

# 高电荷态离子 $N^{6+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $Ne^{4+}$ 与He原子碰撞 激发过程的实验研究\*

潘广炎 杨 锋 李大万

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

刘占稳 张 文 徐 谦 刘惠萍 赵孟春

(中国科学院兰州近代物理研究所 兰州 730000)

**摘 要** 利用电子回旋共振(ECR)多电荷离子源产生的高电荷态离子束和LHT-30VUV真空紫外单色仪,研究了 $N^{6+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $Ne^{4+}$ 与He碰撞激发过程,观察到单电子俘获、双电子俘获和入射离子直接激发三种激发过程.

**关键词** 高电荷态离子, 碰撞, 激发态.

## 1 引 言

近10年来,对高电荷态离子(HCI)碰撞物理的研究,在原子物理中已成为一个非常活跃的领域<sup>[1~4]</sup>.高电荷态离子物理已成为一门新兴学科.

本文主要研究高电荷态离子和原子、分子碰撞过程中的激发态.通过激发态给出光谱信息,研究其碰撞激发过程和原子能级结构,并测量发射截面、激发截面、俘获截面等碰撞截面,以促进高电荷态离子物理学、短波长软X射线激光器和等离子体辐射的研究和发展.

利用ECR多电荷离子源所产生的高电荷态离子束和LHT-30VUV真空紫外单色仪对 $N^{6+}$ 、 $O^{5+}$ 、 $Ne^{4+}$ 离子与He原子碰撞激发过程进行研究,获得一些新的实验结果.

## 2 实验装置

实验装置是由三部分组成.第一部分是ECR多电荷离子源.它主要由简单的磁镜和微波发生器组成,利用微波放电并加热等离子体,能得到高电子温度 $T_e$ 和高电子密度 $n_e$ 的等离子体,加上有磁镜场的约束作用,可以获得较长的离子约束时间和高剥离度的离子,以致使C、N、O和Ne原子达到全剥离.

中国科学院近代物理研究所的ECR多电荷离子源型号为CAPRICE,其优点是:(1)离子剥离度高,C、N、O、Ne原子可以全剥离;(2)离子束流强度大,可达几百微安;(3)离子源属于无极放电型,运行期间离子束稳定,寿命长.第二部分是气体靶室,靶室真空度可达 $2.7 \times 10^{-4}$ Pa.第三部分是光学测量系统.由LHT-30VUV真空紫外单色仪、EMI-9789QB光电倍增器和ND-686多道分析器组成.

LHT-30VUV真空紫外单色仪,带一个全息光栅550条/mm,其相对孔径为 $f/10$ ,聚焦长度达320mm,线色散本领为 $2\text{nm/mm}$ ,狭缝高度为2mm,宽度为0.2mm时分辨率为0.4nm,波长范围为10~150nm,效率最大值在35nm.由于在实验中光信号较弱,所以使用时选用狭缝高度为6mm,宽度为0.5mm,分辨率为1nm.光栅的转动由步进电机驱动,步进电机控制器的速度范围为0.016~0.15nm/s.

单色仪的出射窗上涂有水杨酸钠,它可将真空紫外光转换成波长为420nm左右的可见光,光信号由EMI-9789QB光电倍增器测量,数据采集由ND-686多道分析器完成.

\* 国家自然科学基金委和中国原子、分子物理数据联合体资助课题

### 3 实验结果

#### 3.1 $N^{6+} + He$

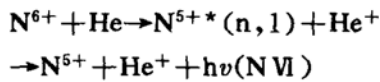
在高电荷态离子  $N^{6+}$  与原子 He 碰撞过程中, 观察到的  $NVI$ ,  $NV$ ,  $NVII$  谱线见图 1, 并列表 1, 入射离子的能量为 90keV.

表 1

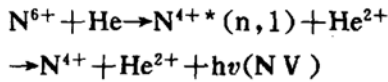
谱 线	跃迁*	波长 (nm)
NVI 三重态	$1s4d^3D \rightarrow 1s2p^3P^0$	13.0
	$1s3p^3P^0 \rightarrow 1s2s^3S$	16.1
NV 双重态	$5p^2P^0 \rightarrow 3s^2S$	45.0
	$5f^2F^0 \rightarrow 3d^2D$	51.1
NV I 双重态	$4p^2P^0 \rightarrow 3s^2S$	38.2
	$10p^2P^0 \rightarrow 5s^2S$	61.9

上述发射光谱表明: 在  $N^{6+}$  与 He 碰撞体系中存在三种激发过程:

1) 单电子俘获



2) 双电子俘获



3) 入射离子直接激发过程

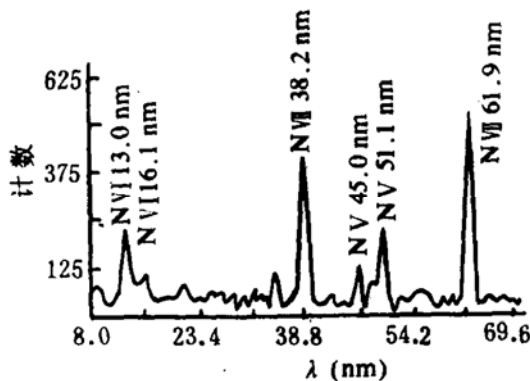
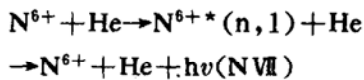


图 1  $N^{6+}$  与 He 碰撞中,  $NV$ ,  $NVI$  和  $NVII$  发射线谱(入射能量为 90keV)

根据发射截面和激发截面的定义<sup>[5]</sup>, 在入射离

子能量为 90keV 时, 测得的实验数据经过计算所得和截面数据列于表 2.

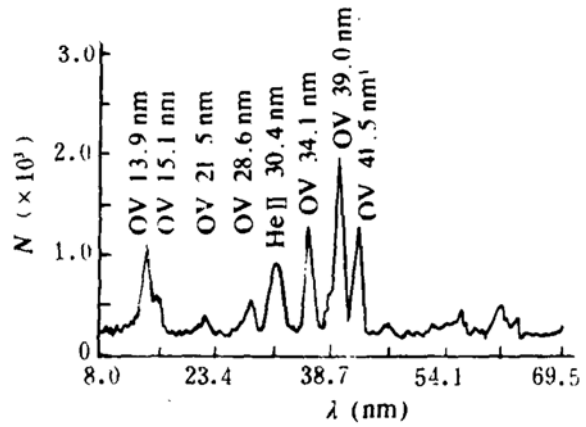


图 2  $O^{5+}$  与 He 碰撞中,  $OV$  与  $HeII$  的发射光谱(入射能量 60keV)

图 2 表示测量到的  $O^{5+}$  与 He 碰撞中产生的发射光谱, 入射离子能量为 60keV.  $OV$  单态与三重态谱线列于表 3.  $He II$  双重态谱线列于表 4.

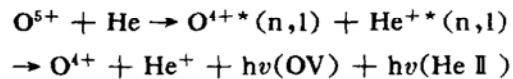
表 3  $OV$  单态与三重态谱线

单 态		三 重 态	
跃迁	波长 (nm)	跃迁	波长 (nm)
$2p^3d(^1P^0) \rightarrow 2s^2(^1S)$	13.9	$2s^4d(^3D) \rightarrow 2s^2p(^3P^0)$	15.1
$2s^3p(^1P^0) \rightarrow 2p^2(^1D)$	28.6	$2s^3s(^3S) \rightarrow 2s^2p(^3P^0)$	21.5
$2s^3p(^1P^0) \rightarrow 2p^2(^1S)$	34.1	$2s^5p(^3P^0) \rightarrow 2s^3s(^3S)$	39.0
$2s^5p(^1P^0) \rightarrow 2s^3s(^1S)$	41.5		

表 4  $He I$  双重态谱线

跃 迁	波 长 (nm)
$2p(^2P^0) \rightarrow 1s(^2S)$	30.4

从测量到的发射光谱分析, 在  $O^{5+}$  与 He 碰撞过程中, 在入射离子能量范围 60~80keV 内, 仅仅观察到单电子俘获激发过程. 这就是:



发射截面的定义<sup>[1]</sup>

表 2 NVI、NV 和 NVII 谱线的发射截面与 N<sup>5+</sup>(3p)、N<sup>5+</sup>(4d) 激发截面(单位为 10<sup>-16</sup>cm<sup>2</sup>)

NVI 三重态		双重态		NVII 双重态		N <sup>5+</sup> (3p)	N <sup>5+</sup> (4d)
13.0nm	16.1nm	45.0nm	51.1nm	38.2nm	61.9nm		
0.11	4.75	1.71	2.06	9.21	9.00	4.45	0.09

表 5 OV 单态、三重态和 He I 双重态谱线的发射截面(单位为 10<sup>-16</sup>cm<sup>2</sup>)

λ(nm) σ <sub>em</sub>	OV 单态				OV 三重态			He I 双重态	
	13.9	28.6	34.1	41.5	15.1	21.5	39.0		
E(keV)	60	0.11	1.24	3.80	5.02	3.98	3.60	7.10	2.93
65	0.14	1.36	4.21	5.66	6.15	5.62	8.67	2.87	
70	0.10	1.43	4.00	4.88	5.34	4.25	7.11	3.00	
75	0.10	1.21	4.28	4.81	5.31	3.47	7.23	2.71	
80	0.12	1.19	3.37	4.70	2.20	4.27	6.27	2.84	

表 7 NeIV 双重态、四重态, Ne III 三重态, He I 双重态谱线的发射截面(单位为 10<sup>-16</sup>cm<sup>2</sup>)

λ(nm) σ <sub>em</sub>	NeIV 双重态			HeIV 四重态		Ne III 三重态		He I 双重态	
	15.1	42.1	60.6	20.8	54.3	26.7	49.0		
E(keV)	48	10.37	0.17	0.16	2.83	0.10	0.39	0.11	0.19
52	11.37	0.14	0.15	3.17	0.11	0.39	0.12	0.20	
56	9.95	0.15	0.15	3.34	0.12	0.47	0.10	0.21	
60	12.22	0.26	0.20	4.76	0.13	0.51	0.14	0.29	
64	12.57	0.20	0.16	3.63	0.14	0.55	0.16	0.25	

表 6 Ne 的 I 双重态、III 三重态、IV 双重态和 IV 四重态谱线

谱线	跃迁	波长(nm)
I 双重态	2p <sup>2</sup> P <sup>0</sup> → 1s <sup>2</sup> S	30.4
III 三重态	2p <sup>3</sup> S <sup>3</sup> P <sup>0</sup> → 2p <sup>4</sup> P	26.7
	2p <sup>3</sup> S <sup>3</sup> S <sup>0</sup> → 2p <sup>4</sup> P	31.3
	2s2p <sup>5</sup> P <sup>0</sup> → 2p <sup>4</sup> P	49.0
IV 双重态	2p <sup>2</sup> 4d <sup>2</sup> D <sup>0</sup> → 2p <sup>3</sup> 2D <sup>0</sup>	15.1
	2s2p <sup>4</sup> S → 2p <sup>3</sup> 2P <sup>2</sup>	42.1
	2p <sup>5</sup> 2p <sup>0</sup> → 2s2p <sup>4</sup> 2P	60.6
IV 四重态	2p <sup>2</sup> 3s <sup>2</sup> 4P → 2p <sup>3</sup> 4S <sup>0</sup>	20.8
	2s2p <sup>4</sup> P → 2p <sup>3</sup> 4S <sup>0</sup>	54.3

行了绝对测量. 表 5 给出了 OV 单态、OV 三重

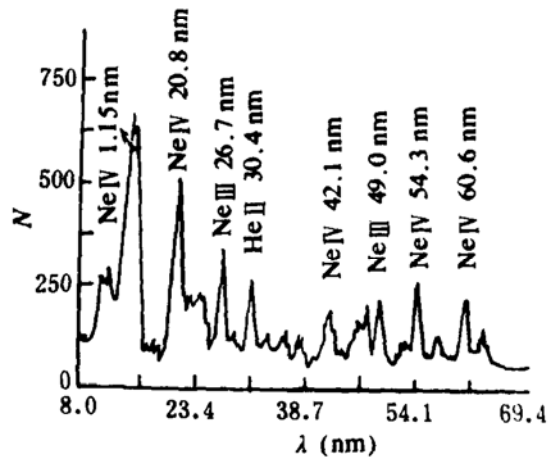


图 3 Ne<sup>II+</sup> 与 He 碰撞中, Ne IV、Ne III、和 He I 的发射光谱(入射离子能量 52keV)

$$\sigma_{em} = \frac{4\pi}{\omega N \cdot L \cdot K(\lambda) \cdot Q/q_e} S(\lambda)$$

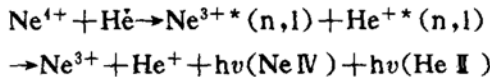
根据发射截面定义, 本实验对发射截面进

态以及 He I 双重态谱线的发射截面。

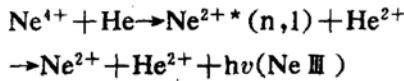
实验装置的详细描述见潘广炎等人的文章<sup>[1]</sup>.图3表示测量到的 $Ne^{4+}$ 与He碰撞中产生的发射光谱,入射离子 $Ne^{4+}$ 、能量为52keV.谱线及发射截面结果见表6~7.

从上述发射谱分析,在入射离子 $Ne^{4+}$ 能量范围为48~64keV内,存在着两种电子俘获激发过程:

1)单电子俘获激发过程:



2)双电子俘获激发过程



根据发射截面定义<sup>[3]</sup>,我们对发射截面进行了绝对测量.表8给出了Ne IV双重态,Ne IV四重态、Ne III三重态、He I双重态谱线的发射截面.

## 4 讨论

### 4.1 激发态的选择

在高电荷态离子与原子碰撞中,最重要的碰撞过程之一就是电子俘获过程,本实验结果表明,电子俘获有单电子俘获和双电子俘获两种过程.一般而言,单电子俘获截面要比双电子俘获截面大.由于这里选择的靶原子He只有两个电子,在本实验中是不可能出现三电子俘获过程的,测量中没有观察到三电子俘获.可以预期:如果选择靶原子为碱金属原子,也许可能观察到三电子俘获过程.

实验证明,电子俘获所产生的激发态是可以选择的.在高电荷离子与原子碰撞过程中,入射离子可以从靶原子那里俘获一个电子或两个电子而使自己处于激发态,这样就可以通过选择不同离子种类、不同的靶原子和入射离子的速度,在碰撞过程中,使电子组态重新排列来实现激发态的选择.

### 4.2 误差估计

本实验光子积分计数为 $4 \times 10^2 \sim 10^4$ ,统

计误差小于5%,光学测量、电荷测量、气体密度测量误差分别为 $\pm 3\%$ ,量子效率标定误差为 $\pm 10\%$ .发射截面总误差为 $\pm (20 \sim 25)\%$ .激发截面总误差为 $\pm (25 \sim 30)\%$ .

在 $N^{6+}$ 与He碰撞体系中,入射离子能量为90keV时,Dijkamp等人<sup>[6]</sup>给出 $N^{5+}(3p)$ 激发截面为 $4 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ , $N^{5+}(4d)$ 激发截面很小,没有给出.本实验结果给出 $N^{5+}(3p)$ 激发截面为 $4.45 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ , $N^{5+}(4d)$ 的激发截面为 $0.09 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ .在误差范围内,两者符合得很好.

随着科学技术的高速发展,原子的离化度越来越高,至今已有类氦 $U^{82+}$ 和类氡 $Au^{69+}$ 离子.在这种情况下,高电荷态离子能级结构的变化、有效电荷变化、跃迁几率和寿命的测量都是当前原子物理领域中新的研究动向.

ECR源对研究高电荷态原子物理是一个非常有用的工具,可以用于原子物理、分子物理领域许多前沿课题的研究.例如:(1)高电荷态离子与原子、分子碰撞过程中激发态的研究;电荷交换机制的研究;电子俘获通道的研究;电离截面的研究.(2)高电荷态离子与电子碰撞过程中激发态的研究;电离截面的研究;单电子复合的研究;双电子复合的研究.

## 参 考 文 献

- 1 Bloemen E W P, et al. J. Phys., B: At. Mol. Phys., 1982, 15: 1391
- 2 Nikulin V K, et al. J. Phys., B: At. Mol. Phys., 1984, 17: L721
- 3 Dijkamp D, et al. J. Phys. B: At. Mol. Phys., 1985, 18: 737
- 4 Demkov Yu N. Sov. Phys., JETP, 1964, 18: 138
- 5 Olson R E. Phys. Rev., 1972, A6: 1822
- 6 Dinterman T R, Delos, J. B. Phys. Rev., 1977, A15: 463

## Highly Charged Ions $N^{6+}$ , $O^{5+}$ , $Ne^{4+}$ Collision with Atom He into Excited States

Pan Guangyan    Yang Feng    Li Dawan

(*Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Liu Zhanwen    Zhang Wen    Xu Qian    Liu Huiping    Zhao Mengchun

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

**Abstract** We have investigated the excitation processes in collisions between  $N^{6+}$ ,  $O^{5+}$ ,  $Ne^{4+}$  and He by using the ECR ionic source and the LHT—30 VUV Monochromator. The emission spectra show that there are three channels of excitation in the  $N^{6+} + He$  collision system: (1) Single electron capture into excited states; (2) Double electron capture into excited states; (3) Direct excitation of incident ions.

**Key Words** highly charged ions, collisions, excited states.

(上接 55 页)

### 参 考 文 献

- |   |  |
|---|--|
| <p>1 Toulemonde M, et al. Phys. Rev., (B) 1987, 35: 6560</p> <p>2 Studer F, et al. Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res., (B) 1987, 19~20: 856</p> | <p>3 Fuchs G, et al. Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res., (B) 1985, 12: 471</p> <p>4 Groult D, et al. Defect and diffusion Fourm 1988, 57~58: 391</p> <p>5 张有纲等. 磁性材料, 成都电讯工程学院出版, 1988</p> |
|---|--|

## Irradiation Effects of $Y_{1.6}Ca_{1.4}V_{0.45}Sn_{0.5}Fe_{4.05}O_{12}$ Induced by Energetic Carbon Ions Bombardment

Xia Yuanfu    Xiong Hongqi

(*Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008*)

Hou Mingdong

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

**Abstract** The vacancies and vacancy clusters induced by the irradiation lead to the change of the magnetic structure around the defects. The reduction of the hyperfine magnetic field is caused by the lower superexchange field due to the formation of the  $O^{2-}$  vacancies. The change of direction of the hyperfine field has been also observed in Mössbauer spectra. On the other hand, the X-ray diffraction showed that the defects give rise to an increase of the lattice constant of the samples.

**Key Words** irradiation effects, heavy ion physics.