

# 用束-箔方法测量原子、分子激发态寿命

刘汉朋 王文勋

(北京师范大学)

迄今,关于原子、分子和离子激发态寿命的资料,主要是从实验得到。

原子、分子寿命的测量方法主要分为四类:延迟复合法;束-箔法;能级交叉法和相位移动法。一般地说,它们对技术的要求都很高,测量都较困难。在这方面,束-箔法显示出了它的独特优越性,它能将时间分辨转换成空间分辨,技术上易于实现。

## 一、束-箔光谱方法

束-箔光谱是六十年代以后发展起来的<sup>[1]</sup>。迄今已有几十种元素(从氢到铀)的原子、离子寿命用束-箔方法进行了测量。

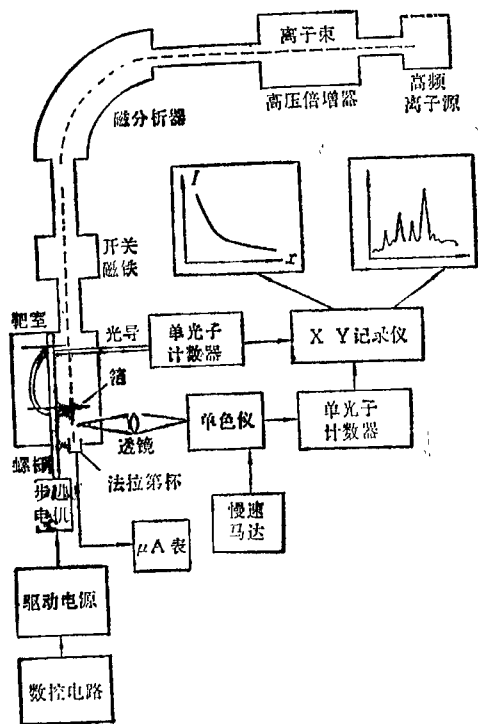


图1 束-箔光谱实验装置方块图

束-箔装置如图1所示,一束高速运动的离子穿过一个极薄的箔,由于“束”与“箔”的相互作用,使束中离子失去更多的电子而处于更高次电离态,或因获得能量而处于更高激发态(有的离子也会俘获电子)。此束离开箔后就会自发辐射而发光。可用光谱方法获得需要的信息。

我们在我校的离子注入机上进行了实验。所需的离子由高频离子源产生,由加速器加速到约200eV。离子束通过磁分析器后成为飞行方向一致、能量单一的离子流,射向靶室。靶室真空度约 $10^{-6}$ Torr。靶一般是一块碳膜,用真空镀膜法制备,厚度约400—700Å(面密度8—14 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )。我们也用过铝膜与金膜,实验证明,膜的材料不同对寿命测量影响不大。

通过膜后,离子束将退激发而发光,此光由单光子计数系统接收<sup>[2]</sup>。

若离子被加速到200keV,则其速度约为

$$v = \sqrt{2E/m} \approx 10^8 \text{cm/s},$$

而箔厚 $<700\text{Å}$ ,故束-箔作用时间约 $10^{-14}$ — $10^{-15}\text{s}$ ,远小于原子激发态平均寿命。故可以认为穿过箔的各离子是“同时”被激发,以后则是自由飞行。处于高能级K的粒子数依指数规律减少,故以此为上能级的某谱线光强为

$$I_K = I_{K_0} e^{-x/\tau_K}.$$

又因为粒子离箔后的飞行距离 $x = vt$ ,故

$$I_K = I_{K_0} e^{-x/v\tau_K}.$$

由此式可知,只要沿粒子飞行方向移动单色仪,就可得到 $I_K$ 随 $x$ 衰变曲线,即可得能级K的寿命 $\tau_K$ 。在实验中,都不是移动笨重的单色仪,而是向相反方向移动碳膜,可同样达到变化距离 $x$ 的目的。

实验中得到的指数衰减曲线总不会象理想

表 1

编号	元素及电离态	波 长 (Å)	跃 迁 组 态		上能级辐射寿命(ns)	
			下能级	上能级	本组结果	其它结果
1	HeI	4471	1s2p <sup>3</sup> P <sup>o</sup>	1s4d <sup>3</sup> D	25.5	31.5 <sup>[1]</sup>
2	HeII	4686	3d <sup>4</sup> D	4f <sup>2</sup> F <sup>o</sup>	3.51	4.53 <sup>[2]</sup>
3	HeI	4922	1s <sup>2</sup> p <sup>1</sup> P <sup>o</sup>	1s4d <sup>1</sup> D	25.7	36.6 <sup>[3]</sup>
4	HeI	5015	1s2s <sup>1</sup> S	1s3p <sup>1</sup> P <sup>o</sup>	1.53	1.73 <sup>[4]</sup>
5	HeI	5876	1s2p <sup>3</sup> P <sup>o</sup>	1s3d <sup>3</sup> D	11.6	14.16 <sup>[5]</sup>
6	CII	3876	2s2p3d <sup>4</sup> F <sup>o</sup>	2s2p4f <sup>4</sup> G	2.91	3.7 <sup>[6]</sup>
7	CII	4267	2s <sup>2</sup> 3d <sup>2</sup> D	2s <sup>2</sup> 4f <sup>2</sup> F <sup>o</sup>	3.55	3.7 <sup>[7]</sup>
8	CII	4372	2s2p3d <sup>4</sup> P <sup>o</sup>	2s2p4f <sup>4</sup> D	3.0	
9	CII	4411	2s2p3d <sup>3</sup> D <sup>o</sup>	2s2p4f <sup>3</sup> F	3.81	
10	CIII	4648	2s3s <sup>3</sup> S	2s3p <sup>3</sup> P <sup>o</sup>	12.16	12.5 <sup>[8]</sup>
11	CII	5145	2s2p3s <sup>4</sup> P <sup>o</sup>	2s2p3p <sup>4</sup> P	11.87	11.8 <sup>[9]</sup> , 14.2 <sup>[10]</sup>
12	NIII	4515	2s2p3s <sup>4</sup> P <sup>o</sup>	2s2p3p <sup>4</sup> D	11.09	
13	NII	4607	2s <sup>2</sup> 2p3s <sup>3</sup> P <sup>o</sup>	2s <sup>2</sup> 2p3p <sup>3</sup> P	6.17	
14	NII	5463	2s <sup>2</sup> 2p3p <sup>3</sup> P	2s <sup>2</sup> 2p3d <sup>3</sup> P <sup>o</sup>	10.41	

曲线那样光滑。我们实测到的 C<sup>2+</sup> 离子的 1s<sup>2</sup>2s3s<sup>3</sup>S—1s<sup>2</sup>2s3p<sup>3</sup>P<sup>o</sup> 的 4648 Å 谱线强度衰减图如图 2 所示。由此图算得 C<sup>2+</sup> 的 1s<sup>2</sup>2s3p<sup>3</sup>P<sup>o</sup> 能级的寿命为 1.22 × 10<sup>-8</sup>s。而其他人的结果是 1.25 × 10<sup>-8</sup>s<sup>[3]</sup>，基本一致。

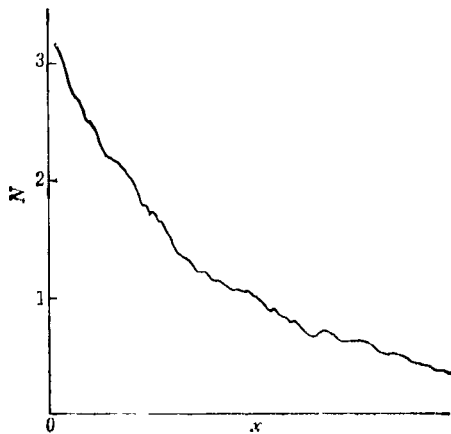


图 2 C<sup>2+</sup> 的 4648 Å 谱线强度衰变曲线  
(加速高压 160kV, 束流 0.5μA, 走纸速度 4mm/s;  
纵坐标 N 为光子计数)

我们实验中, 关于寿命的其他结果见表 1。

## 二、讨 论

束-箔方法的优点是: 将时间分辨变成了空间分辨, 技术上要求低; 束流的有效密度低,

又是定向运动, 故发光不受粒子碰撞和辐射陷落的影响, 束流的化学纯度高, 便于进行光谱分析, 特别适于研究高电离、高激发态<sup>[8]</sup>。

据粗略统计, 现有的原子、分子激发态寿命的数据中, 有 27% 的数据是用束-箔方法得到的。

我们的测量结果一般较公认值偏低(表 1)。原因大致有: 束-箔激发是无选择性的, 级联与本底辐射较强烈; 我们在数据处理上不甚精确; 我们未考虑离子束过箔时的能量损失, 这可带来百分之几的误差。文献表明, 只要采取适当措施, 束-箔法测寿命是可以达到很高精度的(可优于 0.2%)<sup>[9]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] S. Bashkin, Beam-Foil Spectroscopy, Springer-Verlag, (1976), 1.
- [2] 刘汉朋, 大学物理, No. 1(1984), 33.
- [3] A. Hibbert, Beam-Foil Spectroscopy, Plenum Press, (1976), 29.
- [4] I. I. Sobelman, Atomic Spectra & Radiation Transitions, Berlin, Springer, (1979); W. L. Wiese, Atomic Transition Probabilities, V. 1, NSRDS-NBS4, U. S. Government Printing Office, Washinton D. C., (1966).
- [5] G. Astner et al., Beam-Foil Spectroscopy, Plenum Press, (1976), 183.
- [6] I. Bergström et al., Phys. Lett., 28 (1969), 721.
- [7] M. C. Poulizac et al., Phys. Lett., 30A (1969), 87.
- [8] J. J. Curtis, Fast Ion Spectroscopy, Ed. de Physique, Paris, (1979), 139.