

文章编号: 1007- 4627(2000)03-0183-06

高电离态原子光谱测量*

杨治虎, 苏 弘, 马新文, 刘惠萍, 王友德

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 简要介绍了兰州重离子加速器上的高电离态原子光谱实验测量和取得的部分实验结果.

关键词: 高电离态离子; 激发光谱; 能级寿命

中图分类号: O561.5、O562.3 文献标识码: A

1 引言

高速离子束穿过箔时将产生电离, 箔内密集电子对束的电离作用可等效于高温下的热电离. 该温度可与炽热星球温度比拟. 基于这个原理衍生出了束箔光谱的实验研究技术, 这种技术将两个根本不同的领域, 即与加速器相联系的核物理技术和经典的光谱测量技术结合起来, 实现了光谱学家一直寻找新的和更精炼的光源的愿望, 尤其是能提供高电离系列的光源. 利用这种技术对不同元素、不同电离态的激发光谱、能级寿命、跃迁几率和振子强度等参数进行测量, 不仅对原子结构的理论研究有重要意义, 而且对天体物理、等离子体物理和激光物理也有实用价值. 目前利用这种技术研究的主要对象是重元素高电荷态原子, 这是因为处于高电荷态原子的研究有十分特殊的地位. 在理论研究中, 要修正过去 $\alpha Z \ll 1$ 的近似处理方法, 而且它与聚变能源和 X 射线激光的相关研究有着强大的应用背景. 尤其是类氢和类氦重原子的研究引人注目, 它的研究主要表现在研究能级超精细结构和检验物理学各种基本定律方面, 其中有些研究已取得令人瞩目的重要进展, 例如, 重类氢离子的兰姆位移和超精细劈裂的测定.

根据目前实验研究的现状和现有条件, 我们选择性地对较重元素的高电离态原子激发光谱学和碰撞转移过程进行了实验研究. 本文简要介绍束箔实验技术和已取得的部分实验结果. 对于高电离态离子与不同原子的碰撞过程的研究, 另有著文, 这里

不做介绍.

2 实验技术

图 1 是测量激发光谱和辐射衰变曲线的装置图. 由加速器提供的离子束, 通过分析磁铁, 确定束流能量和保证元素的化学或同位素纯度, 准直以后, 单能离子束穿过一个薄的固体靶(或气体靶), 我们采用的固体靶是自支撑非结晶 C, 对于低能(100–200 keV), C 箔厚度约 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 对于 MeV/u 以上的能量, C 箔厚度 20–50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. 靶厚通常是由出射束产生不同电离和激发态的平衡分布来确定的. 靶室一次装有 36 片 C 箔安装在丝杆上, 由步进电机控制靶盘运动, 目前可移动距离 380 mm, 走距 25, 100 和 300 mm, 误差分别不大于 ± 0.018 , ± 0.025 和 0.035 mm. 入射离子与靶的相互作用(例如电荷交换和非弹性碰撞)都是在快速离子穿过箔的瞬间进行的, 大约为 10^{-14} – 10^{-15} s, 这和能级寿命(10^{-9} – 10^{-12} s)相比是非常短的, 因此, 在能级寿命测量时把离子穿过箔的时刻当作能级衰变的起始时刻. 当较高能量的离子穿过箔时, 箔有助于束流离子的剩余电子的进一步剥离和激发, 激发原子和离子在箔后飞行过程中自发退激产生的光辐射构成束箔源, 这种源的特点是能获得非常好的时间分辨. 在光谱测量中不会出现谱线强度饱和现象, 实验测量也不会受到干扰和等离子体膨胀问题的影响以及产生异常能级. 另外, 还可利用束箔光源的单一谱线去鉴别其它新的跃迁谱线.

* 收稿日期: 2000-04-19

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19974057); 甘肃省自然科学基金资助项目

作者简介: 杨治虎(1954-), 男(汉族), 甘肃平凉人, 副研, 从事高电离态原子物理研究.

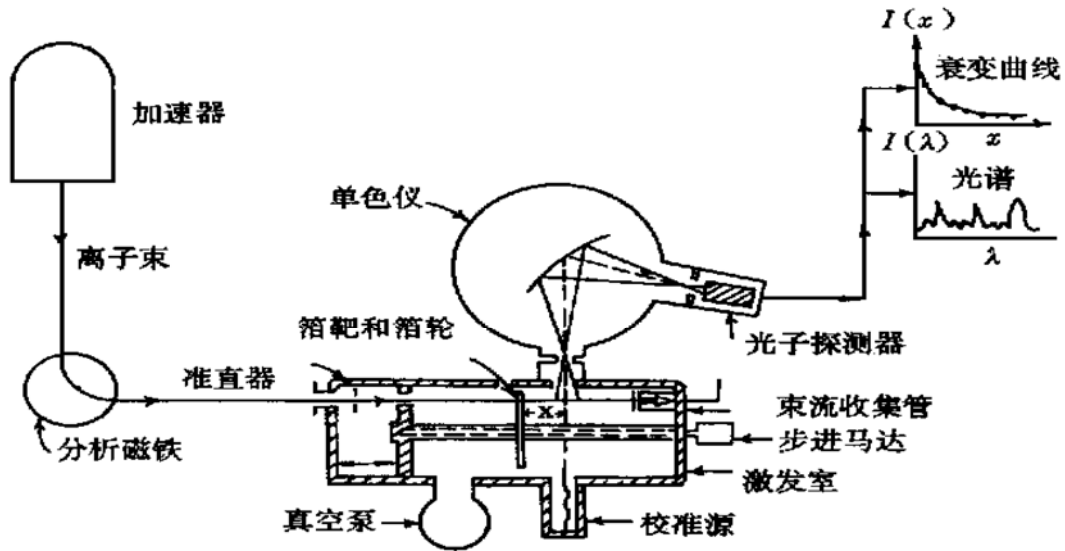


图 1 测量激发光谱和能级寿命示意图

实验过程中，由于加速器引出的束流不可避免地会有波动，测量信号也随之涨落，这对于光谱和能级寿命测量是不利的。为克服这一不利因素，采用电荷归一法，即用一个位于箔后的封闭的法拉第筒(在筒口外加 300 V 的负压，以免电子逸出)收集束流的电荷来归一光谱线强度和能级衰变曲线。该测量系统由一些标准 NIM 插件和研制的电子学仪器组成，其方框图如图 2 所示。扫描控制单元和计算机接口电路是为该系统专门设计的。扫描控制单元(Scan Control Unit)是这个控制系统中的重要控制部件，通过它实现对测量计数和步进电机驱动过程的控制，也通过它控制实现两个过程之间的切换。接口电路是系统与计算机通讯的关键电路，它不仅具有一般接口电路应有的性能，还具有计数功能。接口电路与计算机之间的通讯采用中断工作方式。接口电路中的计数器被称作在板计数器(On-

board Counter)，用来记录探测器收集的光子数。工作中采用的预置计数方式是控制在板计数器的计数时间，预置计数器 I 记录来自束流积分器的脉冲信号。该脉冲信号的频率正比与束流强度。工作时，当预置计数器 I 中的计数达到设置的预置数时，便关闭在板计数器，随后由接口电路向计算机发出中断申请，如果计算机接收中断申请，便启动相应的中断服务程序，读取在板计数器中的数据，并进行相应处理。在读取和处理结束后，计算机发出启动信号，经过扫描控制单元，启动步进电机移动，扫描控制单元产生控制脉冲信号控制步进电机移动。步进电机移动的量决定预置计数器 II 中的预置计数。当步进电机移动的步数达到预定的数值后，步进电机将停止移动，并重新启动预置计数器 I 开放接口板上的在板计数器重新开始计数。

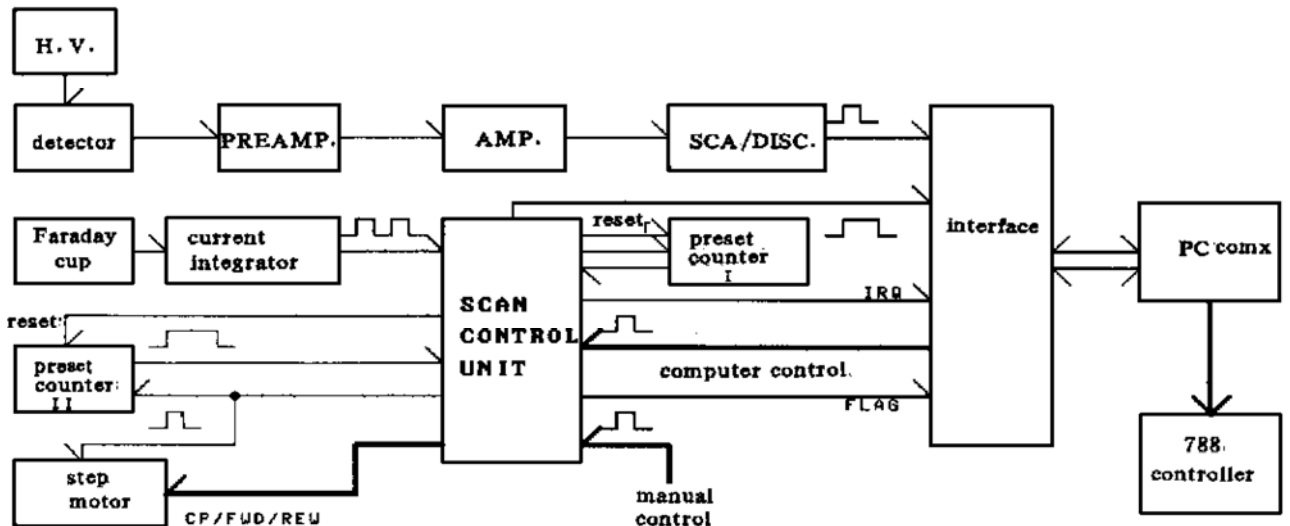


图 2 单色仪控制扫描电子学系统

3 光谱测量

重离子穿过固体箔后, 通过它发射的光来研究重离子结构, 这是束箔光谱学的主要任务, 它可研究一种元素电荷态范围很宽的原子和离子光谱. 我们利用兰州重离子加速装置(HIRFL)产生的不同较高能量的离子, 在 Mcpherson247 型掠入射真空紫外光栅单色仪上选择性地对有关元素的高电离、少电子(剥掉多电子)离子光谱学进行了测量, 虽然这些测量是初步的, 其中的少电子离子光谱无疑有助于对量子电动力学和相对论等的研究.

3.1 Ne 离子谱

实验中的 Ne^{4+} 离子入射能量为 47 MeV, C 箔的厚度为 $39 \mu g/cm^2$, 用经验公式^[1]得到的平均电荷为 8.6. 各种电荷态所占的成分为: Ne^{9+} 和 Ne^{8+} 分别占 23% 和 22%, Ne^{10+} 和 Ne^{7+} 分别占 16% 和 15%, 其余电荷态的成分占的比例很小. 从图 3 测量的光谱的分析可以清楚地看出, 较强的谱线主要

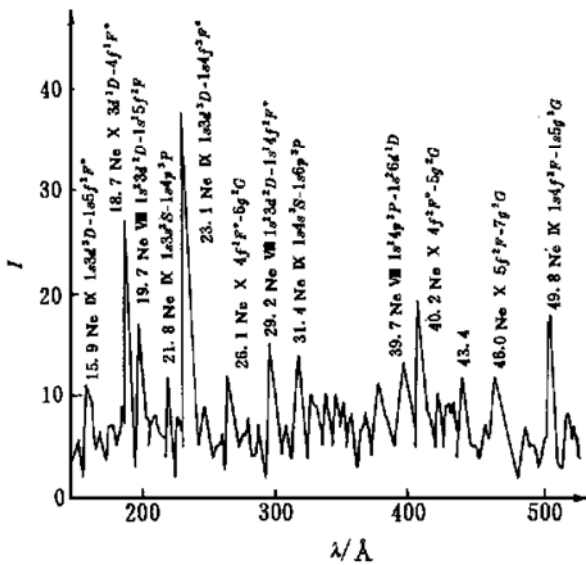


图 3 47 MeV 的 Ne 离子穿过 C 箔后的激发光谱

是类氢(Ne^{9+})和类氦(Ne^{8+})光谱, 从较强的谱线可准确地确认它们的电离态和跃迁能级, 对于一些较弱的谱线目前还难以确认, 可以肯定, 它们都是类氢、类氦电离态, 只有少数是类锂谱线^[2].

3.2 Ar 离子谱

实验中 Ar^{8+} 离子入射能量为 94 MeV, Ar^{8+} 离子经过厚度为 $39 \mu g/cm^2$ C 箔后, 被进一步剥离, 成为带有少电子的高电荷态离子, 平均电荷态为 14.4. 各种电荷态 Ar XVII, Ar XVI, Ar XV, Ar

XIV, Ar XIII 所占成分的比例为 11.53: 31.52: 35.42: 16.35: 4.00. 其余离子成分都非常小. 图 4 是观察到的光谱的一部分. 根据现有资料和理论计算, 实验上测量的 Ar 谱主要是类 Be、类 B、类 C 离子的跃迁谱线^[3].

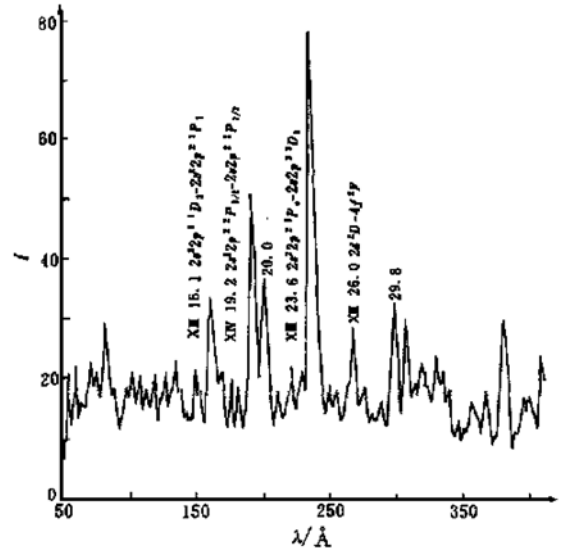


图 4 94 MeV Ar 离子穿过 C 箔后部分较强激发光谱

3.3 S 离子谱

实验中的 S^{6+} 离子入射能量为 80 MeV, 穿过

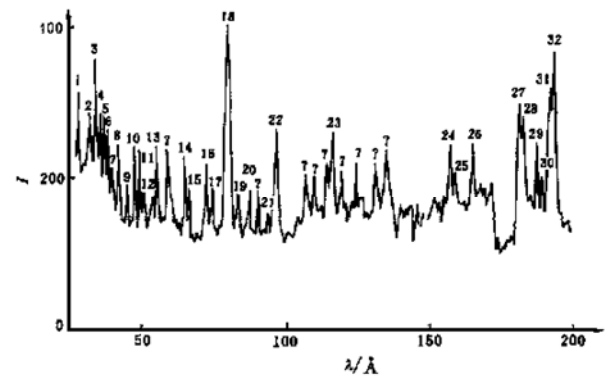


图 5 低于 200 A 的 SX 至 S XVI 光谱

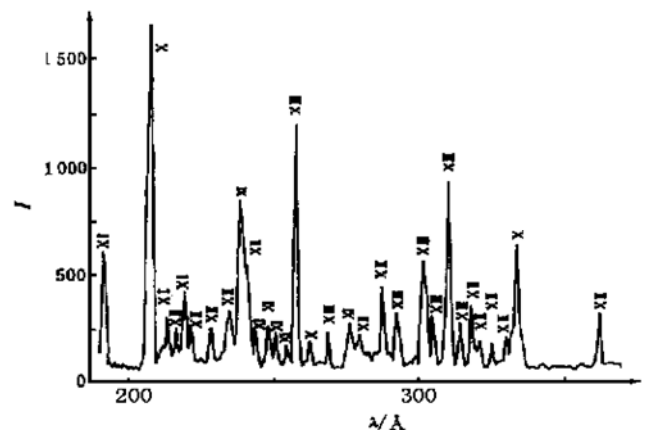


图 6 190-400 A 的 SX 至 S XIII 光谱

25 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 C 箔后的平均电荷态为 10.2. 依据文献[4]和我们的计算, 80 MeV 的 S 离子穿过 25 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 C 箔后, 电荷态主要是 S X, S XI, S XII, S XIII, S XVI, 波长在 25– 400 \AA 范围. 波长在 25– 180 \AA 范围的谱线主要是类 C、类 B、类 Be 和类 Li 离子 $n=2$ 能级跃迁产生的. 波长在 190– 400 \AA 范围的谱线主要是类 C、类 B 和类 Be 3 种离子的 $2s$

$-2p$ 跃迁产生的. 图 5 是低于 200 \AA 的 S X 至 S XVI 光谱观测分布图, 图中的序号 1, 2, 3, …… 表示已确定的波长谱线, “?” 表示的光谱还没有被确认, 我们正在进一步分析. 图 6 是 190– 400 \AA 的 S X 至 S XIII 光谱观测分布图. 表 1 和表 2(见下页) 列出两个波段的离子跃迁谱线^[4,5].

表 1 高电离态 S 离子内壳层能级跃迁谱线

序号	电离态	组态	跃迁项	J 值	$\lambda/\text{\AA}$	
					本实验	文献[6]
1	XII	$2s2p^2-2s2p(^1P^o)4d$	$^2D-^2F^o$	3/2-5/2	27.758	27.89
2	XIII	$2s2p-2s3p$	$^3P^o-^3D$	2-3	31.97	31.944
3	XIII	$2s2p-2s3d$	$^3P^o-^3D$	0-1	33.801	33.806
4	XIII	$2s2p-2s3d$	$^3P^o-^3S$	1-1	35.628	35.667
5	XIII	$2p^2-2p3d$	$^1S-^1P^o$	0-1	36.854	36.559
6	XII	$2s2p^2-2s^22p^3(P^o)3d$	$^2D-^2D^o$	5/2-5/2	38.083	38.320
7	XI	$2s^22p^2-2s^22p3d$	$^3P-^3D^o$	2-3	39.347	39.323
8	XI	$2s2p^3-2s2p^2(^2D)3d$	$^1D^o-^1D$	2-2	41.797	41.829
9	XI	$2s^22p^3-2s^22p^2(^4P)3s$	$^3D^o-^3P$	3-2	44.918	44.734
10	X	$2s^22p^3-2s^22p^2(^3P)3s$	$^4S-^4P$	3/2-5/2	47.434	47.654
11	X	$2s^22p^3-2s^22p^2(^3P)3s$	$^2D^o-^2P$	3/2-1/2	49.331	49.249
12	X	$2s^22p^3-2s^22p^2(^3P)3s$	$^2P^o-^2P$	3/2-1/2	50.637	
13	XV	$1s3d-1s5f$	$^3D-^3F$	1-2	56.764	
14	XIV	$1s^23p-1s^25d$	$^2P^o-^2D$	3/2-3/2	64.833	
15	XIV	$1s^23d-1s^25f$	$^2D-^2F^o$	5/2-7/2	65.401	
16	XVI	$3p-4d$	$^2P^o-^2D$	1/2-3/2	72.131	
17	XVI	$3d-4f$	$^2D-^2F^o$	3/2-5/2	73.091	
18	XV	$1s3s-1s4p$	$^3S-^3P^o$	1-2	79.553	
19	XV	$1s3d-1s4f$	$^2D-^2F^o$	1-2	83.098	
20	XIV	$1s^23s-1s^24p$	$^2S-^2P^o$	1/2-3/2	88.748	88.744
21	XIV	$1s^23p-1s^24d$	$^2P^o-^2D$	3/2-5/2	93.356	93.394
22	XIV	$1s^23p-1s^24s$	$^2P^o-^2S$	1/2-1/2	96.316	
23	XV	$1s4f-1s6g$	F^o-G		116.458	
24	X	$2s^22p^3-2s2p^4$	$^4S^o-^2P$	3/2-3/2	156.997	
25	XVI	$4f-5g$	$^2F^o-^2G$	7/2-9/2	158.217	
26	X	$2s^22p^3-2s2p^4$	$^4S^o-^2S$	3/2-1/2	164.404	
27	X	$2s^22p^3-2s2p^4$	$^2D^o-^2P$	5/2-1/2	177.85	177.55
28	X	$2s^22p^3-2s2p^4$	$^2D-^2P$	5/2-3/2	180.697	180.73
29	XI	$2s^22p^3-2s2p^3$	$^3P-^3S^3$	0-1	187.085	186.84
30	XI	$2s^22p^2-2s2p^3$	$^3P-^3S^o$	1-1	188.651	188.68
31	XI	$2s^22p^2-2s2p^3$	$^3P-^3S^o$	2-1	191.279	191.26
32	X	$2s^22p^3-2s2p^4$	$^2P^o-^2P$	1/2-1/2	192.88	192.81

4 离子能级的寿命测定

束箔技术最好的应用是与飞行时间有关的衰变过程的研究. 用它来测量能级寿命的最大特点是离子束某一激发态衰变随时间的变化可以转换成随空间距离的变化, 而距离是可以精确测定的. 其它寿命测量方法, 例如, Hanle、电子碰撞与离子碰撞延

迟符合技术和电子碰撞相位移与激光吸收等技术, 目前还没有一种方法可代替束箔技术. 束箔测量寿命精度依赖于实验有关条件的变化(如, 复杂的级联效应是否存在、强与弱谱线有无混合、箔后离子速度确定精度), 一般测量误差可能在 10%– 15%. 在较理想的情况下, 误差可接近 5%. 在实验中, 为了获得一个短的时间窗, 我们专门设计了光谱仪的

表 2 S X 至 S XIII 的测量波长

电离态	组态	跃迁项	J 值	$\lambda/\text{\AA}$				
				实验		理论		
				本实验	其它实验	计算	文献[6]	
S XII	$2s^2 2p^2 - 2s 2p^3$	$1D-1P^o$	2-1	190.29	190.36	190.35	190.30	190.36
S X	$2s 2p^4 - 2p^5$	$2D-2P^o$	3/2-1/2	207.62	207.57		207.59	207.62
S XI	$2s 2p^3 - 2p^4$	$3D^o-3P$	1-0	213.61	213.55	213.51	213.55	
S XII	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^o-2P$	1/2-1/2	215.24	215.17		215.19	215.17
S XI	$2s 2p^3 - 2p^4$	$3D^o-3P$	3-2	219.21	219.13		219.14	219.13
S XII	$2s^2 2p - 2s^2 2p^2$	$2P^o-2P$	3/2-1/2	221.52	221.43	221.42	221.40	221.43
S XII	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^o-2S$	1/2-1/2	227.42	227.50		227.49	
S XII	$2s 2p^2 - 2p^3$	$2D-2P^o$	5/2-3/2	233.31	233.216		233.19	233.09
S XI	$2s^2 2p^2 - 2s 2p^3$	$3P-3P^o$	0-1	239.74	239.81		239.80	239.82
S XII	$2s 2p^2 - 2p^3$	$4P-4S^o$	1/2-3/2	240.33	240.284		240.27	240.273
S XI	$2s^2 2p^2 - 2s 2p^3$	$3P-3P^o$	1-2	242.48	242.57	242.83	242.55	242.59
S XI	$2s^2 2p^2 - 2s 2p^3$	$3P-3P^o$	2-2	246.81	246.90		246.84	246.89
S XI	$2s 2p^3 - 2p^4$	$3P^o-3P$	2-1	248.16	248.09		248.13	248.07
S XI	$2s 2p^3 - 2p^4$	$3P^o-3P$	1-2	253.21	253.36		253.34	253.35
S XIII	$2s^2 - 2s 2p$	$1S^1-P^o$	0-1	256.67	256.68	256.64	256.685	256.685
S X	$2s 2p^4 - 2p^5$	$2S-2P^o$	1/2-3/2	261.41			261.47	261.462
S XIII	$2s 2p - 2p^2$	$3P^o-1D$	2-2	265.81			265.78	265.77
S XI	$2s^2 2p^2 - 2s 2p^3$	$3P-3D^o$	0-1	281.32	281.40		281.39	281.40
S XII	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^o-2D$	1/2-3/2	288.45	288.416		288.46	288.434
S XII	$2s 2p^2 - 2p^3$	$2D-2D^o$	3/2-5/2	290.85			290.87	290.88
S XIII	$2s 2p - 2p^2$	$1P^o-1S$	1-0	301.12			301.11	300.99
S XIII	$2s 2p - 2p^2$	$3P^o-3P$	0-1	303.35	303.38		303.36	303.384
S XIII	$2s 2p - 2p^2$	$3P^o-3P$	2-2	308.91	308.94		308.94	308.953
S XIII	$2s 3p - 2p^2$	$3P^o-3P$	1-0	312.75	312.73		312.71	312.732
S XIII	$2s 2p - 2p^2$	$3P^o-3P$	2-1	316.79	316.85		316.83	316.843
S XII	$2s 2p^2 - 2p^3$	$2P^o-2P$	1/2-3/2	321.53			321.51	321.49
S XII	$2s 2p^2 - 2p^3$	$2P-2P^o$	1/2-1/2	323.23	323.18		323.36	323.35
S XII	$2s 2p^2 - 2p^3$	$2P-2P^o$	3/2-3/2	328.33	328.39		328.37	328.54
S XII	$2s 2p^2 - 2p^3$	$2P-2P^o$	3/2-1/2	330.42			330.43	330.48
S X	$2s^2 2p^3 - 2s 2p^4$	$2D^o-4P$	3/2-5/2	337.87			337.829	337.820
S XI	$2s 2p^3 - 2p^4$	$3S^o-3P$	1-2	361.66			361.71	361.69

入口,使之非常靠近离子束(距束径 5 mm 的中心线为 4.5 mm),这样小的时间窗对测量短的能级寿命是非常必要的.前几年,我们测量能级寿命的工作主要在较重元素的中性原子和低电离态的离子上.随着测量系统的改进和完善,我们已在测量高电离态光谱的基础上,对 47 MeV 的 Ne^{4+} 离子穿过 Al 箔的较强谱线的能级寿命进行了测量,其中波长为 293, 561 和 771 \AA ,能级寿命分别为(0.392 \pm 0.020), (0.226 \pm 0.012)和(0.145 \pm 0.016) ns,理论值分别为0.44, 0.81 和 0.42 ns.后两个理论值大于实验值较多,这可能是数据处理中过多的扣除级联效应造成的.最近,我们对 80 MeV 的入射离

子能量,测量了几条谱线的能级寿命,现已得到 47.6 \AA 的 S XI $2s^2 2p^2(^3P) 3s^4P$ 能级寿命,其测量值为0.079 ns \pm 15%,与理论值符合^[2,6].

我们已测量了 Ne VII(293 \AA), Ne VII(561 \AA)和 Ne VIII(771 \AA)及 S XI(47.6 \AA)能级寿命,衰变曲线是用 ANDC/CANDY 程序分析的.对于 S XI(47.6 \AA)的能级寿命测量和衰变曲线的分析更符合理论计算结果,因为这个结果是在测量 Ne VII, Ne VII 和 Ne VIII 能级寿命以后测的,光谱仪的出入狭缝为 50 μm ,前者光谱仪的出入狭缝为 300 μm ,并对数据处理 ANDC/CANDY 程序也作了改进和完善.

参 考 文 献:

[1] Nikolasev V S, Dimitriev I S. On the Equilibrium Charge Distribution in Heavy Element Ion Beam [J]. Phys Lett,

1968, 28A: 277- 290.

[2] Wang Youde, Ma Xinwen, Yang Zhihu *et al.* Measurement of

- Excitation Spectra and Level Lifetimes for Highly Charged Neon Ions [J]. *Science in China (Series A)*, 1997, 40: 285–289.
- [3] 王友德, 刘惠萍, 杨治虎等. 用束箔技术研究 Ar 离子电离态激发光谱 [J]. *光谱实验室*, 1998, 15(4): 1–4.
- [4] Yang Zhihu, Ma Xinwen, Wang Youde *et al.* Measurement of Sulphur S X to S XIII Spectra between 190–400 Å [J]. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 1999, 16(4): 462–466.
- [5] 杨治虎, 马新文, 王友德等. 低于 20 nm 的 S X 至 S XVI 光谱研究 [J]. *科学通报*, 1998, 43(20): 2170–2172.
- [6] Kaufman V, Martin W C. Wavelengths and Energy Level Classification for the Spectra of Sulfur [J]. *J Phys Chem Ref Data*, 1993, 22(2): 279–375.

Measurements of Excitation Spectra of Highly Charged Atoms*

YANG Zhi-hu, SU Hong, MA Xin-wen, LIU Hui-ping, WANG You-de

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The excitation spectra and level lifetimes of highly charged atoms for heavier elements of Ne, S and Ar have been measured by using the beam-foil method on the heavy ion accelerator in Lanzhou. Emission spectra in the wavelength region of 25–400 Å was studied. On the whole, the agreement between our experimental results and other experiments is fairly good.

Key words: highly charged ion; excitation spectrum; level lifetime

* **Foundation item:** NSFC (19974057); the Natural Science Foundation of Gansu Province

快 讯

接《中文核心期刊要目总览》(2000年版)编委会通知,经过编委会严格的筛选,从我国正在出版的近万种中文期刊中确定出1568种期刊为核心期刊。《原子核物理评论》本次也被确认为核心期刊,特此告知各位编委、论文作者和广大读者。与此同时,对各位编委、核物理界的同仁,以及本刊的广大作者和读者多年来对本刊的关心和支持表示衷心感谢!

《原子核物理评论》编辑部