第36卷 第4期　　物 理 学 报　　Vol. 36, No. 4
1987年4月　　ACTA PHYSICA SINICA　　Apr., 1987

He^+ 离子和 Ne 原子碰撞过程中激发态的研究

雷子明　刘家瑞　潘广炎
（中国科学院物理研究所）

1986年4月22日收到

提　　要

在 He^+ 离子和 Ne 原子碰撞过程中，我们发现两种碰撞激发过程，一种是电子俘获激发过程，另一种是直接激发过程。本实验用光学多道分析系统（OMA）对这些过程进行了光学测量，给出了发射截面数据．入射离子实验室能量范围为 70—150keV．

一、引　　言

在离子和原子碰撞过程中，所产生的信息是非常丰富的．从大量文献[1,2,4,5]中已知，发生的过程主要有

1. 离子俘获电子激发过程

$$X^{q+} + Y \rightarrow X^{(q-1)+*}(n,l) + Y^+ \rightarrow X^{(q-1)+} + Y^+ + h\nu;$$

2. 离子俘获电子靶激发过程

$$X^{q+} + Y \rightarrow X^{(q-1)+} + Y^{+*}(n,l) \rightarrow X^{(q-1)+} + Y^+ + h\nu;$$

3. 离子俘获电子无激发过程

$$X^{q+} + Y \rightarrow X^{(q-1)+} + Y^+;$$

4. 电荷交换靶电离过程

$$X^{q+} + Y \rightarrow X^{(q-1)+} + Y^{2+} + e;$$

5. 离子直接激发过程

$$X^{q+} + Y \rightarrow X^{q+*}(n,l) + Y \rightarrow X^{q+} + Y + h\nu;$$

6. 靶原子直接激发过程

$$X^{q+} + Y \rightarrow X^{q+} + Y^*(n,l) \rightarrow X^{q+} + Y + h\nu;$$

7. 双电子俘获无激发过程

$$X^{q+} + Y \rightarrow X^{(q-2)+} + Y^{2+}.$$

这里 X^{q+} 表示 q 次离化态的各种不同入射离子，Y表示各种气态靶原子或靶分子，$h\nu$ 表示发射的光子．

本文描述了 He^+ 离子和 Ne 原子碰撞激发过程，实验数据表明：此碰撞体系存在两种碰撞激发过程．即

$$1.\ He^{+} + Ne \rightarrow He^{*}(n,l) + Ne^{+*}(n,l)$$
$$\rightarrow He + h\nu_1 + Ne^{+} + h\nu_2, \qquad (1)$$

此过程称为电子俘获激发过程；

$$2.\ He^{+} + Ne \rightarrow He^{+} + Ne^{*}(n,l)$$
$$\rightarrow He^{+} + Ne + h\nu, \qquad (2)$$

此过程称为直接激发过程.

二、实 验 装 置

图 1 为实验装置示意图. 实验装置分三部分：第一部分为 J59-200 加速器，离子源

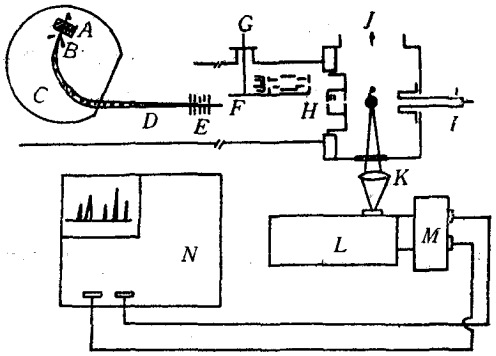

图 1 实验装置示意图 A 为离子源；B 为吸极；C 为分析磁铁；D 为飘移空间；E 为加速管；F 为离子束；G 为可移动电子枪，H 为准直器；I 为法拉第筒；J 为真空紫外单色仪；K 为透镜；L 为光谱仪；M 为二极管阵列；N 为多道分析器；$L+M+N$ 为 TN-1710 光学多道分析系统

是冷阴极的潘宁源. 能量范围为 50—200keV，束流为 1—200μA，电荷态通过磁场选择. 第二部分为气体靶室，真空由扩散泵和机械泵获得，真空度可达 2×10^{-6}Torr，充入靶气体之后，在碰撞室中真空度为 10^{-3}—10^{-4}Torr，对于不同靶气体的真空度由麦克劳真空计校正，在碰撞室内观察长度 L 为 3cm，这样二次碰撞过程可以忽略不计. 第三部分为测量系统，由 TN-1710 光学多道分析系统（美国 Tracor Northen 公司出产）、磁带机和绘图仪组成. 光学多道系统包括一台单色仪、硅光二极管阵列和多道分析器. 单色仪为 TN-6048-3，内有一个固定的全息光栅，波长范围为 200—800nm，聚焦长度为 200mm，相对孔径为 $f/3.00$，分辨率为 3.6nm，入射狭缝宽度为 0.2mm，此单色仪固定在相对于入射离子束成 90° 角方向上. 量子效率用钨带灯标定，钨带灯的发射谱数据由中国计量科学研究院提供.

三、实 验 结 果

由光学多道分析系统测量得到的 HeI，NeI，NeII 发射光谱见图 2.

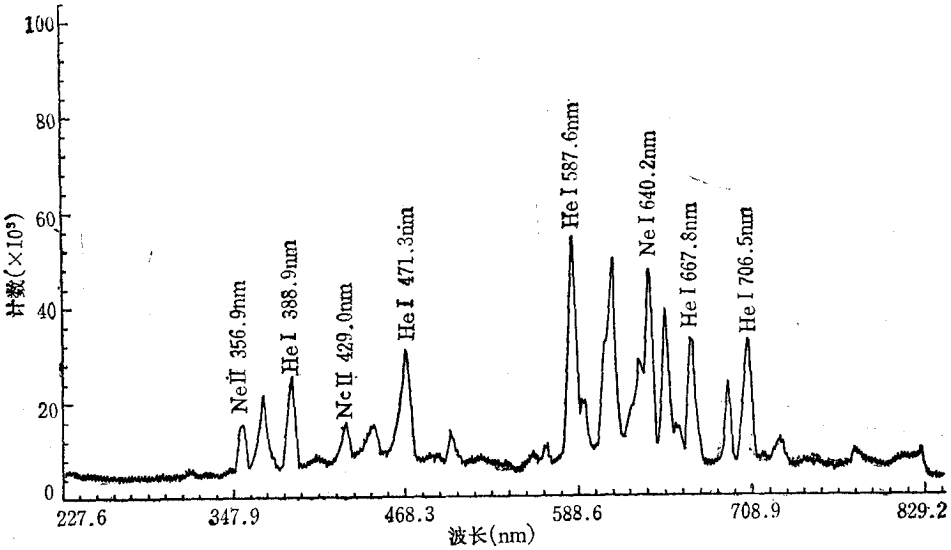

图2　He+ 和 Ne 碰撞过程中 HeI，NeI，NeII 发射光谱　入射离子 He+ 能量为 150keV；由于谱线较多这里仅标出几条谱线的波长值

从图 2 可知，测得的 HeI 谱线如表 1 所示，NeI 谱线如表 2 所示，NeII 谱线如表 3 所示。

表 1　HeI 单态、三重态谱线

单　态		三　重　态	
跃　迁	波长 (nm)	跃　迁	波长 (nm)
$3^1S\rightarrow2^1P$	728.1	$3^3S\rightarrow2^3P$	706.5
		$4^3S\rightarrow2^3P$	471.3
$3^1P\rightarrow2^1S$	501.6	$3^3P\rightarrow2^3S$	388.9
$3^1D\rightarrow2^1P$	667.8	$3^3D\rightarrow2^3P$	587.6
		$4^3D\rightarrow2^3P$	447.2

表 2　NeI 3p→3s，3p→3s′ 谱线

跃　迁	波长 (nm)	跃　迁	波长 (nm)
$3p[3/2]_2\rightarrow3s[3/2]^0_2$	614.3	$3p[5/2]_2\rightarrow3s[3/2]^0_1$	650.7
$3p[5/2]_3\rightarrow3s[3/2]^0_2$	640.2	$3p[3/2]_2\rightarrow5s'[1/2]^0_1$	692.9

表 3　NeII 双重态、四重态谱线

双　重　态		四　重　态	
跃　迁	波长 (nm)	跃　迁	波长 (nm)
$3p'^2F^0_{7/2}\rightarrow3s'^2D_{5/2}$	356.9	$4f^4G_{11/2}\rightarrow3d^4F_{9/2}$	429.0
$3p^2D^0_{5/2}\rightarrow3s^2P_{3/2}$	371.3		

发射截面的定义为

$$\sigma_{em} = \frac{4\pi}{\omega} \frac{S(\lambda)}{N \cdot L \cdot K(\lambda) \cdot Q/qe}. \tag{3}$$

(3)式中Q为离子束总电荷量，qe为单个入射离子的电荷，Q/qe为入射离子数目；N为靶原子数目；$K(\lambda)$为量子效率，$S(\lambda)$为扣除本底的测量信号，$S(\lambda)/K(\lambda)$为发射某波长的光子数目；L为观察长度，ω为从单色仪入射狭缝向被测量光源看去的发射立体角。

HeI 单态、三重态，NeI 3p→3s，3p→3s′ 以及 NeII 双重态、四重态发射截面分别列于表 4—表 7。

表 4 HeI 单态发射截面 $\sigma_{em}(\times 10^{-19}\mathrm{cm}^2)$

E(keV)	$3^1S\to2^1P$ ($\lambda=728.1$nm)	$3^1P\to2^1S$ ($\lambda=501.6$nm)	$3^1D\to2^1P$ ($\lambda=667.8$nm)
70	5.36	1.39	12.00
90	5.95	1.58	13.60
110	3.22	0.80	7.70
130	4.10	1.24	9.63
150	2.60	1.03	9.08

表 5 HeI 三重态发射截面 $\sigma_{em}(\times 10^{-19}\mathrm{cm}^2)$

E(keV)	$3^3S\to2^3P$ ($\lambda=706.5$nm)	$4^3S\to2^3P$ ($\lambda=471.3$nm)	$3^3P\to2^3S$ ($\lambda=388.9$nm)	$3^3D\to2^3P$ ($\lambda=587.6$nm)	$4^3D\to2^3P$ ($\lambda=447.2$nm)
70	16.80	3.68	3.43	11.10	2.99
90	22.10	5.66	4.52	12.79	3.65
110	12.30	3.62	2.46	7.24	1.82
130	14.50	5.00	3.45	9.50	2.06
150	13.50	4.87	3.27	8.81	1.28

表 6 NeI 3p→3s，3p→3s′ 发射截面 $\sigma_{em}(\times 10^{-19}\mathrm{cm}^2)$

E(keV)	$3p[3/2]_2\to3s[3/2]^0_2$ ($\lambda=614.3$nm)	$3p[5/2]_3\to3s[3/2]^0_2$ ($\lambda=640.2$nm)	$3p[5/2]_2\to3s[3/2]^0_1$ ($\lambda=650.7$nm)	$3p[3/2]_2\to3s'[1/2]^0_1$ ($\lambda=692.9$nm)
70	14.80	23.30	8.92	6.39
90	17.50	25.47	10.20	7.54
110	10.50	14.39	5.67	4.31
130	14.00	17.67	7.95	6.28
150	14.00	16.51	7.70	6.16

表 7 NeII 双重态、四重态发射截面 $\sigma_{em}(\times 10^{-19}\mathrm{cm}^2)$

E(keV)	$3p'^2F^0_{7/2}\to3s'^2D_{5/2}$ ($\lambda=356.9$nm)	$3p^2D^0_{5/2}\to3s^2P_{3/2}$ ($\lambda=371.3$nm)	$4f^4G_{11/2}\to3d^4F_{9/2}$ ($\lambda=429.0$nm)
70	1.21	2.55	2.17
90	1.31	3.20	2.60
110	0.74	2.01	1.32
130	0.88	2.67	1.87
150	0.79	2.64	1.62

四、讨论与误差

1. HeI 发射谱

从实验测得 HeI 发射谱，说明了在入射离子 He^+ 与 Ne 原子碰撞过程中，存在入射离子俘获一个电子使自己处于激发态的碰撞机制.

图 3 给出了 HeI 单态 $3l$ 能级的发射截面随入射离子速度变化的依赖关系. 这些曲线表明：S，P 和D态的发射截面的速度依赖关系是相似的，而D态的发射截面最大，这是由于方位角角量子数不同所表现的差异.

图 4 给出了 HeI n^3S 和 n^3D 的发射截面随入射离子速度的变化. 图 4 中给出了两组主量子数 n 分别为 3，4 的四条曲线. 这些曲线表明：发射截面具有相似的速度依赖关系. 同时，实验结果表明：发射截面 σ_{em} 随主量子数 n 的增大而减小.

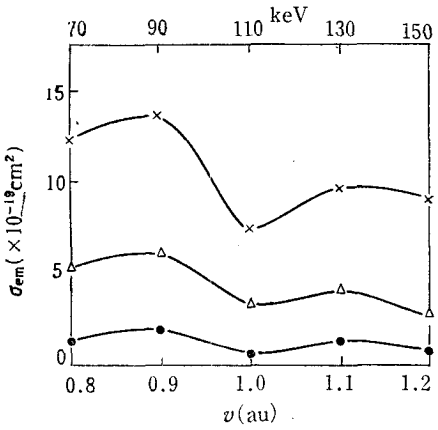

图 3　HeI 单态发射截面随入射离子速度的变化
×为 $3^1D\to2^1P$；△为 $3^1S\to2^1P$；●为 $3^1P\to2^1S$

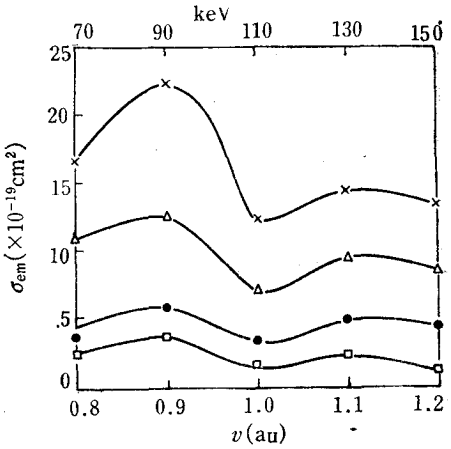

图 4　HeI 三重态发射截面随入射离子速度的变化
×为 $3^3S\to2^3P$；△为 $3^3D\to2^3P$；●为 $4^3S\to2^3P$；
□为 $4^3D\to2^3P$

此外，从图 3，4 可以看出：HeI 单态和三重态发射截面达到最大值的入射离子速度 V_{max} 为 0.9au. 根据 Massey 的绝热判据可知：在这个碰撞体系中，在两核距离大约为 8au 时，俘获激发而发射 HeI 谱线的几率最大. 然后，发射截面随入射离子速度的增加而出现有振荡结构. 从图 7 可以看到 Andresen[6]，Veje[7] 以及 Wolterbeek[2] 等人的工作中，HeI $3s^1S$ 和 HeI $3s^3S$ 在这个速度区域也出现类似的振荡结构. 这是由于相干的激发态混合而引起的干涉效应[8]. 本实验结果同他们的结果比较如图 7 所示.

2. NeI 发射谱

从本实验测得的 NeI 发射谱说明：在 He^+ 离子与 Ne 原子碰撞过程中同时存在着靶原子 Ne 直接激发的机制.

从图 5 同样可以看到，在入射离子 He^+ 速度为 0.9au 时，NeI 的发射截面出现最大值，这同样可以用 Massey 绝热判据来解释. 在这个碰撞体系中，两核距离大约为 8au 时，

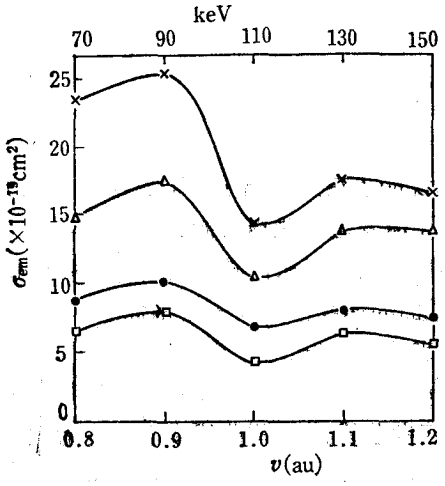

图 5 NeI 发射截面随入射离子速度的依赖关系
×为 $3p[5/2]_3\to3s[3/2]_2$; △为 $3p[3/2]_2\to3s[3/2]_2$;
●为 $3p[5/2]_2\to3s[3/2]_1$; □为 $3p[3/2]_2\to3s'[1/2]_1$

电子组态重排使靶原子 Ne 激发而发射 NeI 谱线的几率最大. 同样，发射截面随入射离子速度的增加而出现有类似的振荡结构.

3. NeII 发射谱

NeII 发射谱的存在，是由于入射离子 He^+ 在碰撞过程中，从靶原子 Ne 俘获一个

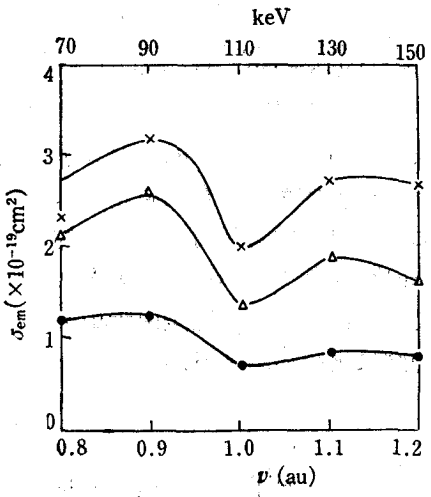

图 6 NeII 发射截面随入射离子速度变化关系
×为 $3p^2D^0_{5/2}\to3s^2P_{3/2}$; △为 $4f^4G_{11/2}\to3d^4F_{9/2}$;
●为 $3p'^2F^0_{7/2}\to3s'^2D_{5/2}$

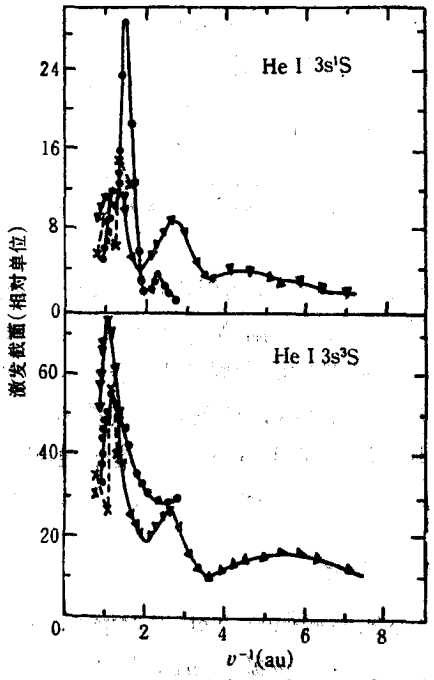

图 7 $He^+ + Ne$ 碰撞中 HeI$3s^1S$ 和 $3s^3S$ 激发截面 ▼为 Wolterbeek; ●为 Andresen; Veje; ×为本实验

电子而使 Ne^+ 处于激发态，然后在退激发过程中发射 NeII 谱线.

从图 6 可以看到，NeII 发射截面在入射离子速度为 0.9au 时也存在一个峰值. 而且，发射截面随入射离子速度的增加同样出现有类似的振荡结构.

4. 误差估计

本实验的计数都在 10^4 以上，统计误差约为 1%；系统误差：记录入射离子数目的电荷积分仪约为 3%，记录靶原子数目的气压表约为 2%，记录光子数目的光学测量系统约为 3%，量子效率标定约为 3%. 总误差(包括统计误差和系统误差)约为 10—15%.

在测量中，HeI $3^1D \rightarrow 2^1P$ 发射谱线为 667.8nm，NeI $3p'[3/2]_2 \rightarrow 3s'[1/2]_1^0$ 发射谱线也为 667.8nm. 前者跃迁几率为 $0.638 \times 10^8 s^{-1}$，后者跃迁几率为 $0.238 \times 10^8 s^{-1}$[3]. 因此，在给出的 HeI$3^1D \rightarrow 2^1P$ 谱线的发射截面中包含有 NeI $3p'[3/2]_2 \rightarrow 3s'[1/2]_1^0$ 谱线的发射截面.

本实验加速器的运转是于永春、邱长青和于光伟同志负责完成的，作者在此表示感谢.

参　考　文　献

[1] F. J. de Heer, Experimental Studies of Excitation in Collision between Atomic and Ionic Systems, Advances in Atomic and Molecular Physics Vol. 2. Edited by D. R. Bates *et al.*, Academic Press, New York. London, (1966) p. 327.

[2] L. Wolterbeek Muller and F. J. de Heer, *Physica* ,**48**(1970), 345.

[3] W. L. Wiese, M. W. Smith and B. M. Glennon, Atomic Transition Probabilities (NSRDS-NBS4), Vol. 1. (1966).

[4] Pan Guang-yan, Lei Zi-ming and Liu Jia-rui, Abstracts of Contributed Papers, XIV ICPEAC Edited by M. J. Coggiola *et al.*, Palo Alto, USA, July 24th-30th, (1985), p. 699.

[5] Pan Guang-yan *et al.*, *Phys. Scripta*, **T3**(1983), 120.

[6] B. Andresen *et al.*, *Phys. Rev.*, **A16**(1977), 150.

[7] E. Veje *et al.*, Abstracts of papers, Vol. 2, IX ICPEAC Seattle (U. S. A.), 24—30 July (1975), p. 739.

[8] D. Hasselkamp *et al.*, Oscillatory Structure of Excitation Functions in Atomic Collisions. From: Coherence and Correlation in Atomic Collisions. Edited by H. Kleinpoppen *et al.*, Plenum Publishing Corporation, (1980).

EXPERIMENTAL STUDIES OF EXCITED STATES IN COLLISIONS BETWEEN He^+ AND Ne

LEI ZI-MING　LIU JIA-RUI　PAN GUANG-YAN

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In collisions between He^+ and Ne, two processes of excitation are found, one is one electron capture into excited states and another is direct excitation of projectile and target by ion impact. Optical method of measurement is performed using Optical Multichannel Analysis System (OMA), and the data of emission cross sections are obtained in the energy range of 70—150 keV.