

Ne⁺ 离子与 Li 原子碰撞过程中 激发态的研究*

于德洪¹⁾ 潘广炎 雷子明 杨 锋 刘家瑞 孙 湘

中国科学院物理研究所, 北京, 100080

1989年8月29日收到

本文通过观测 Ne⁺ 离子与 Li 原子碰撞中的发射谱, 对碰撞中的电子俘获和靶激发过程进行了研究。在可见光范围给出了所观察到的各条谱线的发射截面及相应上能级的激发截面。对电子俘获过程与能量亏损和靶原子电离势的关系进行了讨论。Ne⁺ 离子能量范围为 20—150keV。

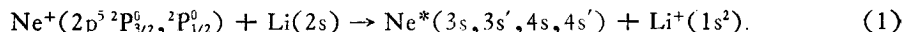
PACC: 3470

一、引 言

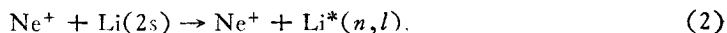
离子与原子碰撞过程中, 在低能和中能范围内, 主要的过程有电子俘获和靶激发过程。前者是碰撞离子从靶原子俘获一个电子而处于激发态, 然后退激发发光。后者是靶原子受离子碰撞而处于激发态, 然后退激发发光。通过对碰撞过程中所发光谱进行绝对测量, 就可以研究这些激发过程。

本文在研究了 Ne⁺ 离子与 He, Ar 原子碰撞过程的基础上, 对 Ne⁺ 和 Li 碰撞过程中的激发过程进行了研究。通过光学多道分析系统, 对所发光谱进行了绝对测量, 由此算出所观察到的所有谱线的发射截面和相应能级的激发截面。

到目前为止, 对 Ne⁺ 和 Li 碰撞体系的研究只限于低能范围 ($\leq 30\text{keV}$)。Rille 和 Winter 在 5—30keV 能量范围内^[1], 研究了下述电子俘获过程:



给出了四条真空紫外共振谱线 (74.4nm, 73.6nm, 63.0nm, 62.7nm) 的发射截面及其相应上能级的激发截面。Aumayr 等人^[2]在 2—20keV 能量范围内, 研究了下述靶激发过程:



给出了 Li(2p $\rightarrow$ 2s) 670.8nm 谱线的发射截面随离子能量的变化曲线, 并通过电荷态分析方法, 给出了总单电子俘获截面。本文在此基础上, 拓宽了 Ne⁺ 和 Li 体系的研究能量范围, 并且在可见光范围研究了电子俘获过程, 观察到了 NeI (3p $\rightarrow$ 3s) 640.2nm 谱线, 以使此体系电子俘获过程的研究更加趋于完整。对靶激发过程, 不仅观察到了 670.8nm 谱线, 还观察到了其它几条谱线。

* 国家自然科学基金和中国原子、分子物理数据研究联合体资助的课题。

1) 现在地址: 曲阜师范大学激光研究所。

二、实验装置

实验装置主要由 J59-200 加速器,真空碰撞靶室,Li 原子束源和 TN1710 光学多道分析系统组成. 详细描述见文献[3]. 来自加速器的 Ne^+ 离子,被加速到所需能量,在靶室中与 Li 原子束交叉碰撞,所发光谱由光学多道分析系统记录并储存. 观察方向与离子束方向成 90° .

三、实验结果

图 1 为 Ne^+ 和 Li 碰撞过程中的发射谱. 由图 1 得知,由于电子俘获而产生的谱线为 $\text{NeI } 640.2\text{nm}$, 对应跃迁为 $3p\left[2\frac{1}{2}\right]_2 \rightarrow 3s\left[1\frac{1}{2}\right]_2$. 由于靶激发过程所发 LiI 谱线列于表 1.

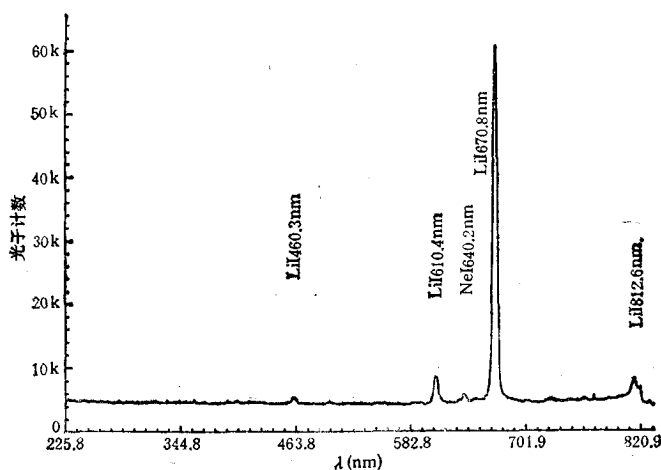


图 1 Ne^+ 和 Li 碰撞中的发射谱 Ne^+ 离子能量为 50keV

表 1 Ne^+ 和 Li 碰撞中的 LiI 发射谱线

跃 迁	$2p^2P^o \rightarrow 2s^2S$	$3d^2D \rightarrow 2p^2P^o$	$4d^2D \rightarrow 2p^2P^o$	$3s^2S \rightarrow 2p^2P^o$
$\lambda(\text{nm})$	670.8	610.4	460.3	812.6

发射截面由下式决定^[3]:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij0} \frac{qQ_0K_0(\lambda_0)S(\lambda)}{q_0QK(\lambda)S_0(\lambda_0)}, \quad (3)$$

式中 σ_{ij0} 为归一化截面,采用 Aumayr 等人^[4]关于 He^+ 和 Li 碰撞体系在 20keV 时的 LiI 670.8nm 谱线的发射截面, $\sigma_{ij0} = 3.53 \times 10^{-15}\text{cm}^2$; q, q_0 分别为 He^+ 和 Li, Ne^+ 和 Li 碰撞体系的离子电荷态; Q_0, Q 和 $S_0(\lambda_0), S(\lambda)$ 分别为与上述两体系对应的总积分电荷量和总积分光子数(扣除本底); $K_0(\lambda_0)$ 和 $K(\lambda)$ 分别为测量系统在 λ_0, λ 两波长处的量子效率.

$\text{Li}(2p)$ 激发截面由下列两式算得:

$$\sigma_{ex}(2p) = \sigma_{em}(2p \rightarrow 2s) - \sigma_{em}(3d \rightarrow 2p) - \sigma_{em}(4d \rightarrow 2p) - \sigma_{em}(3s \rightarrow 2p) \quad (4)$$

和 $\sigma'_{ex}(2p) = \sigma_{em}(2p \rightarrow 2s) - 2.66\sigma_{em}(3d \rightarrow 2p). \quad (5)$

(5)式引自文献[5],其中考虑了级联效应的上限. 对其它能级, 由于级联贡献可以忽略, 其激发截面近似等于相应的发射截面.

LiI 谱线发射截面和 $\text{Li}(2p)$ 激发截面列于表 2. 表 3 为 NeI 640.2nm 谱线的发射截面.

表 2 LiI 谱线发射截面和 $\text{Li}(2p)$ 激发截面(单位为 $\times 10^{-16} \text{cm}^2$)

$E(\text{keV})$	670.8	610.4	812.6	460.3	$\sigma_{ex}(2p)$	$\sigma'_{ex}(2p)$
20	28.2	2.97	0.86	0.92	23.4	20.3
30	33.6	2.61	1.09	0.44	29.4	26.6
40	41.5	2.82	1.58	0.48	36.6	34.0
50	51.2	2.84	2.07	0.52	46.3	43.7
60	41.0	2.03	1.67	0.43	36.9	35.7
70	34.6	1.55	1.48	0.31	31.2	30.5
80	41.8	1.85	1.71	0.35	37.8	36.9
90	45.1	1.77	1.67	0.35	41.3	40.4
100	42.7	1.82	1.56	0.35	39.0	37.9
110	47.3	2.05	1.56	0.39	43.4	41.9
120	44.5	1.99	1.41	0.37	40.7	39.2
130	60.4	2.51	2.02	0.40	55.5	53.7
140	50.3	2.18	1.54	0.40	46.1	44.4
150	53.0	2.42	1.66	0.44	48.4	46.5

表 3 NeI 640.2nm 谱线发射截面(单位为 $\times 10^{-17} \text{cm}^2$)

$E(\text{keV})$	σ_{em}	$E(\text{keV})$	σ_{em}
20	8.88	90	8.56
30	8.75	100	8.01
40	10.2	110	8.04
50	11.5	120	7.59
60	9.24	130	9.61
70	7.73	140	7.83
80	8.39	150	7.03

四、讨 论

LiI 670.8nm 谱线发射截面及由(5)式算得的 $\text{Li}(2p)$ 激发截面和 NeI 640.2nm 谱线发射截面随能量的变化关系示于图 2. 图 2 中 NeI 640.2nm 谱线发射截面是实际数值的 10 倍. 图 2 中表明, 在可见光范围, 主要的过程是靶激发, 其发射截面比电子俘获过程大两个数量级. 在靶激发中, $\text{Li}(2p)$ 是主要的激发能级, 其截面比其它能级要高 1—

2 个数量级,这一点从图 1 的发射谱中也可以明显地看出.

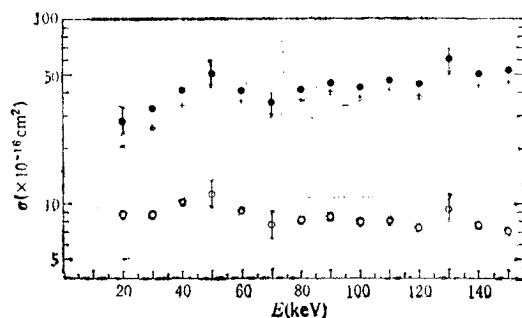


图 2 发射截面随能量的变化曲线

● 为 LiI 670.8nm 谱线发射截面; + 为 Li(2p) 激发截面; ○ 为 NeI 640.2nm 谱线发射截面

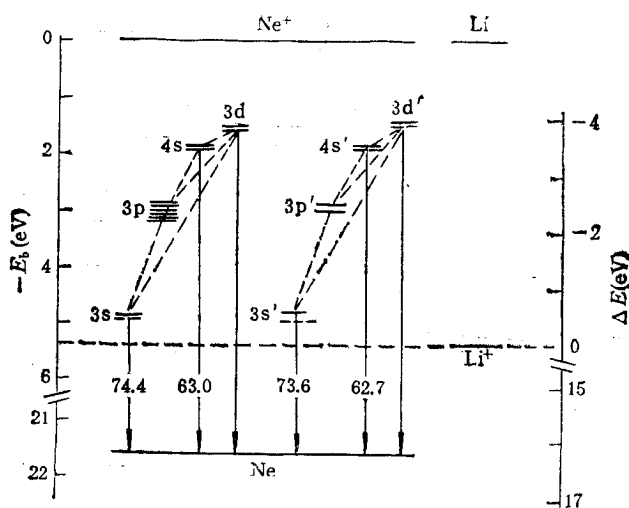


图 3 Ne^+ 和 Li 碰撞过程中的单电子俘获能级图

实线和虚线分别表示 VUV 和可见/红外发射谱线

图 3 为引自文献[1]的关于 Ne^+ 和 Li 碰撞过程中单电子俘获的能级图. 图 3 中也给出了各能级对应的能量亏损 ΔE . 在 Ne^+ 和 Li 碰撞过程中所形成的各种 $(\text{NeLi})^+$ 准分子电子态可由相应的势能曲线表示, 这些势能曲线在比较大的核间距 R 处基本上是平行的^[1]. 所以, 根据 Demkov^[6] 和 Olson^[7] 的理论, 电子将主要被俘获到相应于 $|\Delta E|$ 值较小的 NeI 态. 由图 3 看出, $|\Delta E|$ 值最小的为 $3s$ 和 $3s'$, 其次为 $3p$ 和 $3p'$, 再其次为 $4s$ 和 $4s'$. $3s$, $3s'$, 和 $4s$, $4s'$ 对应的谱线在真空紫外^[7]. 其截面数量级分别为 10^{-15} 和 10^{-18}cm^2 . 本文观察到了相应于 $3p \rightarrow 3s$ 跃迁的 640.2nm 谱线, 其发射截面数量级为 10^{-17}cm^2 . 介于 $3s, 3s'$ 和 $4s, 4s'$ 的截面之间. 与能量亏损的顺序是一致的. 所以, 实验结果与 Demkov 及 Olson 的理论是相符的.

为比较电子俘获过程与靶原子电离势的关系, 将 Ne^+ 与 He , Ar , Li 三个碰撞体系的 NeI 640.2nm 谱线的发射截面列于表 4. Ne^+ 与 He , Ar 两体系的结果见文献[8,9].

表 4 三体系的 NeI 640.2nm 谱线发射截面 (10^{-19}cm^2)

$E(\text{keV})$	Ne^+ 和 He	Ne^+ 和 Ar	Ne^+ 和 Li
70	13.15	50.55	773
90	7.57	43.33	856
110	5.95	28.49	804
130	5.49	25.25	961
150	4.31	28.65	703

He 的电离电势为 24.56eV, Ar 的电离电势为 15.76eV, Li 的为 5.40eV^[10]。由表 4 看出, 对相同的人射离子能量, Ne^+ 和 Li 体系的 NeI 谱线发射截面比其它两体系的相应截面大得多, 而 Ne^+ 和 Ar 体系的截面又比 Ne^+ 和 He 体系的值大得多。这种差别来自三体系的靶原子电离电势的显著不同。靶原子电离电势越小, 其电子俘获截面越大。可见在此能量范围内, 体系的库仑势对电子俘获过程起着重要作用。

本文给出的发射截面总误差约为 $\pm 15\%$, 激发截面总误差约为 $\pm 20\%$ 。详细误差讨论见文献[3]。

- [1] E. Rille and H. Winter, *J. Phys. B*, **15**(1982), 3489.
- [2] F. Aumayr *et al.*, *Z. Phys. D*, **6** (1987), 145.
- [3] 雷子明等, 物理学报, **38**(1989), 1515.
- [4] F. Aumayr *et al.*, *J. Phys. B*, **18**(1985), L741.
- [5] K. Kadota *et al.*, *J. Phys. B*, **15**(1982), 3297.
- [6] Yu. Demkov, *Sov. Phys. -JETP*, **18**(1964), 138.
- [7] R. E. Olson, *Phys. Rev.*, **A6**(1972), 1822.
- [8] 潘广炎等, 原子与分子物理学报, **4**(1987), 359.
- [9] 雷子明等, 原子与分子物理学报, **4**(1987), 367.
- [10] [日]饭田修一等编, 张质贤等译, 物理学常用数表, 科学出版社, (1979).

A STUDY OF EXCITED STATES IN COLLISIONS OF Ne^+ IONS WITH LI ATOM

YU DE-HONG PAN GUANG-YAN LEI ZI-MING YANG FENG LIU JIA-RUI SUN XIANG

Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080

(Received 29 August 1989)

ABSTRACT

We have studied the electron capture and the target excitation in collisions of Ne^+ ions with Li atom by observing the emission spectrum. The emission cross sections of the observed lines and the excitation cross sections of the corresponding states are obtained in the visible region. The relations of the electron capture processes with the energy defect and the ionized potential of the target atom are discussed. The energy range of the Ne^+ ions is 20—150 keV.

PACC: 3470