

低能束箔光谱研究*

王友德 扬治虎 马新文 徐 谦 刘惠萍 赵梦春

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 本文简要介绍近代物理所开展的低能束箔光谱学研究情况以及获得的实验数据(包括 N、O、Ne、Ar、Fe 和 Cu 等的激发光谱和能级寿命),并讨论了实验的精度.

关键词 束箔, 激发光谱, 能级寿命.

1 引 言

利用束箔技术提供许多元素的原子和正离子在电离变化过程的结构和衰变率的资料,国际上 60 年代初兴起的,国内 70 年代后期才开展,我所于 80 年代开展这项研究工作.束箔技术是将两个根本不相同的领域: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.自 20 年代经典光谱学成熟以后,光谱学家们一直在寻找新的和更精炼的光源,尤其是能提供高电离系列的光源.直到 60 年代,才找到用加速器加速的离子与一个薄的固体箔(或者气体靶)相互作用,使离子激发,在退激过程中放出光,这就是束箔光源.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都已测量到大量数据.这些数据不仅对原子结构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.

近代物理研究所的 ECR 离子源、同位素分离器、600kV 高压倍加器、200kV 小型重离子加速器、 $2 \times 2\text{MV}$ 串列静电加速器和能量常数为 450 的大型重离子加速器,加速能量从几十 keV 到几百 MeV,并有一套完整的测量设备(如靶室、单色仪、数据获取和处理系统),适合开展各种元素、各种能量的束箔研究.目前,我们已利用同位素分离器、倍加器和 200kV 小型重离子

加速器开展了较低能量的 He、N、O、Ne、Ar、Fe 和 Cu 等元素的束箔激发研究;利用 ECR 离子源研究了高电荷离子 N^{6+} 、 O^{5+} 、 Ne^{4+} 和 He 原子碰撞过程.本文将简要介绍低能束箔研究的实验技术、已取得的结果及与其它研究结果的比较.

2 实验技术

束箔方法是用加速器研究原子物理的一种方法,在概念和实践上都相对简单,图 1 是测量光谱和辐射衰变曲线的装置图.由离子加速器产生的快速离子束,通过磁铁分析器,确定束流能量和确保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),此靶位于真空靶室内的束径上.通常固体靶都是采用自支撑非结晶碳,厚度约在(5~20) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,靶厚度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.带有 36 片碳膜的靶盘安装在一个长 1m 的丝杆上,由步进马达控制靶盘来回运动,可移动距离 650mm.丝杆的精度决定位置的精度,经测定:靶盘在丝杆上来回运行一个螺距(2mm),误差不大于 $\pm 0.012\text{mm}$;走距 25、100 和 300mm,误差分别不大于 ± 0.018 、 ± 0.025 和 $\pm 0.035\text{mm}$;走完全程 650mm,累积误差不大于 $\pm 0.055\text{mm}$.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

* 国家自然科学基金资助课题

本文 1993 年 3 月 16 日收到.

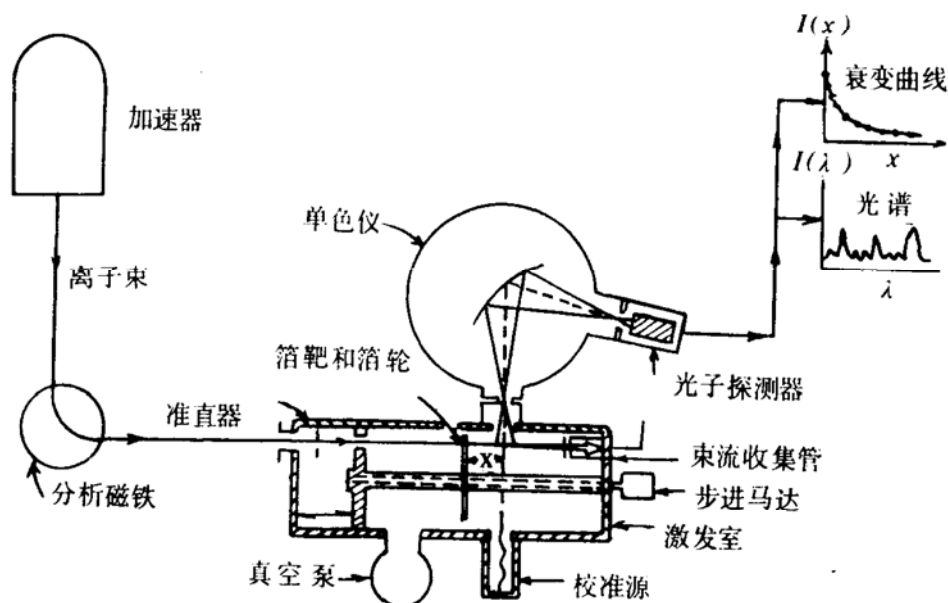


图 1 用束箔方法测量激发光谱和能级寿命装置图

$10^{-14} \sim 10^{-16}$ s, 这和一般的能级寿命 ($10^{-9} \sim 10^{-10}$ 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, 这种源特点是能获得非常好的时间分辨. 在高能时, 碳箔的使用寿命可能不是个问题, 而在低能重离子的轰击下, 碳箔的使用寿命就是个严重的问题. 碳箔的寿命除了与能量有关外, 还与入射离子的种类和流强有关. 为了延长碳箔的寿命, 在入射能量和离子确定以后, 可采用尽可能小的离子流. 例如, 在 110keV 的束能下测 Fe 和 Cu 等元素的束箔光谱和能级寿命时, 只有用 $(0.035 \sim 0.045) \mu\text{A}$ 的束流, 仍能测到较好的束箔光谱和能级衰变曲线, 碳箔的寿命一般都在 30 分钟以上. 当然, 束流很弱, 束箔光也就很弱, 要想提高计数率, 就要放宽单色仪的出入射缝, 其代价是分辨变差. 一旦箔被打破, 在不破坏真空的情况下, 随时可以更换, 并有定位开关来保证每次位置的重复性.

由于加速器引出的束流经常不稳定, 测量的信号也随之涨落, 这有利于寿命测量. 通常采用电荷归一法, 即用一个位于箔后的封闭的法拉第筒 (在筒口外加 300V 的负压, 以免电子逸出) 收集束流的电荷数来归一光谱线的强度. 但是, 在研究低能重离子时, 发现电荷归一法并不可靠, 其原因是: (1) 在低能时, 离子在箔中俘获电子的截面有可能大于电离截面, 即中性原子占箔后束流的主要成分, 甚至有时根本测量不到箔后的电荷; (2) 低能重离子在箔中增加了多次散射, 使箔后束流的发散大大增加, 一部分粒子有可能跑出法拉第筒, 随着箔位与法拉第筒的距离变大, 跑出的粒子数越来越多, 实验中法拉第筒有时表现为负电流就证明了这一点. 因为散出的粒子打在法拉第筒外的底座上, 产生次级电子, 次级电子又打在法拉第筒上, 故显示出负电流; (3) 许多实验证明, 碳在碳箔上的沉积率与轰击离子的能量、电流密度及真空状态有关, 在低能、低密度和较低真空状况下, 箔的增厚效应较为明显, 它将改变箔后束流的电荷和激发态分布. 总之, 电荷积分归一法, 在高能束箔测量中是可靠的, 而在低能束箔测量中, 特

别是对重元素,常常是不可取的.一种有效的方法是在箔后固定的距离内安装一个光导纤维,将光引入第二个光子探测系统,用测定某一能级光辐射的计数做归一测量,我们在测 He 的能级寿命时,就是用的这种方法,但这种方法经常受到实验室空间和实验装备的限制.另一种最简单的方法是在测量光谱或某一能级的衰变曲线时(一般需要几十分钟).维持加速束流的相对稳定,这样就免去了麻烦的归一测量问题.通常采用两种方法监督束流是否稳定:(1)从测量的衰变曲线的趋势可以直接反映束流的波动;(2)加速器的斑点一般是 $100 \times 50 \text{mm}^2$,在进入靶室前 $\phi 5$ 准直孔的上或下方装一束流监督器,也可以观察束流的波动.

束箔光源和传统的光谱学光源相比,优点之一是改变入射到靶箔上的束流能量就可容易地改变电荷态的分布.不管加速什么离子,带有什么样的能量和箔相互作用,激发过程是非选择的,即在束箔中将出现许多不同的辐射和俄歇跃迁.因此,在束箔光谱测量中必须根据不同的入射能量,用不同的探测手段来分析这些辐射.测量中将遇到这些问题:(1)在测量能级寿命时,级联效应带来较大的误差,能量越高,级联越严重;(2)没有一种光谱仪或探测器能够包括束箔源辐射的全部波长范围.图 1 装置中,在可见光和近紫外光范围内,用国产 WDG05- I 型平面光栅单色仪,配备 GDB53L 光电倍增管.

在远紫外 ($10 \sim 2500 \text{\AA}$) 光谱范围内,用 Mcpherson247 型掠入射真空紫外光栅单色仪,用低噪声 ($\sim 0.2 \text{Hz}$) 高量子效应的通道电子倍增器 (CEM) 或配备 EMI9558QB 光电倍增管来探测不同波长的光.

在光谱测量中用 ND76 多道多定标系统来记录某一波长段的光谱.用束箔技术测量能级寿命的最大优点是将辐射强度随时间的变化变成随空间距离的变化,而距离是可以精确测定的.带有 36 片碳箔的靶盘在一条长丝杆上由步进马达控制来回运动,步进马达是用一台单板机驱动.步进马达每动作一步可以使靶向前或向后移动约 $8.3 \mu\text{m}$,步进马达可以一步一步地动作,也可以按预置的步数连续动作,这在寿命测定中可以把靶的位置定的很准.在原子能级位置和跃迁几率的计算中,我们引用了 MCDF 程序,用 CANDY 程序拟合了束箔寿命测量中的衰变曲线,并对级联效应进行了修正.

3 光谱测量

束箔源能产生中等分辨的光谱,束箔光源独特的优点是可以研究一种元素电荷态范围很宽的原子和离子光谱,因为用改变入射束的能量就可控制箔后电荷态分布,也可以研究不同元素的等电子系列光谱.但目前,我们还只是研究在较低能量下可见光范围的光谱.表 1 列出了 He、N、O、Ne、Ar、Fe 和 Cu 七种元素在可见光

表 1 七种元素在可见光范围内光谱分布情况

加速离子	加速能量 (keV)	每核子能量 (keV/u)	第一电离能 (eV)	第二电离能 (eV)	光 谱 条 数			
					总计	中性	一次 电离	二次 电离
He ⁺	180	45	24.588	54.418	9	7	2	
N ⁺	110	7.86	14.53	29.602	8		6	2
O ⁺	110	6.88	13.618	35.118	10		9	1
Ne ⁺	110	5.5	21.565	40.964	11	2	9	
Ar ⁺	110	2.75	15.76	27.62		2	11	
Fe ⁺	110	1.96	7.87	16.18	21	21		
Cu ⁺	110	1.75	7.726	20.292	16	16		

范围内光谱测量的情况,从光谱线的分布表明,每核子能量越低,中性束越来越强;能量越高,一次二次电离束越强,而 He 和 Ne 并不完全遵循这个规律,特别是 He,尽管能量较高,但中性束仍然很丰富,主要是它的电离能较高,在同样能量下,俘获电子的截面比别的元素大的多.

3.1 He 光谱

我们在 600kV 高压倍加器作了能量 120~260keVHe⁺ 离子穿过碳箔(10~15)μg/cm² 后激发光谱测量.在这个能区范围内共测了 9 条谱线,除波长 4686 Å 和 5412 Å 是一次电离激发光谱外,其余均为中性激发谱.随着能量的变化,各条谱线相对强度也明显地变化.当能量增加时,4686 Å 和 5412 Å 两条谱线的相对强度也在增加,而其余中性激发谱相对强度在逐渐减弱,尤其一次电离激发谱 4686 Å 和中性激发谱 3889 Å 表现更为明显.表 2 是 180keV 时测量 He 的 3800~6000 Å 之间的较强光谱线,与文献[1]波长符合较好.

表 2 180keVHe 的束箔光谱

电离态	跃迁	测量波长(Å)	文献 ^[1]
He I	2s ³ S-3p ³ P	3887	3889.65
He I	2p ³ P-5d ³ D	4028	4026.19
He I	5sS-2pp	4122	4120.82
He I	2p ³ P ⁰ -4d ³ D	4469	4471.48
He II		4684	4685.75
He I	2p ¹ P-4d ¹ D	4920	4921.93
He I	2s ¹ S-3p ¹ P	5017	5015.68
He I		5414	5411.55
He I	2p ³ P-3d ³ D	5874	5875.62

3.2 N 光谱

在 200kV 小型重离子加速器上进行 N 的束箔光谱测量.110keV 的 N⁺ 离子穿过 10μg/cm² 的碳箔,被激发后的离子较强的谱线在 4000~6000 Å 内有 8 条,其中最强的谱线是 5001 Å (在 5001 Å 附近有 3~4 条较强的谱线,由于谱仪的分辨不够,可能是几条谱线的混合).除了 4508 和 4860 Å 两条谱线是二次电离外,其余谱线均

为一次电离,测量到的谱线与文献[1]的谱线是一致的,表 3 为测量结果.

表 3 110keV N 的束箔光谱

电离态	跃迁	测量波长(Å)	文献波长(Å) ^[1]
N I	3d ³ P-3p ³ D	4041	4041.33
N I	3d ³ P-3p ² D	4241	4241.80
N I		4447	4447.04
N II	3d ³ P-3p ⁴ D	4508	4510.92
N II		4860	4858.82
N I	3p ³ D-3d ³ F ⁰	5001	5001.47
N I	3d ³ P-3p ⁵ D ⁰	5540	5543.49
N I		5676	5679.56

3.3 O 光谱

用 110keV 的氧离子 O⁺ 穿过 11.5μg/cm² 的碳箔,测量 3800~5200 Å 的束箔光谱,有 10 条光谱线较强,其中有 9 条是一次电离激发谱,只有一条是二次电离激发谱,表 4 列出结果及与文献的比较.

表 4 110keVO 的束箔光谱

电离态	跃迁项	测量波长(Å)	波长(Å) ^[1]
O I	3p ⁴ S ⁰	3726	3727.30
O II	3p ³ D	3762	3759.87
O I	3p ² P ⁰	3975	3973.27
O I	3d ⁴ F	4073	4075.87
O I	3d ¹ ² G	4187	4189.79
O I	3p ⁴ P ⁰	4352	4349.44
O I	3p ² D ⁰	4416	4414.89
O I	3p ⁶ P ⁰	4466	4467.88
O I	3p ² F ⁰	4589	4590.94
O I	3p ⁴ D ⁰	4640	4641.83

3.4 Ne 光谱

Ne 的束箔光谱也是用 110keV 能量的 Ne⁺ 离子与 10μg/cm² 的碳箔相互作用的激发谱,在波长 3000~4500 Å 内测到 11 条较强的谱线,其中有 2 条谱线是中性原子激发谱,其余均为一次电离态离子激发谱,其结果列于表 5.

表 5 110keVNe 束箔光谱

电离态	跃迁	测量波长(Å)	波长(Å) ^[1]
Ne I	3p ³ D _{5/2}	3220	3218. 21
Ne I		3335	3334. 87
Ne I		3355	3355. 06
Ne I	3s ¹ D-3p ² F _{7/2}	3568	3568. 53
Ne I	3s ³ P-3p ⁴ P _{3/2}	3664	3664. 11
Ne I	3p ⁴ P _{5/2}	3694	3694. 20
Ne I	3s ³ P-3p ² D _{5/2}	3715	3713. 08
Ne I	3s ³ P-3p ² D _{3/2}	3727	3726. 08
Ne I	3s ⁴ P-3p ⁴ D	4417	4421. 56
Ne I	3s ² P-3p ⁴ D	4428	4428. 54
Ne I	3s ² D-3p ² F	4267	4268. 01

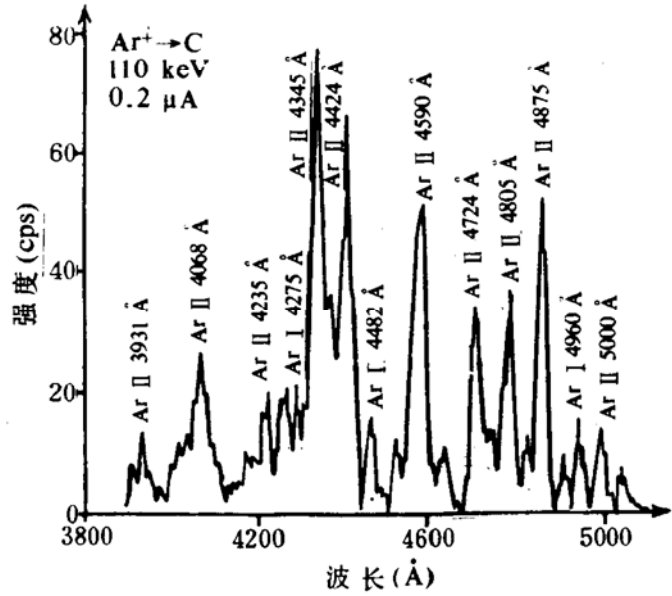


图 2 在 110keV 时,观察到的 Ar 激发光谱

3.5 Ar 光谱

图 2 给出了用 110keV 的 Ar⁺ 离子穿过厚度 8.5μg/cm² 的碳箔后测量 3800~5200 Å 波长范围的激发光谱,其中可分辨的较强谱线有 13 条,除两条为中性原子激发谱外,其余均为一次电离态离子激发谱,测量的谱线与相同方法^[2]测量的结果符合得很好.表 6 列出了我们测量的结果.

表 6 110keVAr 的束箔光谱

电离态	跃迁项	测量波长(Å)	波长(Å) ^[2]
Ar I		3927	
Ar I		4072	
Ar I	4p ¹² P _{3/2}	4235	4237
Ar I		4270	
Ar I	4p ⁴ D _{7/2}	4345	4348
Ar I	4p ⁴ D _{5/2}	4424	4426
Ar I	4p ¹² D _{5/2}	4482	4482
Ar I	4p ¹² F _{5/2}	4590	4590
Ar I	4p ² D _{3/2}	4724	4727
Ar I	4p ⁴ P _{5/2}	4805	4806
Ar I		4870	
Ar I		4955	
Ar I		5000	

3.6 Fe 光谱

铁的激发光谱是非常丰富的, Corliss 和 Teck^[3] 在 3000 Å ≤ λ ≤ 5000 Å 范围内测到了 2000 条以上的 FeI 谱,而 Whaling 等人^[4] 用 505keV 的 Fe⁺ 与箔相互作用,在同样的波长范围内测量到 50 多条 FeI 激发谱.从图 3 可以看出,110keV 的 Fe⁺ 离子和 8.5μg/cm² 碳箔相互作用,在 3500~4500 Å 范围内较强的 FeI 谱线有 21 条.实际 FeI 谱线要多于这个数,其原因是:(1)由于离子流较小,有些谱线的强度就更弱了;(2)为了提高计数率,采用了较宽的单色仪出入缝,这样分辨就差,最大半亮度约为 10 Å,有些波长接近的 FeI 线被重迭在一起.这 20 多条谱线都是由 3d⁷4s-3d⁷4p 跃迁形成的,而母体离子组态是不变的.从表 7 可以看出,测量的结果与 Whaling 用同样方法测量的结果完全一致.

3.7 Cu 光谱

在同样的激发能量下,Cu 的激发谱线比 Fe 要小得多,强度弱得多.图 4 是 110keV 的 Cu⁺ 离子穿过厚度 8.5μg/cm² 的碳箔,在波长 3800~5500 Å 之间测得的激发谱,只有几条谱线强度稍大,大部分谱线都是较弱的.和 Fe 一样,所有可分辨的较强谱线都是中性原子激发谱,因为 Fe 和 Cu 都是较重的元素,在较低的入射能量

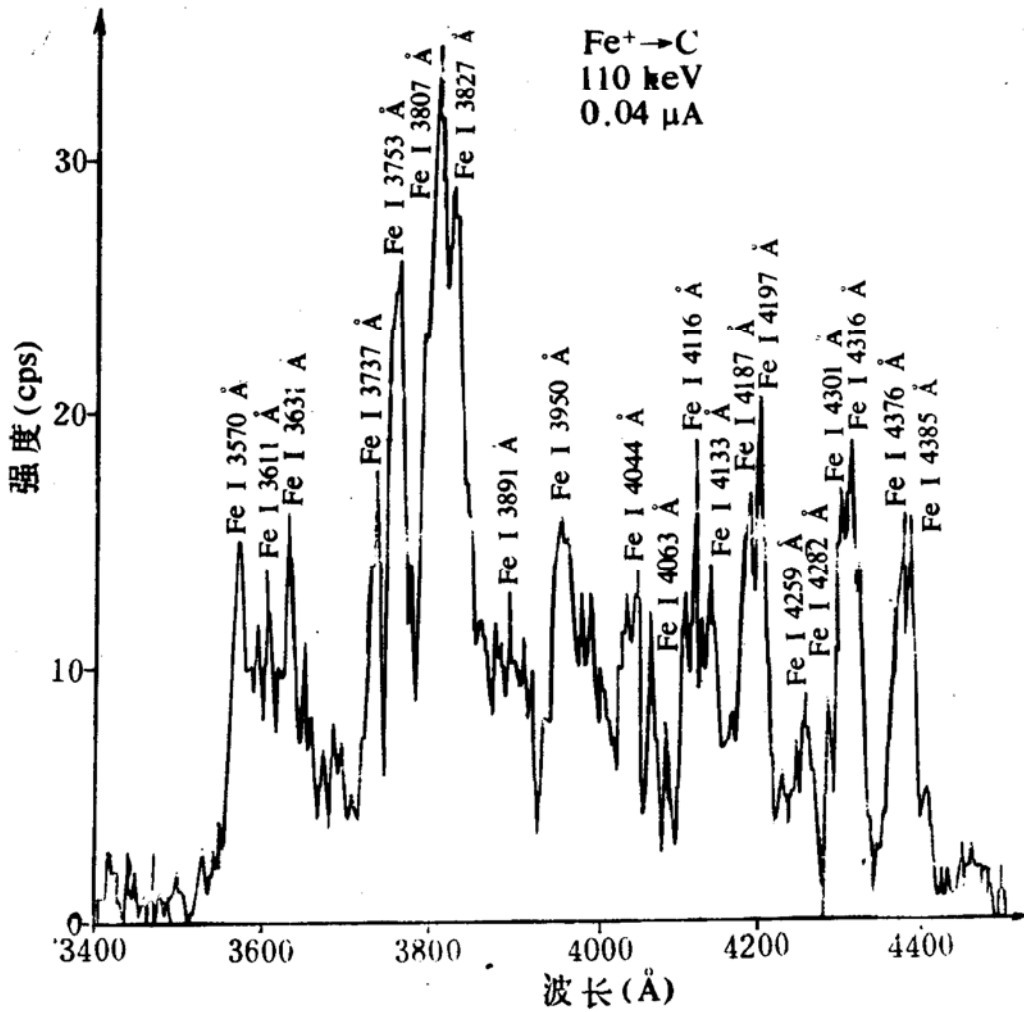


图 3 在 110keV 时,观察到的 FeI 部分激发光谱

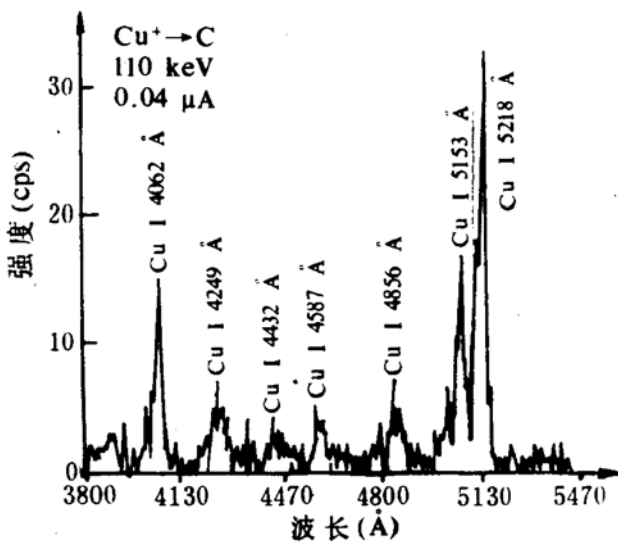


图 4 在 110keV 时,观察到的 CuI 部分激发光谱

时,电子俘获截面比电离截面要大得多. 这些谱线基本上都是由 $3d^9 4s 5s - 3d^9 4s 4p$ 和 $3d^9 4s 4d - 3d^9 4s 4p$ 之间的跃迁形成的. 表 8 列出了可分辨的较强线的波长.

4 能级寿命测量

束箔方法唯一最好的应用是对与时间有关的衰变过程的研究,这个过程就是飞行时间过程,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. 原则上,这种方法均可用于任何元素任何电离态. 其它寿命测量方法,例如, Hanle 效应^[5]、电子碰撞^[6]与离子碰撞^[7]延迟符合技术和电子碰撞相位移^[8]与激光吸收^[9]等,一般对中性原子是限制的,至于高剥离离子寿命测量,目前还没有一种方法可

以代替束箔方法. 束箔寿命测量精度依赖于与实验有关条件的变化(如复杂的级联效应是否存在、强与弱的谱线有无混合和箔后离子速度测定的精度如何等), 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%. 我们在较低能量下对 He、N、O、Ne、Ar、Fe 和 Cu 等元素的某些能级进行了寿命测量, 级联效应不是特别严重, 寿命曲线一般只存在双组份, 用 CANDY 程序拟合寿命曲线, 并对级联效应作比较精确的修正. 此外, 寿命测量误差主要来源下列两方面: (1) 因离子流较弱, 要提高计数率, 单色仪的出入缝需要加到适当的宽度, 这样分辨变差, 就存在某些谱线的混合; (2) 碳箔是用真空镀

膜制备, 其蒸发是均匀的, 厚度是用十万分之一天平秤的, 求其厚度 $(8.5 \pm 1.5) \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 误差在 (15~20)% 之间, 加之实验是在低能、低真空状况下进行的, 由于碳的沉积, 箔的增厚效应是明显的, 因此对离子在箔中能损的测定有较大的误差. 综合上述情况, 估算寿命测量的总误差大约在 12% 左右.

He 的能级寿命是在 180keV 能量、其余元素都在 110keV 能量下测量的, 其结果列于表 9, 并与他人的结果进行了比较, 符合是很好的.

表 7 110keVFe 的束箔光谱

电离态	跃迁	测量波长(Å)	波长(Å) ^[1]
Fe I	a ⁵ F ₄ - ³ G ₃	3570	3570.4
Fe I	a ³ G ₅ -y ³ H ₃	3611	3606.1
Fe I	c ³ P ₁ -u ³ D ₁	3631	3632.2
Fe I	a ⁵ F ₅ -y ⁵ F ₃	3737	3735.9
Fe I	a ⁵ F ₃ -y ⁵ F ₁	3756	3758.2
Fe I	b ³ H ₄ -y ³ I ₅	3807	3806.2
Fe I	a ³ F ₃ -y ³ D ₁	3827	3827.5
Fe I	a ³ F ₂ -y ³ D ₁	3891	3888
Fe I		3950	
Fe I	a ³ F ₄ -y ³ F ₂	4044	4045.3
Fe I	a ³ F ₃ -y ³ F ₁	4063	4063.7
Fe I	a ¹ H ₅ -z ¹ I ₃	4116	4119.2
Fe I		4133	
Fe I		4187	
Fe I	a ¹ G ₄ -z ¹ H ₃	4197	4199.1
Fe I	a ³ F ₃ -z ³ G ₃	4259	
Fe I	a ³ F ₄ -z ³ G ₃	4283	
Fe I	a ³ F ₃ -z ³ G ₁	4301	
Fe I	a ³ F ₂ -z ³ G ₃	4316	
Fe I		4376	
Fe I	a ³ F ₄ -z ⁵ G ₃	4385	4385.5

表 8 110keVCu 的束箔光谱

电离态	跃迁	测量波长(Å)	波长(Å) ^[1]
Cu I	3d ⁹ 4s4d ² D _{5/2} -3d ⁹ 4s4p ² F _{7/2}	3947	
Cu I	3d ⁹ 4s4d ² P _{1/2} -3d ⁹ 4s5p ² P _{1/2}	4017	4022.66
Cu I	3d ⁹ 4s5s ⁴ D _{1/2} -3d ⁹ 4s4p ² P _{1/2}	4059	4062.70
Cu I		4273	4275.13
Cu I		4375	4378.20
Cu I		4466	
Cu I		4620	
Cu I	3d ⁹ 4s5 s ⁴ D _{7/2} -3d ⁹ 4s4p ² P _{1/2}	4634	
Cu I	3d ⁹ 4s5 s ⁴ D _{3/2} -3d ⁹ 4s4p ² F _{7/2}	4851	
Cu I		4900	
Cu I	3d ⁹ 4s5s ² D _{3/2} -3d ⁹ 4s4p ² F _{7/2}	5090	
Cu I		5114	5105.54
Cu I	3d ⁹ 4s5s ⁴ D _{7/2} -3d ⁹ 4s4p ² F _{7/2}	5142	
Cu I		5188	
Cu I		5210	5218.20
Cu I	3d ⁹ 4s6s ² D _{5/2} -3d ⁹ 4s4p ² P _{3/2}	5401	

表 9 He、N、O、Ne、Ar、Fe 和 Cu 等元素的一些能级的平均寿命

元 素	电离态	跃 迁	波长(Å)	能级寿命(ns)	
				本工作	其它工作
He	He I	5d ³ D-2p ³ P	4028	29.50±1.34	85.47±2.56 ^[10]
	He I	4d ³ D-2p ³ P	4469	44.44±2.83	39.84±1.20 ^[10]
	He I	4d ¹ D-2p ¹ P	4920	20.94±3.55	49.51±1.49 ^[10]
	He I	3d ³ D-2p ³ P	5874	14.47±0.24	16.16±0.42 ^[10]
N	N I	3p ⁴ D	4241	2.81±0.19	3.5 ^[11]
	N II	3p ⁴ D	4508	5.11±0.17	
	N I	3d ³ F	5001	13.10±0.21	13.0 ^[11]
	N I	3p ⁵ D	5540	12.60±0.24	12.8 ^[11]
	N I	3p ³ D	5676	13.80±0.30	
O	O I	3d ⁴ F	4073	7.39±0.33	7.76 ^[12] 5.1 ^[13]
	O I	3d ² G	4187	5.42±0.38	8.47 ^[12] 4.02 ^[13]
	O I	3p ⁴ P ^o	4351	7.25±0.24	7.69 ^[12] 9.5 ^[13]
	O I	3p ³ D ^o	4415	9.47±0.89	9.92 ^[12] 8.8 ^[13]
	O I	3p ⁴ P ^o	4467	4.68±0.23	
	O I	3p ² F ^o	4589	11.16±0.74	14.16 ^[12] 9.0 ^[13]
	O I	3p ⁴ D ^o	4640	26.89±0.59	29.77 ^[12] 9.8 ^[13]
	O I	3p ³ D	5676	13.80±0.30	
Ne	Ne I	3p ¹ D	3345	4.13±0.23	3.8±0.4 ^[14]
	Ne I	3p ² P _{1/2}	3378	2.96±0.47	
	Ne I	3p ² F _{7/2}	3568	11.23±0.41	8.8±0.9 ^[14]
	Ne I	3p ⁴ P _{3/2}	3664	9.67±0.41	10.1±1.0 ^[14]
	Ne I	3p ⁴ P _{5/2}	3694	8.79±0.23	10.0±1.0 ^[14]
	Ne I	3p ² D _{5/2}	3713	4.02±0.21	
	Ne I	3p ² D _{3/2}	3727	7.85±0.32	8.4±0.8 ^[14]
	Ne I	3p ⁴ D	4417	3.14±0.9	
Ar	Ar I	4p ⁴ D _{7/2}	4345	12.51±1.20	11.6±2.1 ^[2]
	Ar I	4p ⁴ D _{5/2}	4424	10.06±0.98	10.8±1.9 ^[2]
	Ar I	4p ^{1/2} F _{5/2}	4590	11.66±1.12	14.3±2.5 ^[2]
	Ar I	4p ² D _{5/2}	4724	9.00±1.17	11.6±2.1 ^[2]
	Ar I	4p ⁴ P _{5/2}	4805	11.33±1.38	12.2±2.2 ^[2]
	Ar I		4875	11.13±1.27	
Fe	Fe I	y ³ H _g	3611	17.84±1.34	
	Fe I	y ⁵ F _g	3753	10.52±1.16	9.7 ^[4]
	Fe I	y ³ I _g	3807	10.84±1.19	
	Fe I	y ³ F _g	4044	20.25±2.08	
	Fe I	z ¹ H _g	4197	18.39±2.06	13.8 ^[4]
	Fe I	z ³ G _g	4259	20.98±2.19	

	Fe I	z^3G_4	4301	16.99 ± 2.25
	Cu I	$5s^4D_{1/2}$	4059	25.97 ± 3.21
Cu	Cu I		5156	20.78 ± 2.58
	Cu I		5216	17.68 ± 2.31

近代物理所重离子加速器(HIRFL)和相配套的原子物理实验终端,适合开展高离化态原子物理研究.这是国际上十分活跃的研究领域,也是该所原子物理研究的主要方向.它不仅是原子物理基础理论研究的热点,也是研究天体物理、等离子体物理和激光物理不可缺少的手段.

本工作主要是在近代物理所 200kV 小型重离子加速器上进行的,在此对加速器组全体人员的全力支持深表谢意.

参 考 文 献

1 冶金工业部科技情报产品标准研究所,光谱线波长表(第二部分),北京:中国工业出版社,1971

2 Assousa G E, et al. Nucl. Instr. Meth., 1970, 90 : 51
 3 Corliss C H, et al. Tech. J. Res. N. B. S., 1967, 71A(6)
 4 Whaling W, et al. Astrophys. J., 1969, 158 : 389
 5 Smith W R, et al. Phys. Rev., 1966, 145 : 26
 6 Bennett W R, et al. Phys. Rev., 1966, 149 : 38
 7 Dotchin L W, et al. Phys. Rev., 1973, 59 : 3960
 8 Lawrence G W. Phys. Rev., 1968, 175 : 40
 9 Andra H J, et al. Phys. Rev. Lett., 1973, 31 : 50
 10 International Conference On Beam-Foil Spectroscopy, 4th, Gatlinberg, Tenn, 1975, 267
 11 Denis A, et al. Sci., 1968, 266B, 64
 12 Pinington E H. Nucl. Instr. Meth., 1970, 90 : 93
 13 Wiese W L, et al. "Atomic Transition Probabilities" Vol. 1, U. S. Governmental Printing Office, NSROS-NBS4, 1966
 14 Hesser J E. Phys. Rev., 1968, 174 : 68

Studies of Low Energy Beam-Foil Spectra

Wang Youde Yang Zhihu Ma Xinwen Xu Qian Liu Huiping Zhao Mengchun
 (Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract In this paper, we describe the experiments at IMP and the beam-foil experimental data (including spectra, lifetimes of He, N, O, Ne, Ar, Fe and Cu ions). The accuracy estimated is also given here.

Key Words beam-foil, excited spectra, level lifetimes