到暗室，分别显影 10min, 在水中冲洗后，定影 10min 后烘干。

(H) 换上 Hg 灯和 5mm 的 F-P 标准具，并加上偏振片，使其偏振方向沿竖直方向，重复上述 (A) --- (G) 步

(I) 打开塞曼效应实验装置中的磁场电源，并调节线圈电流大小，使干涉条纹发生适当重合（能看见三条），再重复上述 (A) --- (G) 步，注意同时要在每摄一次谱后拿下 Hg 灯，加上毫特斯拉记，测量磁

场大小。

(J) 将拍摄的底片拿到光学分析仪器下，调好焦距，然后确定环心，分别测量在可辨认的情况下每条环在横轴和纵轴方向的内径和外径。

注：对于 Hg 加磁场的那两张底片只需要测量各级的内外径，而不必测定每个细环。

4 实验数据处理结果

(A) 这是实验中拍摄的氢灯在加电场和不加电场时得干涉谱



图 5. H, 无电场

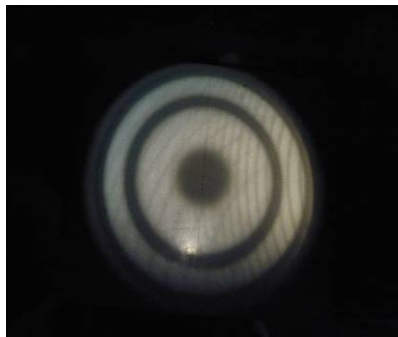


图 6. H, 加电场

对测量数据计算后有下表，其中第一行含[E]表示加电场项。

级数	D (cm)	<D> (cm)	D(cm) [E]	<D> (cm) [E]	直径差	外径差	理论值 (cm)	相对误差
K-1 内径	19.10	20.68	18.65	20.18	0.45	0.56	0.4922	13.9%
K-1 外径	22.26		21.70		0.56			
K-2 内径	28.22	29.30	27.82	28.97	0.40	0.26	0.3546	-26.6%
K-2 外径	30.38		30.12		0.26			
K-3 内径	34.87	35.89	34.53	35.55	0.34	0.36	0.2921	23.2%
K-3 外径	36.92		36.56		0.36			

表 1

统计外径差和理论差的差值，有 $\langle \Delta D \rangle = 0.0137cm, \sigma = 0.09378cm$ ，并作图，

见 下 图 7

(28)

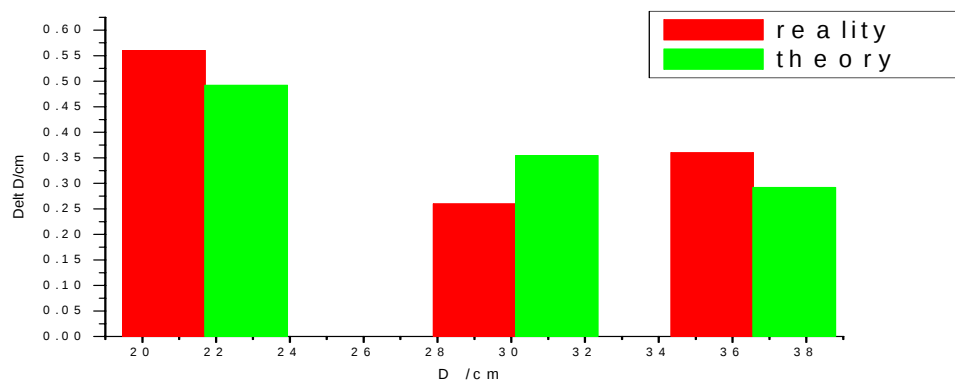


图 7

(B) 这是我们实验拍摄的汞灯分别加电场和不加电场时的干涉谱

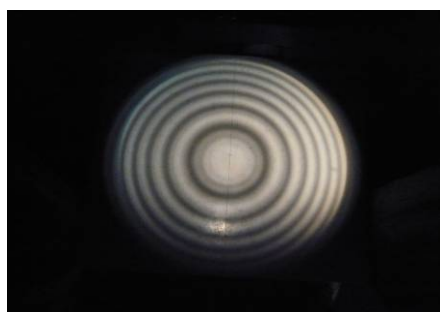


图 8.Hg,无电场

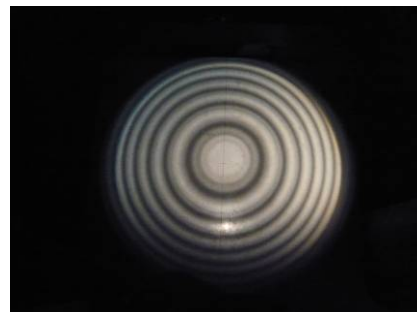


图 9.Hg, 有电场

对测量数据处理后有下表。

	无电场			加电场			归一直径差
级数	X (cm)	Y (cm)	中心 (cm)	X (cm)	Y (cm)	中心 (cm)	
K 内径	8.95	8.90	8.92	8.86	8.91	8.89	0.06738
K 外径	10.25	10.50	10.38	10.29	10.49	10.39	-0.01926
K-1 内径	14.95	15.04	14.99	14.90	15.00	14.95	0.05344
K-1 外径	15.95	16.37	16.16	15.91	16.38	16.15	0.01238
K-2 内径	19.28	19.36	19.32	19.21	19.38	19.30	0.02071
K-2 外径	20.21	20.47	20.34	20.20	20.45	20.33	0.00984
K-3 内径	22.85	22.85	22.85	22.71	22.90	22.81	0.03504
K-3 外径	23.72	24.22	23.97	23.48	24.45	23.97	0
K-4 内径	25.85	25.91	25.88	25.75	25.98	25.87	0.00773
K-4 外径	26.71	27.02	26.86	26.8	26.96	26.88	-0.01489

表 2

可得到归一 ($D=20\text{cm}$) 后直径差的平均值 $\bar{N}=0.0172\text{cm}$, 标准差

$\sigma = 0.02786\text{cm}$, 见 下 图 10

(29)

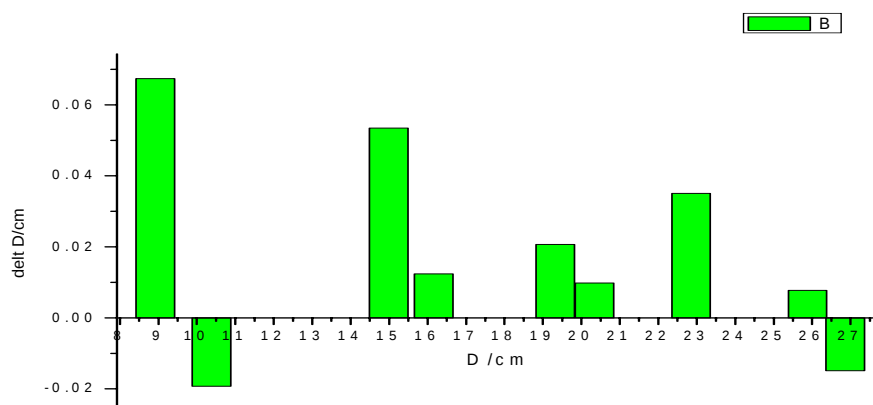


图 10

(C) 这是拍摄的 Hg 灯在加上 0.78T 的磁场后产生塞曼效应能级分裂的基础上分别不加电场和加电场的干涉谱：

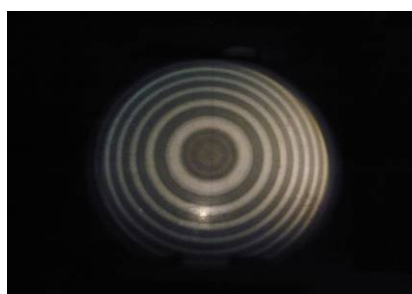


图 11.Hg,加磁场, 无电场

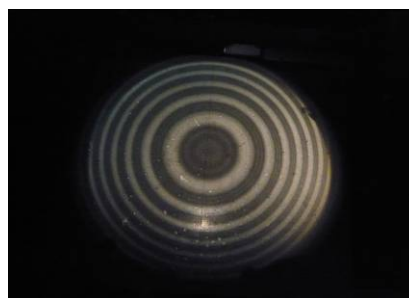


图 12.Hg, 加磁场, 有电场

测量的数据如下

级数	有磁场无电场			有磁场加电场			归一直径差
	X (cm)	Y (cm)	中心 (cm)	X (cm)	Y (cm)	中心 (cm)	
K-1 内径	11.60	11.45	11.52	11.45	11.55	11.50	0.03475
K-1 外径	14.25	14.15	14.32	14.10	14.20	14.15	0.03527
K-2 内径	16.75	16.80	16.77	16.80	16.75	16.78	-0.01192
K-2 外径	18.65	18.70	18.67	18.70	18.80	18.75	-0.08552
K-3 内径	20.80	20.70	20.75	20.75	20.70	20.72	0.02894
K-3 外径	22.20	22.30	22.25	22.25	22.45	22.35	-0.08969
K-4 内径	24.05	24.05	24.05	24.05	24.05	24.05	0
K-4 外径	25.20	25.45	25.32	25.35	25.40	25.38	-0.04734

表 3

可得到归一（D=20cm）后直径差的平均值 $\bar{N} = 0.001694\text{cm}$,标准
 差 $\sigma = 0.05173\text{cm}$, 见 下 图 13
 (30)

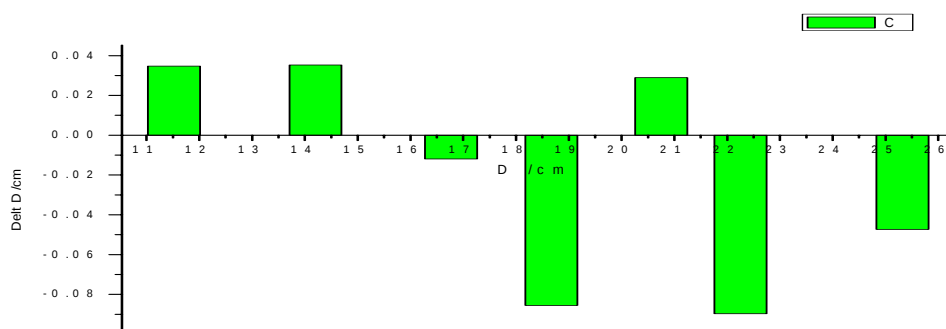


图 13

5 实验结果讨论

(A) 氢的斯塔克效应

1.在实验中，我们测量得到：

$U=925\text{V}$, $d(\text{Cu})=1.08\text{cm}$,图 4 中 $f_1=18.4\text{cm}$, f_2 的放大率
 $V=0.89$, 底片放大仪的放大率 $m=16$, 故电场
 $E=U/d_{\text{cu}}=0.85648\times 10^5\text{V/m}$, 代入式 (12) 有

$$\begin{aligned}\Delta E(stark)_{\max} &= 9eEa_o + 3eEa_o = 12eEa_o \\ &= 12 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.85648 \times 10^5 \times 0.53 \times 10^{-10} = 8.7155 \times 10^{-24} J\end{aligned}\quad (31)$$

又因为我们观测的是氢巴耳末线系的红光，即由能级 3 向能级 2 跃
 迁产生， $E = hcR_H[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}] = 6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 \times 1.0967758 \times 10^7 \times 0.13889$

$$\begin{aligned}&= 3.02527 \times 10^{-19} J \\ (32)\end{aligned}$$

又由于 (27) 式 $\Delta D = \frac{hkc\Delta E}{E^2} \cdot \frac{2f^2}{dD_0}$ 中的 D_0 为经图 4 中 f_1 成像后的直径, 而经过 f_2 后因为放大率为 $V=0.89$, 所以底片上的 $D'=0.89D$, 再经过底片放大仪的放大 $D''=m D' =mVD= 0.89 \times 16D=14.24D$

(33)

将上边的 $f_1, D, E, \Delta E$ 值代入 (27) 式有

$$\begin{aligned} \Delta D'' &= \frac{hkc\Delta E}{E^2} \cdot \frac{2f^2}{dD_0} = \frac{hkc\Delta E}{E^2} \cdot \frac{2f^2 (mV)^2}{dD_0} \\ &= \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 8225.8 \times 3 \times 10^8 \times 8.71554 \times 10^{-24}}{(3.0252732 \times 10^{-19})^2} \times \frac{2 \times 0.184^2 \times 14.24^2}{0.002 \times D_0} \\ &= 0.001068 \frac{1}{D''} \end{aligned} \quad (34)$$

注：上式单位为国际单位制

将式 (34) 中的 D'' 分别代为实验测得的 20.680cm, 29.300cm, 和 35.895cm, 便有理论上给出的直径移动值 0.4922cm, 0.3546cm, 和 0.2921cm 这便是表 1 最后一列的由来。

2. 由 (28) 知 $\langle \Delta D \rangle = 0.0137\text{cm}, \sigma = 0.09378\text{cm}$, 可见理论与实验相当吻合, 其中 0.0137cm 的误差相当小, 完全可能由人眼分辨, 估读, 仪器精度, 透镜的像差等各种因素引起。

3. 同时由斯塔克效应实验结果, 由式 (2) 即可知道氢原子在激发态 **电偶极矩的存在**。

4. 由式 (15) 与式 (31) 对比可知在实验中斯塔克效应和塞曼效应能量为一个量级, 十分接近, 而由这套实验装置可以很清晰的观测到塞曼效应, 故我们所观测到的确实是斯塔克效应, 而不会是由其他因素引起。当然, 要观察到明显的斯塔克效应, 能量量级至少还需提高一

到两个量级（这就是文献中常提到的 10^7V/m ）。

5.由式（16）知氢的精细结构能级为 $\Delta E = n \times 10^{-24} \text{J}$ ，式（31）知斯塔克能级贡献为 $\Delta E(\text{Stark}) = 8.7155 \times 10^{-23} \text{J}$ ，而不加电场时，谱线分裂主要由精细结构造成，的确也可以估计到在本实验中氢的线性斯塔克效应是个可观测量。

（B）汞原子的 Stark 效应和 Zeeman 效应

1.由参考文献[10]第2章，第5页，及文献[2]243页可知如果能级宇称是确定的，则一阶微扰下的Stark效应为零，需考虑2阶效应。只有当考虑的能级是宇称的叠加态时，此能级的Stark效应才是线性的。氢的能级对于L量子数简并，其他原子存在L-S耦合，即对于其它原子不存在一次斯塔克效应，它们一般都表现为二次斯塔克效应，只有当扰动能量相对非扰动能量间隔很显著时（在本实验中并不具备），一次斯塔克效应才变得重要。对于这些原子，一次效应总是在线系的高序谱中才变得重要。

2.由以上分析，在实验所加的电场 $0.85648 \times 10^5 \text{V/m}$ 下汞原子是不会体现出斯塔克效应的。而我们两组实验结果（见式（29）及（30））平均值 $\bar{N} = 0.0172 \text{cm}$ ，标准差 $\sigma = 0.02786 \text{cm}$ 和平均值 $\bar{N} = 0.001694 \text{cm}$ ，标准差 $\sigma = 0.05173 \text{cm}$ 。与汞的显著试验现象比较，大概还不到它的 $\frac{1}{10}$ 。

而且由汞的图（10）和图（13）和氢的图（7）比较可见，汞的变化完全是随机的，有正有负，说明这个误差是人为观测引起；而氢则是完全为正值且比较大（平均为4mm）。也就是说，类似示零实验，我们证明了汞是没有线性斯塔克效应的。

3.最后一组实验的意义是通过我们已知的汞的明显塞曼效应(图11),和加电场后的比较,由实验结果(30)直径差的平均值 $\bar{N} = 0.001694\text{cm}$, 标准差 $\sigma = 0.05173\text{cm}$, 知道汞的线性斯塔克效应的不存在。因为若存在,则其量级应该和氢的一样(尽管目前还没有明确的理论结果),在我们的实验条件下应该有可观测现象,但我们并没有观察到明显的实验现象,从而证明了它的不存在。

6 实验的意义及心得

Part1.意义

(1) 通过这个实验我们验证了量子力学中用微扰论方法处理得到的氢原子线性 Stark 效应,也就是验证了微扰论处理方法的正确性。

(2) 通过 Stark 效应间接的验证了氢原子在激发态存在电偶极矩这一事实。(经典的办法通常认为氢原子的电子做圆周运动,故不存在电偶极矩,但由文献[6]可知氢原子实际上存在电偶极矩)。

(3) 说明汞原子并不存在线性 Stark 效应,而且其平方斯塔克效应是非常小的。(通过其效应与汞原子的 Zeeman 效应比较证明的)

(4) 间接验证了氢的能级是简并的,是处于不同宇称的叠加态,其他原子关于量子数 n 是不简并的(试验用的是 Hg)。

(5) 通过本实验,给出了在不需较大改动且很少花费的前提下,在大学物理实验中可设 Stark 效应实验的可行方案。或者说是塞曼效应实验的一个扩展,让同学们更加体会量子理论的优美。

Part2 心得体会

(1) 通过这个研究性实验,我在调研文献及自己推导的过程中,加

深了对于光学，原子物理，量子力学的领会，而且将其与实验联系了起来。对知识有了更加清晰的认识，对实验提高了动手能力。同时扩充了自己的视野和思路。

(2) 深刻的体会到了“失败是成功之母”这句话的含义，我们在实验中屡遭失败，拍摄成功的那6张底片，是由失败的20多张底片堆起来的。要做实验本来就不易，要想做认真，更不易。同时我体会到了历史上那些著名的实验所体现的价值。

(3) 我们本来没有能想到实验结果跟理论是如此的一致，因为或多或少会有各种干扰因素，而且能量，仪器设备精度本身存在一定的局限。当用实验数据得到如此精妙的结果后，我们大为所震，深刻体会到了量子理论的威力和它所预计的准确程度。

(4) 我在试验中深刻感受到理论联系实践的重要性，在实验过程中已开始由于考虑不周，曾多次出现实验结果不符和理论的情况，但最终在更加深入的探讨下发现了问题的所在。也深刻明白了锲而不舍精神的可贵之处。

(5) 在这次试验中，我感觉自己的能力获得很大提高，对科学研究也有了初步的经历和认识，对探索未知问题的兴趣也大大加强。还有就是更加感到了团队协作的重要性。

7 致谢

霍剑青老师对我们的这次实验非常关心，多次给予我们重要提示，还经常鼓励我们，让我们转变观念增强信心使实验得以继续，在实验过程中也提供了大量帮助；谈尔强老师同样非常支持我们，为我

们准备了大量实验仪器并亲自帮我们调节仪器和光路；石名俊老师对实验的理论分析也给了我们很多指导，在量子力学方法处理斯塔克效应中给出了一些很有用的建议；陈向军老师在原子物理，量子力学处理本次实验的一些方法上给予指导，让我们对有些问题豁然开朗。

在此，谨对各位老师表示最衷心的感谢！

8 参考文献

[1]麻金继，氢原子 $n=4$ 能级的斯塔克效应[J]，安庆师范学院报，2003，9（1），11~17

[2]张永德，量子力学[M]，科学出版社，2005，242~244，260-263

[3]张启仁，量子力学[M]，科学出版社，2002，273~277

[4]徐克尊等，近代物理学[M]，高等教育出版社，1990，146~151，156-169

[5]轩植华，霍剑青等，大学物理实验[M]，高等教育出版社，2006，64~74

[6]黄接辉，杜为民，氢原子的固有电偶极矩[J]，量子光学学报，2004，10(2)，47~52

[7]霍剑青，光谱系列实验与光谱技术。http：
//jxzy.ustc.edu.cn/four

[8]塞曼效应实验

http://

www.bb.ustc.edu.cn/jpkc/guojia/dxwlsy/kj/index.html

[9]塞曼效应仪器介绍

<http://www.bb.ustc.edu.cn/jpkc/guojia/dxwlsy/kj/index.html>

[10] 张颖，原子在外场中的能级位移和组态混合，学位论文，上海交大，出版时间20000101，page5

[11] 喀兴林，高等量子力学 [M]，高等教育出版社，2004，140~154

9 附录

实验数据：

单位：cm

1、Hg 无电场 无磁场					2 、Hg 有电场 无磁场			
					U=940±5V			
	D 内	D 外	方向			D 内	D 外	方向
K	8.95	10.25	X		K	8.86	10.29	X
	8.90	10.50	Y			8.91	10.49	Y
K-1	14.95	15.95	X		K-1	14.90	15.91	X
	15.04	14.37	Y			15.00	16.38	Y
K-2	19.28	20.21	X		K-2	19.21	20.20	X
	19.36	20.47	Y			19.38	20.45	Y
K-3	22.85	23.72	X		K-3	22.71	23.48	X
	22.85	24.22	Y			22.90	24.45	Y
K-4	25.85	26.71	X		K-4	25.75	26.80	X
	25.91	27.02	Y			25.98	26.96	Y

4、Hg 无电场 有磁场					4、Hg 有电场 有磁场			
B=0.875T					U=940±5V B=0.875T			
	D 内	D 外	方向			D 内	D 外	方向
K		7.90	X		K		7.65	X
		7.80	Y				7.75	Y
K-1	11.60	14.25	X		K-1	11.45	14.10	X
	11.45	14.15	Y			11.51	14.20	Y
K-2	16.75	18.65	X		K-2	16.80	18.70	X
	16.80	18.70	Y			16.75	18.80	Y
K-3	20.80	22.20	X		K-3	20.75	22.25	X
	20.70	22.30	Y			20.70	22.45	Y
K-4	24.05	25.20	X		K-4	24.05	25.35	X
	24.05	25.45	Y			24.05	25.40	Y
5、H 无电场 无磁场								
K-1	D 内	19.43	18.77					
	D 外	22.45	22.06					
K-2	R 内	13.71	14.61	14.00	14.12			
	R 外	14.80	15.50	15.15	15.30			
K-3	R 内	17.00	17.80	17.44	17.50			
	R 外	17.95	18.78	18.40	18.71			
K-4	R 内	19.65	20.74	20.35				
	R 外	20.05	21.66	21.50				
6、H 有电场 无磁场								
U=925±5V								
K-1	D 内	18.70	18.60					
	D 外	21.61	21.80					
K-2	R 内	14.10	13.45	13.79	14.30			
	R 外	15.00	14.60	15.1	15.55			
K-3	R 内	17.45	16.61	17.2	17.81			
	R 外	18.30	17.65	18.35	18.83			
K-4	R 内	20.75	19.30	19.89	20.80 (中线)			
	R 外	21.40	20.26	21.00				

