

氮分子离子 N_2^+ 和氮原子离子 N^+ 与 Ne 原子碰撞激发的比较^{*}

李大万[†] 潘广炎 杨 锋

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(1995 年 4 月 20 日收到)

用发射光谱法研究了同种元素氮的分子离子 N_2^+ 和原子离子 N^+ 与 Ne 原子碰撞产生的激发态, 获得了靶激发、入射分子离子的分解激发、入射原子离子的激发以及两种离子与靶之间的电荷转移激发等信息. 计算了各发射谱线的发射截面. 对两种离子引起的谱线发射截面的差异进行了分析, 得出一些初步结论, 并对此作了些定性解释.

PACC: 3450

1 引 言

我们多年从事原子离子与中性原子碰撞过程中的激发态研究, 近年来着重研究了分子离子与电子碰撞产生的分解激发和分解复合过程^[1]. 研究结果发现原子离子与自由电子碰撞引起的复合几率比分子离子的小^[2]. 这些研究成果的积累促使我们以很大兴趣去探索同种元素的分子离子和原子离子与中性原子碰撞激发方面的差异, 为此我们选择了 N_2^+ 和 N^+ 离子与 He, H_2 , Ne, Ar 原子碰撞体系作了系统实验, 发现了一些感兴趣的结果. 本文报道了 N_2^+ 和 N^+ 与 Ne 碰撞产生的发射光谱及测得各谱线的绝对发射截面, 并进行了比较分析.

2 实验装置

图 1 为实验装置示意图. 它由三部分组成: 第一部分为 LC-4 加速器, 其离子源是冷阴极潘宁源, 输出的离子经分析磁铁选择出所需离子, 然后由加速管加速到 150—600 keV (单荷离子), 经聚焦在靶点处束流强度可调到 10—50 μA . 第二部分为靶室及充气系统, 先由涡轮分子泵抽气至 $2.7 \times 10^{-4} \text{Pa}$, 然后通过针阀向靶室充入所需气体, 调至所需压强. 压强由标定的真空电离规测量. 第三部分为光学探测系统, 由 TN-1710 光学多道分析系统、磁带机和绘图仪组成. 光学多道分析系统包括一台 TN-6048-3 全息光栅光谱仪、硅光二极管阵列、像增强器和多道分析器, 可测波长范围为 200—800 nm, 分辨率为 3.6 nm. 光学探测系统的量子效率用钨带灯绝对标定, 钨带灯的发射谱数据由中国计量科学研究院提供.

^{*} 国家自然科学基金资助的课题.

[†] 通讯地址: 中央民族大学物理系, 北京 100081.

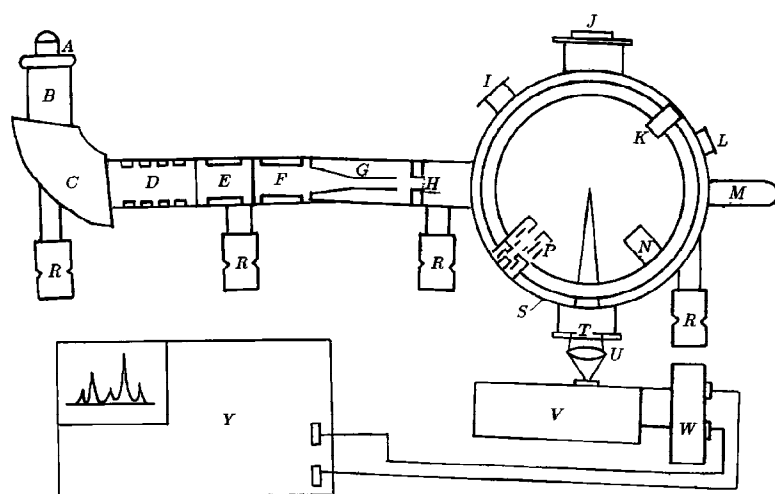
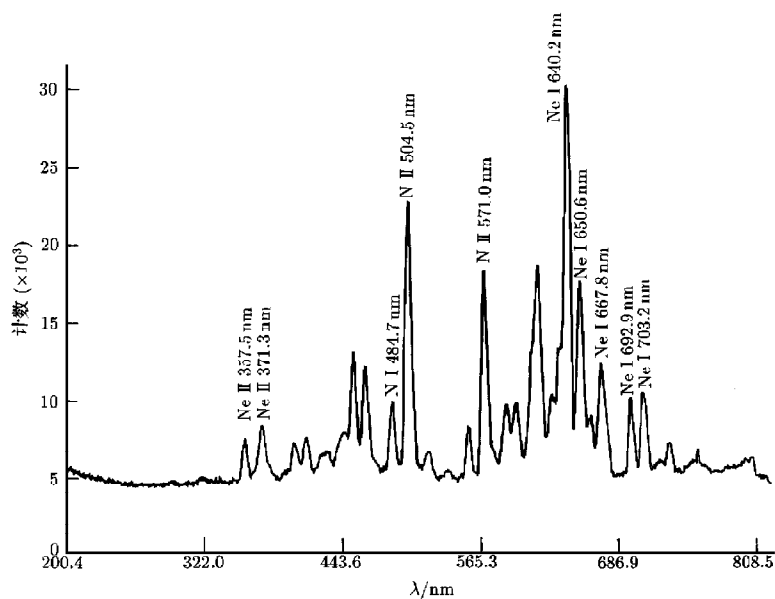


图1 实验装置示意图

A:离子源;B:初聚焦;C:分析磁铁;D:加速管;E:聚焦;F:中性束偏转;G:气阻;H:准直孔;I:观察窗;J:冷阱;K:电子收集器;L:激光通道;M:法拉第筒;N:原子束炉;P:电子枪;R:真空泵;S:大靶室;T:小靶室;U:光学透镜;V:光谱仪;W:光探测器;Y:数据采集系统

3 实验结果

N_2^+ 和 N^+ 与 Ne 碰撞产生的典型发射光谱分别示于图2和图3.

图2 N_2^+ 与 Ne 碰撞产生的发射光谱

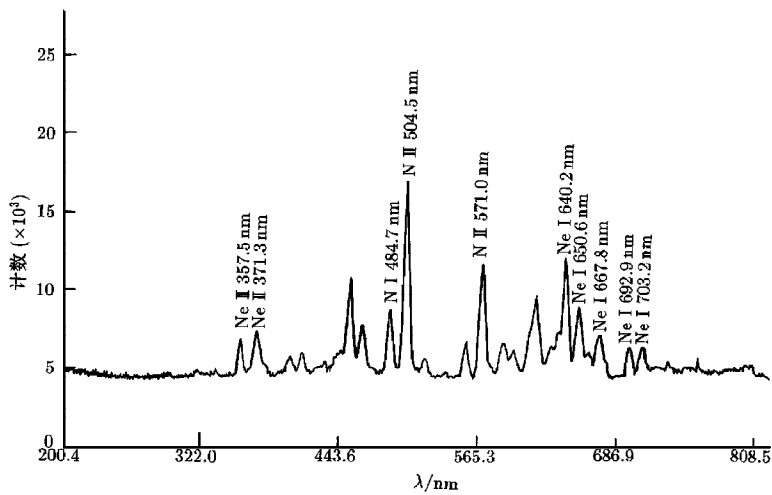


图 3 N⁺与Ne碰撞产生的发射光谱

由发射谱辨认的 NeI, NeII和 NII, NI谱线的波长及跃迁列于表 1, 表 2.

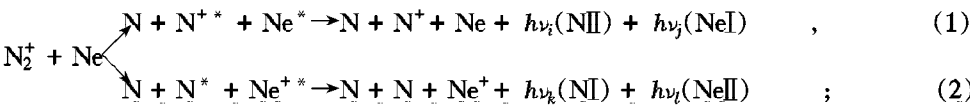
表 1 Ne 谱线

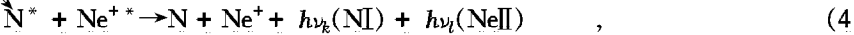
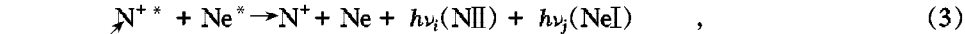
NeI		NeII	
波长/nm	跃 迁	波长/nm	跃 迁
703.2	$3p\left[\frac{1}{2}\right]_1 \rightarrow 3s\left[\frac{3}{2}\right]_2^0$	371.3	$3p^2D_{3/2}^0 \rightarrow 3s^2P_{3/2}$
692.9	$3p\left[\frac{3}{2}\right]_2 \rightarrow 3s'\left[\frac{1}{2}\right]_1^0$	357.5	$3p^2F_{3/2}^0 \rightarrow 3s^2D_{3/2}$
667.8	$3p'\left[\frac{3}{2}\right]_2 \rightarrow 3s'\left[\frac{1}{2}\right]_1^0$		
650.6	$3p\left[\frac{5}{2}\right]_2 \rightarrow 3s\left[\frac{3}{2}\right]_1^0$		
640.2	$3p\left[\frac{5}{2}\right]_3 \rightarrow 3s\left[\frac{3}{2}\right]_2^0$		

表 2 N 谱线

NII		NI	
波长/nm	跃 迁	波长/nm	跃 迁
571.0	$3p^3D \rightarrow 3s^3P^0$	484.7	$7s^2P \rightarrow 3p^2S'$
504.5	$3p^3S \rightarrow 3s^3P^0$		

上述发射光谱说明存在如下激发过程:





(1)式表示有分子离子的分解激发,(3)式表示入射原子离子激发,(2)和(4)式表明电荷转移(或电子俘获)激发通道,(1)和(3)式还包括靶原子的直接激发.

根据公式^[3]

$$\sigma_{em} = \frac{4\pi}{\omega} \cdot \frac{S(\lambda)}{NLK(\lambda) Q/qe}$$

(5)

计算出的上述各谱线的发射截面如表 3.

表 3 σ_{em}(×10⁻¹⁹cm²)

E _i /keV	NeI703.2 nm		NeI692.9 nm		NeI667.8 nm		NeI650.6 nm		NeI640.2 nm	
	N ₂ ⁺	N ⁺	N ₂ ⁺	N ⁺	N ₂ ⁺	N ⁺	N ₂ ⁺	N ⁺	N ₂ ⁺	N ⁺
500	2.93	1.60	2.44	1.94	3.44	2.59	4.22	2.79	10.71	5.60
450	3.64	1.64	3.14	1.77	4.46	2.57	5.36	2.70	14.44	5.76
400	3.81	1.57	3.12	1.66	4.41	2.38	5.25	2.42	14.55	5.61
350	5.14	1.74	4.31	1.59	6.13	2.34	7.36	2.53	20.84	5.92
300	5.86	2.19	4.67	1.80	6.76	2.72	7.96	2.84	23.22	7.02
250	5.76	2.78	4.18	2.31	6.30	3.49	7.47	4.00	21.90	10.34
200	6.61	3.20	4.45	2.61	6.86	3.92	8.47	4.36	24.74	12.11
150	8.12	4.70	4.55	3.53	7.36	5.54	9.03	6.43	27.54	18.31

E _i /keV	NeII371.3 nm		NeII357.5 nm		NII571.0 nm		NII504.5 nm		NI484.7 nm	
	N ₂ ⁺	N ⁺	N ₂ ⁺	N ⁺	N ₂ ⁺	N ⁺	N ₂ ⁺	N ⁺	N ₂ ⁺	N ⁺
500	1.61	1.42	0.63	0.46	4.39	4.30	5.55	5.70	1.20	2.54
450	1.79	1.42	0.70	0.49	5.17	4.31	6.39	5.74	1.32	2.32
400	1.56	1.35	0.61	0.48	4.37	3.92	5.72	5.24	1.13	1.94
350	1.87	1.35	0.68	0.49	6.10	3.69	6.95	4.97	1.31	1.70
300	1.70	1.37	0.59	0.37	6.48	3.66	7.04	4.87	1.19	1.54
250	1.32	1.56	0.44	0.43	6.14	4.23	6.19	5.38	0.94	1.62
200	1.15	1.34	0.38	0.37	7.65	3.83	7.25	4.67	0.90	1.29
150	1.13	1.39	0.38	0.35	10.26	4.96	9.17	5.40	0.86	1.26

NeI谱线(选择了有代表性的 640.2 nm)的 σ_{em}-E_i 关系曲线示于图 4.

4 讨论和结论

通过分析实验数据,可以得出下述结论,并对此进行一些讨论.

1) 分析表 3 NeI5 条谱线的 σ_{em}(参见图 4)发现,在相同入射离子能量下,N₂⁺ 引起的靶激发截面明显大于 N⁺ 引起的靶激发截面.这一有趣的结果,首先可以由同能量的 N₂⁺ 与

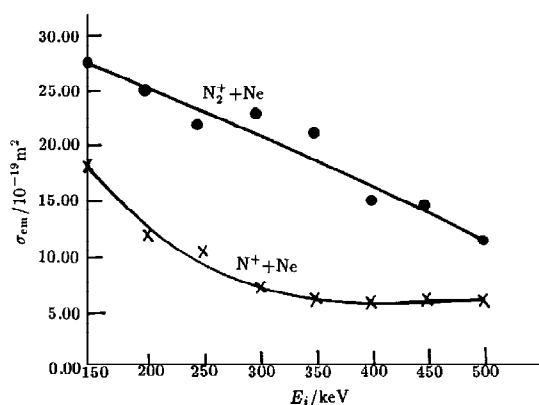


图4 NeI 640.2 nm 谱线的 σ_{cm} 与 E_i 关系

N^+ 速度比为 $\frac{1}{\sqrt{2}}:1$ 来解释, 即两者与 Ne 相互作用的时间, N_2^+ 比 N^+ 长, 所以 N_2^+ 引起的激发截面就更大些。

2) 把上述 5 条谱线的 σ_{cm} 值, 在相同入射速度下作比较, 即 N_2^+ 500 keV 与 N^+ 250 keV ($v = 0.84$ a. u.), N_2^+ 400 keV 与 N^+ 200 keV ($v = 0.76$ a. u.), N_2^+ 300 keV 与 N^+ 150 keV ($v = 0.66$ a. u.) 进行比较, 发现在实验误差范围内 N_2^+ 引起的靶激发截面仍大于 N^+ 引起的

靶激发截面。这说明有质量效应(N_2^+ 质量为 N^+ 的 2 倍), 也可能还有较弱的结构效应, 这与 Fuelling 等人^[4]比较 $H^+ + \text{He}$, $H_2^+ + \text{He}$, $H_3^+ + \text{He}$ 碰撞中 ($v = 1.4-8$ a. u.) EUV 发射截面所得出的结论相符。

3) 靶直接激发截面 σ_{NeI} 远大于失去一个电子的靶离子激发截面 σ_{NeII} , 这是很好理解的。

4) 入射离子 N_2^+ 的分解激发和 N^+ 的直接激发截面 σ_{NII} 大于电荷转移激发截面 σ_{NI} 。

5) 从表 3 及图 4 看出, NeI 发射截面随入射离子能量的增加而变小, 这是因为入射离子的能量高其速度就快, 与靶原子作用时间也就短, 所以截面小。并且 N^+ 引起的 NeI 发射截面在高能量区(约在 350 keV 以上)趋于平坦, 而 N_2^+ 引起的却未趋平缓, 说明对 N_2^+ 而言此能区内速度效应一直明显, 对 N^+ 而言速度效应已不显著。对 NeII, NI 等谱线的发射截面与入射离子能量之间的关系, 未发现明显规律。目前尚无统一的理论模型可解释电子俘获态选择激发截面与入射离子能量间的复杂关系。

6) N_2^+ 和 N^+ 入射离子对不同靶的电荷转移激发截面的对比发现, σ_{ArII} 大于 σ_{NeII} , 而 σ_{HeII} 未观察到(有关 σ_{ArII} 的将另文发表), 这与它们的电离能分别为 15.76 eV, 21.56 eV 和 24.59 eV 的电离难易顺序相一致。这也和多电荷离子的单电子俘获截面随靶原子电离电势增加而变小的规律^[5]定性地符合。

[1] 李大万、杨 锋、潘广炎, 科学通报, **39**(1994), 786.

[2] J. B. A. Mitchell, Atomic Processes in Electron-Ion and Ion-Ion Collisions, ed. by F. Brouillard, Plenum Press, New York, 1986, p. 185.

[3] K. Kadota, D. Dijkkamp, R. L. van der Woude, A. de Boer, Pan Guang-Yan and F. J. de Heer, J. Phys. B: At. Mol. Phys., **15**(1982), 3275.

[4] S. Fuelling, R. Bruch, G. Liu, M. Bailey, E. A. Rauscher, E. Träbert and P. H. Heckmann, Z. Phys. D: Atoms, Molecules and Clusters, **21**(1991), 309.

[5] R. K. Janev and H. Winter, Physics Reports, **117**(1985), 265.

A COMPARISON OF EMISSION CROSS SECTIONS IN COLLISIONS BETWEEN N_2^+ -Ne AND N^+ -Ne

LI DA-WAN PAN GUANG-YAN YANG FENG

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

(Received 20 April 1995)

ABSTRACT

The excited states produced in collisions of N_2^+ and N^+ with Ne have been studied by using emission spectroscopy. The emission spectra show that there are four processes of the excitation in these collision systems, namely: (1) Direct excitation of target; (2) Direct excitation of atomic projectile; (3) Dissociative excitation of molecular ion; (4) Charge exchange excitation. The emission cross sections for each spectral line are calculated. A comparison of emission cross sections in collisions between N_2^+ -Ne and N^+ -Ne is made. Some differences are found and the primary results have been discussed qualitatively.

PACC: 3450