

确定汞 5461Å 谱线相应能级的量子数

周乾飞

(复旦大学材料科学系 上海 200433)

利用气压扫描式 F-M 标准具观察汞 5461Å 谱线的塞曼分裂情况可以很容易地通过图谱中的波数差, 波的个数等因素确定其 $^3S_1-^3P_2$ 型跃迁。

摘要 塞曼效应是近代物理实验中最基础的实验之一, 本文所描述的实验选取的是汞 5461Å 谱线, 由于它本身有一定的强度, 塞曼分裂的复杂程度也不高, 用气压扫描式 F-P 标准具对气压进行扫描, 从而通过其实验图谱, 经过合理的 L-S 耦合假设, 并且经过一定的理论计算, 从而确定谱线的能级量子数。

关键词: 塞曼效应 量子数 气压扫描 L-S 耦合

Identifying the Quantum Numbers of Hg's 5461Å Spectrum

Zhou Qian-Fei

(Department of Material Science of Fudan University Shanghai 200433)

Abstract Zeeman Effect is one of the most essential neoteric experiments, and the experiment this article describes chooses 5461Å of Hg's spectrum., whose intensity is strong enough for us to observe and Zeeman Split is not complicated for us to understand,either. We can easily identify the quantum numbers of it by analyzing the spectrum in the mean of using baric scanning of F-P standard facility via the assumption of L-S coupling reasonably.

Key words: Zeeman Effect, Quantum Numbers, Baric Scanning, L-S Coupling

1. 引言

1896 年荷兰著名实验物理学家塞曼在洛仑兹学说影响下, 使用了比法拉第更加强的磁场进行实验, 发现钠双线的展宽, 在进行了高分辨率条件下的观察后, 发现其双线实际上产生了分裂, 这一现象后来被称为塞曼效应, 它有力地支持了光的电磁波理论, 使我们对原子、分子结构有了更多的了解, 证实了电子自旋假设的正确性。

在这个实验中我们以完全的 L-S 耦合为基本假设, 首先将其他因素排除在外, 对图谱进行分析得到有利的数据从而进行进一步地分析和合理地推断汞 5461Å 谱线的量子数。

此次实验目的在于通过本实验对塞曼分裂能级情况有进一步的确切的理解, 由于历来对于塞曼效应的理论知识许多书籍都有介绍, 因此本文主要介绍与实验有关的基础知识和原理, 然后简要介绍一下实验采用的设备, 最后通过实验结果与数据给出实验的分析方法与过程, 最后给出结论以及相应的数据误差分析与讨论。

2. 基本原理

将一个光源置于磁场中, 它的谱线会产生分裂, 分裂谱线相应于没有磁场时产生的偏

移值可以由以下公式确定，这里以波数差 $\Delta\tilde{\nu}$ 来表示

$$\Delta\tilde{\nu} = -(M_1g_1 - M_2g_2) \frac{Be}{4\pi mc^2} \text{ cm}^{-1}$$

其中 B 是磁场， e 和 m 是电子电荷与质量， M_1 和 M_2 是相应能级的磁量子数， g_1 和 g_2 则是 LS 耦合时的朗德因子，它们的计算公式由下面给出。

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

对于 LS 耦合的情况，有两个价电子的原子跃迁选择定理则为

$$\Delta S = 0$$

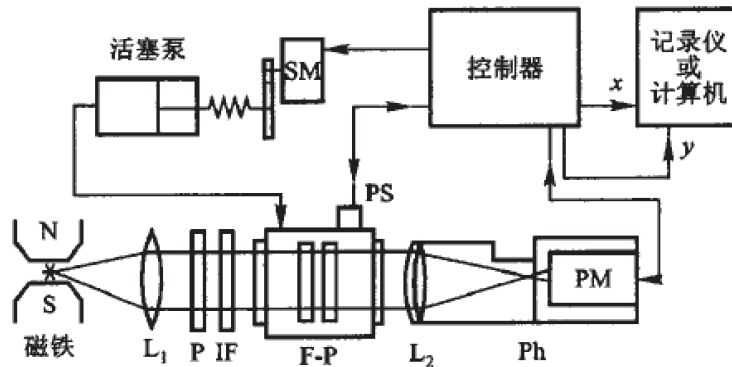
$$\Delta L = 0, \pm 1$$

$$\Delta M = 0, \pm 1 \quad (J=0 \text{ 到 } J=0 \text{ 是禁止的})$$

$$\Delta J = 0 \quad (M=0 \text{ 到 } M=0 \text{ 是禁止的})$$

3. 实验设备及实验方法

实验设备简要的由以下图进行说明



气压扫描式 Zeeman 效应实验装置

其中包括 L_1 、 L_2 两块聚焦透镜， P 为偏振片， IF 为干涉滤光片， PM 为 Na-II 型光电倍增管，0~199.9 kPa 扫描控制器，镜面间距为 1.998 mm 的 F-P 标准具， SM 为步进电机， Ph 为针孔光阑，直径 \varnothing 为 0.4 mm 和一个活塞式气压泵，使用的软件为 ZeemanLab。测得实验时用磁铁的磁场为 1050 mT。

对于本实验，由于是光路实验，所以必须对于光路有很好的精确调整，当然包括两个要素，首先必须将透镜，偏振片，干涉滤光片以及 F-P 标准具调整至同轴高，其次利用毛玻璃片保证汞灯的光集中在干涉环中心，最后调整 F-P 标准具内两镜的平行度使其达到理想平行，最后就可以利用气压扫描将图谱呈现在计算机内进行分析了。

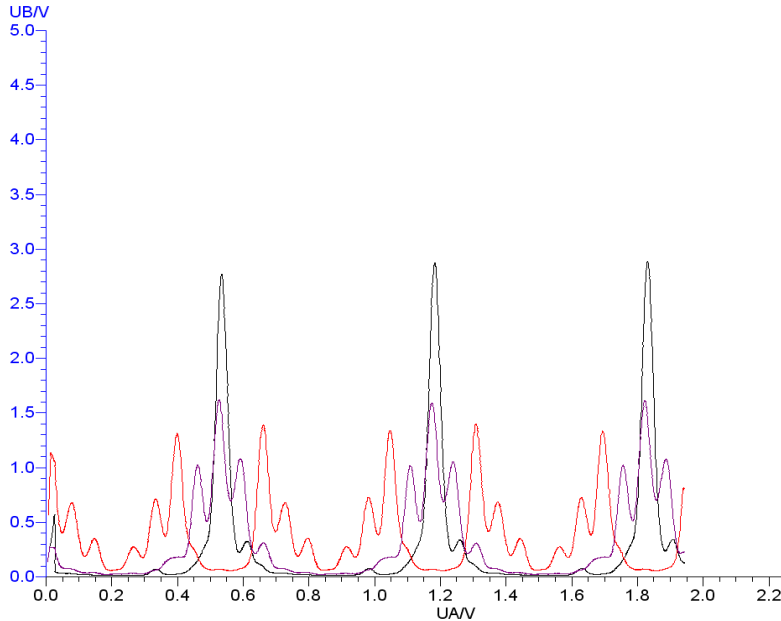
值得一提的是本实验由图可知我们选择在垂直于磁场方向进行观察汞谱线的塞曼分裂，其原因在于根据光子自旋理论， $\Delta M=0$ 和 $\Delta M=\pm 1$ 的两种跃迁光谱的电矢量分别是平行于和垂直于磁场方向的，故它们是两种偏振方向互相垂直的线偏振光，所以原则上来说可以利用偏振片作非常完全的分离，以便于之后的分析。

4. 实验结果以及数据基本处理

编号 距离	1	2	3	4	5	6	7	8
l	0.068	0.067	0.062	0.067	0.066	0.068	0.064	0.068
L	0.649	0.649	——	——	——	——	——	——

得到小峰间距 l 的平均值为 $\bar{l} = 0.066$ ；大峰间距 L 的平均值 $\bar{L} = 0.649$

以上实验数据的实验图谱如下所示，选取的小峰间距为图谱中第一个所得到



5. 实验数据处理方法及分析

5.1 $\Delta\tilde{\nu}$ 的确定

由于必须通过波数差才能对后面的量子数进行确定，所以我们首先必须通过以上的实验图谱进行处理以得到小峰之间的波数差值。

对于大峰，它们之间的距离根据不同级数的干涉条件有

$$m\lambda = 2tn_1$$

$$(m+1)\lambda = 2tn_2$$

m 表示为干涉级数，这里值得说明的是由于气压扫描实际改变的是光的折射率，所以我们分析时考虑的就是折射率的相对差值，以作为横坐标。通过以上的两个等式可以得到折射率差有以下关系。

$$\Delta n_1 = \frac{\Delta\lambda}{2t} \quad (1)$$

可以看出，对于大峰，不同级数干涉条纹之间的差值是不变的，即它本身与 m 不存在任何依赖关系。同样的方法，我们可以得到同一级塞曼分裂的干涉条纹，即小峰之间的距离可以由以下推倒

$$m\lambda_1 = 2tn_1$$

$$m\lambda_2 = 2tn_2$$

于是我们得到小峰之间的折射率差由波长差以及级数决定，即

$$\Delta n_2 = \frac{m\Delta\lambda}{2t} \quad (2)$$

容易看出不同级数的干涉，小峰之间的间距是有变化的，对应于不同干涉级数中相同两峰间距随 m 的增大而增大，但是我们能看出，对于汞 5461\AA 谱线，其波长在 10^7m 数量级，而 t 为 F-P 标准具中两镜面间距，为 10^3m 数量级，而对于 n_1 与 n_2 ，从宏观上来说是非常相近的，且为 10^0m 数量级，从而我们容易看出 m 是在 10^4 数量级上的常数，对于如此大的干涉级数，我们可以近似的认为 $m \approx m+1$ ，所以近似认为相邻两级干涉小峰间距没有展宽，这也是我们数据处理的基础，再通过宏观的等式

$$m\lambda = 2nt \quad (3)$$

$$\Delta\tilde{\lambda}_F = \frac{\lambda^2}{2t} \quad (4)$$

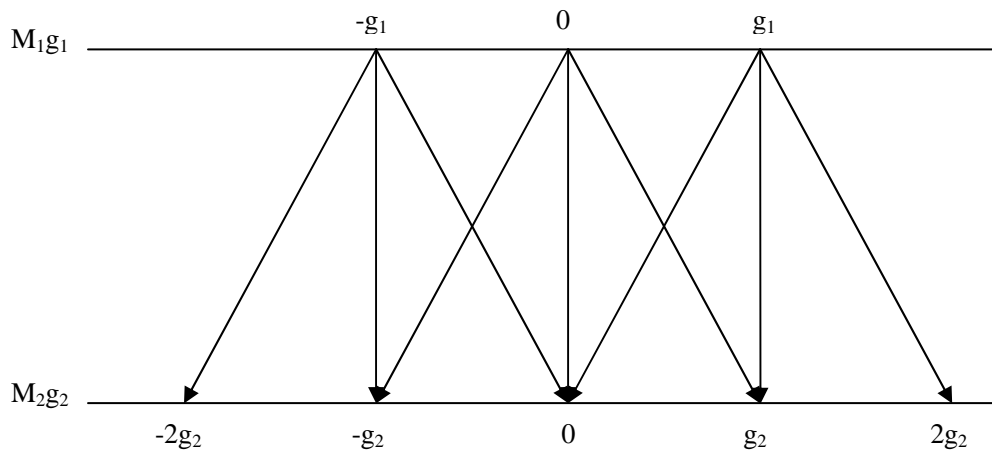
由于事实上 n 变化不大，我们近似认为其为 1，将上面 (1)、(2)、(3) 和 (4) 有关大峰以及小峰的间距条件公式联列便可以得到如下的公式

$$\frac{L}{l} = \frac{\Delta n_1}{\Delta n_2} = \frac{\Delta\tilde{\nu}_F}{\Delta\tilde{\nu}}$$

其中 $\Delta\tilde{\nu}_F = 1/2t$ 称为自由光谱范围， t 为 F-P 标准具两镜面间距。最后利用实验得到的大峰和小峰的间距平均值可以得到，小峰之间的波数差 $\Delta\tilde{\nu} = 25.45\text{ m}^{-1}$ 。

5.2 确定 $^3S_1 - ^3P_2$ 型跃迁 (确定汞 5461\AA 谱线的量子数)

利用偏振片可以将实验得到的 9 条谱线分开，容易看出其中包含有三条 $\Delta M = 0$ 的跃迁光谱和六条 $\Delta M = \pm 1$ 的跃迁光谱，这样我们很容易根据跃迁选择定则中的规定发现，汞 5461\AA 谱线一定是 $J=1$ 到 $J=2$ 之间的跃迁，只有这样才能满足实验中出现 9 条塞曼分裂光谱这一事实。我们可以由以下格罗春图进行表示



由上图我们可以假设两种情况，分别为 $g_1 > g_2$ 与 $g_1 < g_2$ 两种情况分开讨论，利用偏移值公式将所有能级的跃迁情况分开罗列出来并一一对应，以下以第二种情况讨论，当 $g_1 < g_2$ 时，我们得到 $\Delta(Mg)$ 分别为

$$g_1 - 2g_2, -g_2, -g_1, g_1 - g_2, 0, g_2 - g_1, g_1, g_2, 2g_2 - g_1$$

这九个 $\Delta(Mg)$ 分别对应于实验图谱中的九个峰，由于实验告诉我们九条峰之间是等间距的，所以一定有 $g_2 - g_1 = 2g_1 - g_2$ ，从而得到两个 g 因子之间的关系，将其带入偏移值公式，利用之前得到的波数差，便能得到 $g_1=1.09$; $g_2=1.63$ ，同样的方法我们运用于情况一之中，我们得到 $g_1=2.18$; $g_2=1.63$ 。

由于我们已经知道了跃迁发生在 $J=1$ 与 $J=2$ 之间，所以我们罗列出所有的量子情况，如下表所示。

J_1	L_1	S_1	g_1	J_2	L_2	S_2	g_2
1	1	0	1	2	2	0	1
1	2	1	1/2	2	3	1	2/3
1	1	1	3/2	2	2	1	7/6
1	0	1	2	2	1	1	3/2

容易看出只有最后一行跃迁是满足实验结果的，因此可以确定出，汞 5461Å 谱线的跃迁类型为 $^3S_1 - ^3P_2$

6. 实验结果及误差分析

通过以上的的方法，我们确定出了汞 5461Å 谱线跃迁能级的所有量子数，但是我们发现计算中的 g 因子还是有一定误差的，这一误差被我们所接受的主要原因在于我们假设了汞是完全的 L-S 耦合情况，但是事实上不完全正确，这是由于汞原子比较重，其原子激发态已经不再是纯的 L-S 耦合，而是介于 L-S 耦合与 J-J 耦合之间，但以前者为主，后者原子自旋-轨道耦合作用较强，从而造成了 L-S 耦合的结论部分失效，

其次，在利用电脑计算机测量峰间距时，即使测得的数据没有仪器不确定度，但是我们容易看出，汞 5461Å 谱线的塞曼分裂并不是对称分布的，在没有磁场的情况下也出现了几个弱峰，原本我以为是其 L-S 耦合的其他激发态跃迁导致的弱峰，但是经过验证，由于汞灯发出的谱线从 2500 到 5800Å 中，虽然之间相距 100Å 左右，但是波数差却相差很远，从图谱上来看，弱峰与主峰之间的距离，即波数差只有 $10m^{-1}$ 数量级，因此不可能是以上的情况，而必须是其他解释。

其弱峰产生的最合理的一种解释为汞原子的超精细结构，同位素效应以及电四极距因素，这里不作详细的讨论了。虽然实验得到的并不是完全精确的数据，但是我们可以看到这样的实验假设与方法是有其一定的合理度与参考价值的。

7. 结论

此次实验，我们利用汞原子 L-S 耦合这一基本原则，通过实验数据进行了一定地推理与假设，最终确定了汞 5461Å 谱线跃迁的两个能级的量子数，为以后的确定量子数工作提供了一种方法，也使得我们更了解了塞曼效应的基本原则。

参考文献:

- [1] 王正行 近代物理学 北京：北京大学出版社，1995. 264—266
- [2] 戴乐山 近代物理实验 上海：复旦大学出版社，2006 117—130
- [3] Jorge Merlo Flores 测定汞谱线 5461Å 相应能级的量子数
- [4] 陈星、潘正权 浙江大学 物理系 Hg 绿谱线超精细结构分析及相互作用常数计算