

实验 07 氢原子光谱的同位素位移

引言

光谱线系的规律与原子结构有内在的联系,因此,原子光谱是研究原子结构的一种重要方法。1885 年巴尔末总结了人们对氢光谱测量的结果,发现了氢光谱的规律,提出了著名的巴尔末公式,氢光谱规律的发现为玻尔理论的建立提供了坚实的实验基础,对原子物理学和量子力学的发展起了重要作用。

20 世纪初,人们根据实验预测氢有同位素。1919 年发明质谱仪后,物理学家用质谱仪测得氢的原子量为 1.00778,而化学家由各种化合物测得为 1.00799。基于上述微小的差别,1931 年伯奇(Birge)和门泽尔(Menzel)认为氢中有质量为两个单位的重氢 ^2H (即氘),在自然界的氢中, ^1H 和 ^2H 的含量比约为 4000 : 1,他们还指出可以用光谱的方法通过观察巴尔末线系谱线的伴线来发现重氢。1932 年尤里(Urey)等人用 3 米凹面光栅拍摄巴耳末线系的光谱,果然观察到在 H_α 、 H_β 、 H_γ 和 H_δ 的短波一侧均有一条弱的伴线。测量这些伴线的波长并与计算结果比较,在实验误差的范围内是一致的,从而证实了重氢的存在。后来测定,在自然界中重氢的含量只有 0.0156%,还不到五分之一。

实验目的

- 1 熟悉光栅光谱仪的性能与用法。
- 2 用光栅光谱仪测量氢和氘谱线的波长求质子与电子的质量比。
- 3 求里德伯常数。

实验原理

不同的同位素的光谱差别称为“同位素移位”。一般说来,元素光谱线的同位素移位的定量关系是很复杂的。对于重核,中子数目的增加除了增大原子核的质量以外,还会使原子核的半径发生变化,它们对同位素的光谱都有影响。只有象氢原子这样的系统,同位素移位才可以用简单的公式计算。氢原子中只有一个电子,电子和原子核绕二者的质心运动,原子核质量的改变导致折合质量的改变,从而使得里德伯常数的数值发生变化,由此可以计算同位素的大小。

在可见光区中氢的谱线可以用巴耳末的经验公式来表示,即

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (1)$$

式中 n 为整数 3, 4, 5……。

若改用波数表示谱线则

$$\tilde{\nu}_H = \frac{1}{\lambda_H} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (2)$$

式中 R_H 为氢的里德伯常数。

根据玻尔理论或量子力学得出的类氢离子光谱规律为

$$\tilde{\nu}_A = R_A \left[\frac{1}{(n_1/z)^2} - \frac{1}{(n_2/z)^2} \right] \quad (3)$$

式中 R_A 为

$$R_A = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c (1 + m/M_A)} \quad (4)$$

它是元素 A 的理论里德伯常数, z 是元素 A 的核电荷数, n_1 、 n_2 为整数, m 和 e 是电子的质量和电荷, ϵ_0 是真空介电常数, c 是真空中光速, h 是普朗克常数, M_A 是核的质量。显然, R_A 随 A 不同略有不同, 当 $M_A \rightarrow \infty$ 时便得到里德伯常数

$$R_\infty = \frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \quad (5)$$

所以

$$R_A = \frac{R_\infty}{1 + m/M_A} \quad (6)$$

应用到 H 和 D 有

$$R_H = \frac{R_\infty}{1 + m/M_H} \quad (7)$$

$$R_D = \frac{R_\infty}{1 + m/M_D} \quad (8)$$

可见 R_D 和 R_H 是有差别的, 其结果就是 D 的谱线相对于 H 的谱线会有微小移位, 即同位素移位, 通过精确测量 λ_H 、 λ_D , 就可由公式(2)计算 R_H 、 R_D 。

根据公式(2), 对于相同的 n , H 和 D 的波长差为

$$\Delta\lambda = \lambda_H - \lambda_D = \frac{1/R_H - 1/R_D}{1/2^2 - 1/n^2} = \frac{R_\infty(1/R_H - 1/R_D)}{R_\infty(1/2^2 - 1/n^2)}$$

根据式(7)(8), 且 $M_D = 2M_H$ 得 $\Delta\lambda \approx \frac{m_e}{2M_H} \lambda$, m_e 是电子质量, M_H 是氢核质量(即质子质量), λ 是用 R_∞ 代替 R_D 或 R_H 计算得到的 λ_H 或 λ_D 的近似值, 计算时可取 λ_D , 故质子和电子的质量比为

$$\frac{M_H}{m_e} \approx \frac{\lambda}{2\Delta\lambda} \quad (9)$$

实验内容

将光谱仪系统转换开关拨至“光电倍增管”档, 并启动“WGD-8A型光电倍增管”软件系统。

1 校准光谱仪

用汞光谱作为标准光谱校准光栅光谱仪。

- 1) 调节入射狭缝和出射狭缝的宽度；
- 2) 选择合适的参数：扫描工作范围、间隔，光电倍增管高压、增益等。
- 3) 扫描谱线并选一条强度中等的谱线作定波长扫描，移动光源使谱线强度最强。
- 4) 重新扫描汞灯光谱，寻峰，根据汞光谱的标准波长(见表 1)校准光栅光谱仪。

2 测量氢氘光谱

将汞灯换成氢氘灯，重复步骤 1)、2)、3)。注意，由于氢氘同位素移位很小，故应适当调小入射狭缝和出射狭缝的宽度，适当增大光电倍增管高压和增益。重新扫描氢氘光谱，寻峰并记录氢氘谱线的波长。氢的巴耳末线系波长见表 2。

3 计算里德伯常数及质子和电子的质量比

- 1) 利用 H_α 、 H_β 、 H_γ 和 H_δ 四条谱线波长的测量值计算里德伯常数。
- 2) 计算质子和电子的质量比并和理论值进行比较。

表 1 汞光谱的标准波长

颜色	紫	紫	蓝	蓝绿	绿	黄	黄	红
波长 nm	404.66	407.80	435.84	491.60	546.96	576.07	579.07	623.40

表 2 氢的巴耳末线系波长

谱线符号	H_α	H_β	H_γ	H_δ	H_ϵ
波长 nm	656.280	486.133	434.047	410.174	397.007
谱线符号	H_ζ	H_η	H_θ	H_i	H_κ
波长 nm	388.906	383.540	379.791	377.063	375.015

仪器简介

WGD-8A 型组合式多功能光栅光谱仪，由光栅单色仪，电箱(包括接收单元，电子放大器，A/D 采集单元)，计算机等组成。系统构成见图 1。

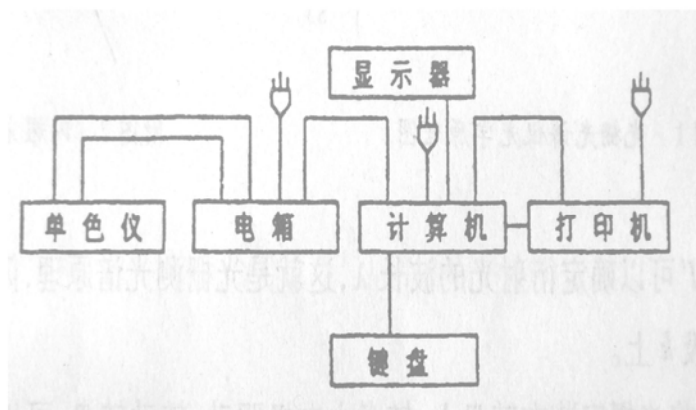


图 1 系统构成图

光栅光谱仪的光学原理见图 2。入射狭缝、出射狭缝均为直狭缝，宽度范围 0~2mm 连续可调，光源发出的光束进入入射狭缝 S_1 ， S_1 位于反射式准光镜 M_2 的焦面上，通过 S_1 射入的光束经 M_2 反射成平行光束投向平面光栅 G 上，衍射后的平行光束经物镜 M_3 成像在 S_2 上或 S_3 上。

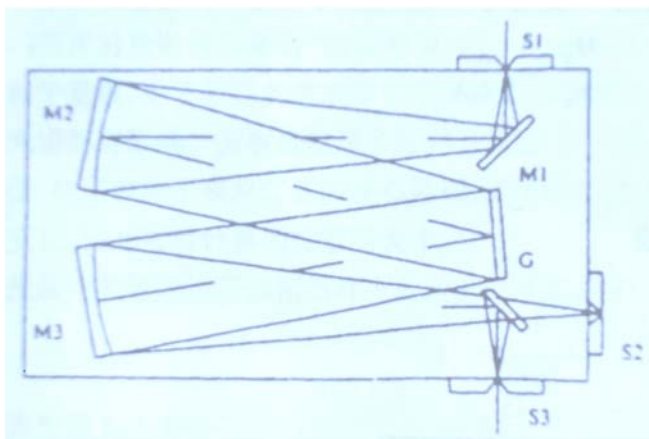


图 2 光栅光谱仪的光学原理

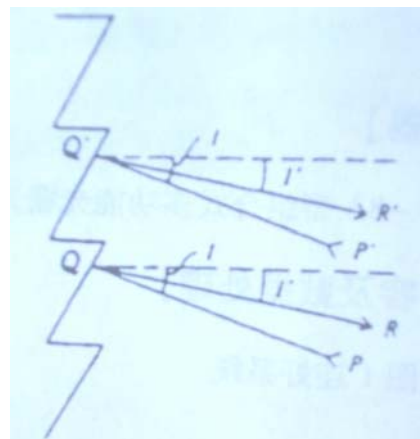


图 3 闪耀光栅

在光栅光谱仪中使用反射式闪耀光栅，如图 3 所示。现考虑相邻刻槽的相应点上反射的光线。 PQ 和 $P'Q'$ 是以 I 角入射的两条光线。 QR 和 $Q'R'$ 是以 I' 角衍射的两条光线。 PQR 和 $P'Q'R'$ 两条光线之间的光程差是 $d(\sin I + \sin I')$ ， d 是相邻刻槽的距离，称为光栅常数。当光程差满足光栅方程 $d(\sin I + \sin I') = k\lambda$ ， $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时，光强有一极大值，或者说将出现一亮的光谱线。

对同一 k ，根据 I 、 I' 可以确定衍射光的波长 λ ，这就是光栅测光谱原理，闪耀光栅将同一波长的衍射光集中到某一特定的级 k 上。

为了对光谱扫描，将光栅安装在转盘上，转盘由电机驱动，转动转盘，可以改变入射角 I 。改变波长范围，可实现较大波长范围的扫描。 $WGD-8A$ 型组合式多功能光栅光谱仪的扫描范围为 200~660nm。

$WGD-8A$ 型组合式多功能光栅光谱仪的使用方法详见仪器说明书。

注意事项

- 1 狭缝宽度范围 0~2mm，平时不用时，狭缝最好开到 0.1~0.15 mm 左右。
- 2 氘灯寿命很短，只有测量时才能打开电源。
- 3 实验中实验室应尽量暗一些。

思考题

- 1 光源位置不同，是否得到不同的谱图？是否影响波长的测量？
- 2 入射狭缝和出射狭缝的宽度对谱线有否影响？
- 3 在调节组合式多功能光栅光谱仪时，如何提高光谱的分辨率？

扩展与设计

- 1、测量不同光源的发射光谱（如白炽灯、溴钨灯、钠灯等），比较研究不同入射狭缝与出射狭缝大小时对光谱谱线的影响。
- 2、测量硫酸铜溶液吸收光谱，并计算出其最大吸收波长及其对应的物质吸收系数。