

He⁺ 和 He²⁺ 离子与碱金属原子 Na 碰撞中靶激发过程的实验研究*

于德洪¹⁾ 刘家瑞 雷子明 杨 锋 潘广炎

汪端伟²⁾ 孙 湘

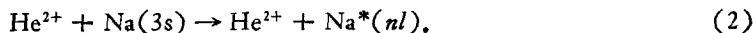
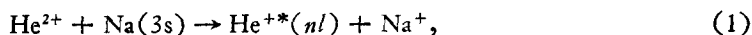
中国科学院物理研究所

1988 年 12 月 24 日收到

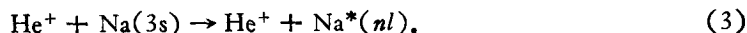
本文通过光学方法,在 $q \times (20-140)$ keV 能量范围内,研究了 He⁺ 和 He²⁺ 离子与碱金属原子 Na 碰撞中的靶激发过程. 通过光学多道分析系统 (OMA), 对 He⁺ 与 Na 碰撞过程, 观察到 $\text{NaI } 589.0 + 589.6 \text{ nm}(3p \rightarrow 3s)$, $\text{NaI } 818.3 \text{ nm}(3d \rightarrow 3p)$ 和 $\text{NaI } 568.8 \text{ nm}(4d \rightarrow 3p)$ 等谱线. 对 He²⁺ 与 Na 碰撞过程, 只观察到 $\text{NaI } 589.0 + 589.6 \text{ nm}$ 谱线. 计算了所有观察到的谱线的发射截面和 Na(3p) 的激发截面. 实验结果表明入射离子的库仑势对靶激发过程的作用非常明显. 对 He²⁺ 与 Na 碰撞过程, $\text{NaI } D_{1,2}$ 谱线的发射截面与仅有的 Na(3p) 激发截面的理论值在误差范围内符合得很好.

一、引 言

到目前为止,对 He⁺, He²⁺ 与 Na 碰撞过程,只有为数不多的研究. 最近 Aumayr 等人^[1]在 2—20keV 能量范围内研究了 He⁺ 与 Na 碰撞过程,给出了单电子俘获截面和 Na(3p → 3s) 的发射截面. 另外, Nagata 等人^[2]和 DuBois^[3] 分别在低于 5keV 和 100keV 的能量范围内,对单电子俘获过程进行了研究. 对 He²⁺ 与 Na 碰撞过程, Shingal 等人^[4]最近应用 AO 理论,在 10.0—270.0keV 能量范围内研究了下述过程:



结果表明,在能量低于 50keV 范围内,电子主要地被俘获到 He⁺ 离子的 $n = 3$ 的能级上,因而他们提出,在合适的条件下,He²⁺ 与 Na 碰撞过程可以有效地用于产生 256 Å (Lyman-β) 和 304 Å (Lyman-α) 短波长激光. 据我们所知,对(1)和(2)式的过程还没有实验结果存在. 本文从实验上研究了靶激发过程(2)式和下式:



给出观察到的所有谱线的发射截面和 Na(3p) 激发截面,并进行了讨论,以及与理论值的比较.

* 国家自然科学基金资助的课题.

1) 现在地址: 曲阜师范大学激光研究所.

2) 现在地址: 北京师范大学物理系.

二、实验结果

实验装置的详细描述见文献[6].

在 He^+ 与 Na 碰撞过程中,观察到的 NaI 谱线列于表 1. 对 He^{2+} 与 Na 碰撞过程,只观察到 $\text{NaI}(3p \rightarrow 3s)$ 谱线,这是由于实验中 He^{2+} 离子束流比较小的缘故.

表 1 NaI 发射谱线

跃 迁	$3p^2P_{3/2, 1/2}^0 \rightarrow 3s^2S_{1/2}$	$3d^2D_{3/2} \rightarrow 3p^2P_{1/2}^0$	$4d^2D_{3/2} \rightarrow 3p^2P_{1/2}^0$
$\lambda(\text{nm})$	589.0+589.6	818.3	568.8

绝对发射截面是通过 H^+ 与 Na 和 He^+ , He^{2+} 与 Na 碰撞过程中产生的光信号的比较而确定的. 其中应用了 Aumayr 等人关于 H^+ 与 Na 碰撞过程中,离子能量为 20keV 时的 $\text{NaI} 589.0 + 589.6\text{nm}$ 谱线的绝对发射截面数据^[5]. 截面确定的详细描述见文献[6].

$\text{Na}(3p)$ 激发截面由下式得到:

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

发射截面总误差在 $\pm 26 - \pm 27\%$. 主要源于归一发射截面的误差 $\pm 25\%$ ^[5]. $\text{Na}(3p)$ 激发截面的总误差约为 $\pm 35\%$. 详细误差讨论见文献[6].

He^+ 与 Na 碰撞过程的 NaI 谱线的发射截面和 $\text{Na}(3p)$ 激发截面见表 2. 对 He^{2+} 与 Na 碰撞过程, $\text{NaID}_{1,2}$ 线的发射截面和 Shingai 等人^[4] 的 $\text{Na}(3p)$ 激发截面的理论结果列于表 3.

表 2 He^+ 与 Na 碰撞过程中 NaI 谱线发射截面和 $\text{Na}(3p)$ 激发截面
(单位为 10^{-16}cm^2)

E(keV)	589.6 (nm)	818.3 (nm)	568.8 (nm)	$\sigma_{\text{ex}}(3p)$
20	32.4	7.05	1.74	23.6
30	37.3	8.38	2.05	26.9
40	36.7	8.35	2.30	26.1
50	48.9	9.69	2.66	36.6
60	51.3	8.22	2.05	41.0
70	42.8	5.94	1.77	35.1
80	46.3	6.05	1.71	38.6
90	46.1	5.99	1.51	38.6
100	46.6	5.58	1.53	39.5
110	51.7	5.77	1.47	44.5
120	49.3	5.70	1.40	42.2
130	47.1	5.17	1.31	40.6
140	43.9	4.88	1.23	37.8

表 3 He²⁺ 与 Na 碰撞过程中 NaID_{1,2} 谱线发射截面和 Na(3p) 激发截面
(单位为 10⁻¹⁶cm²)

E(keV)	σ_{em} (实验值)	$\sigma_{ex}(3p)$ (理论值)
53.33		66.26
60	80.56	
66.67		71.20
80	79.72	73.22
100	78.70	
106.67		80.84
120	84.38	
140	79.75	
160	75.88	89.25
180	80.64	
200	65.89	
213.33		84.60
220	83.20	
240	74.81	
260	67.46	
266.67		80.98
280	63.15	

三、讨 论

在 He⁺ 与 Na 碰撞过程中, NaID_{1,2} 谱线的发射截面和 Na(3p) 激发截面随入射离子能量的变化关系见图 1.

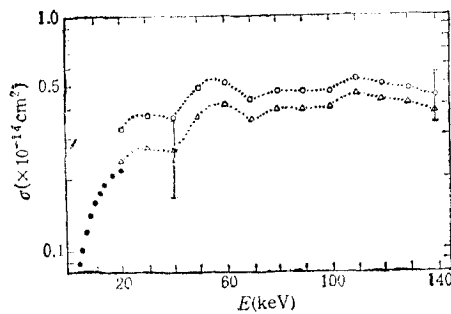


图 1 He⁺ 与 Na 碰撞过程中截面随能量的变化曲线
○ 为 NaI 589.0 + 589.6nm 谱线的发射截面;
△ 为 Na(3p) 激发截面; ● 为 Aumayr 等人的 NaID_{1,2} 谱线的发射截面

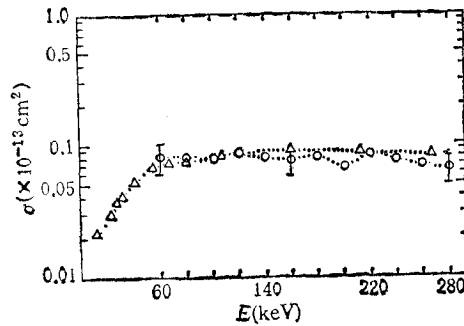


图 2 He²⁺ 与 Na 碰撞过程中截面随能量的变化关系
○ 为本实验 NaID_{1,2} 谱线发射截面;
△ 为文献[4]的 Na(3p) 激发截面理论值

图 1 中的低能结果 (< 20keV) 是 Aumayr 等人的 NaID_{1,2} 谱线的发射截面数据^[1]. 由图 1 中看出, 本文结果在总的变化趋势上能与他们的结果比较好地衔接.

由于仪器分辨率的限制, NaI589.0 + 589.6nm 谱线可能包含 HeI 587.6nm 谱线. 对于 He²⁺ 与 Na 碰撞过程, 图 2 给出本文 NaID_{1,2} 谱线发射截面和 Shingal 等人

的 Na(3p) 激发截面理论值的比较。在低于 160keV 的能量范围内,本文结果与理论值符合很好。能量高于 160keV 时,实验结果稍微地变小,但与理论值的偏离仍在实验误差范围内。

考虑到更高的 NaI 能级对 NaID_{1,2} 线发射截面的级联贡献, Na(3p) 激发截面将比理论值小,尤其是在能量较高时是这样。这种偏离可以解释如下: 根据 DuBois^[7] 的实验结果,随着能量的增加,其它通道如: 直接电离、俘获伴随电离等,变得重要起来,于是靶激发过程变弱。理论计算没有考虑这种效应,这可能是本文实验结果在高分区稍有偏离理论值的主要原因。

由表 2 和表 3 的比较看出,对 NaI589.0 + 589.6nm 谱线的发射截面而言,对相同的离子速度, He²⁺ 与 Na 碰撞过程的值要比 He⁺ 与 Na 碰撞过程的相应值大得多。两碰撞过程的差别在于碰撞离子的电荷态不同,亦即碰撞离子的库仑势不同。所以在本实验能量范围内,碰撞离子的库仑势对靶激发过程的作用非常显著。

四、结 论

在 $q \times (20-140)$ keV 能量范围内,对 He⁺, He²⁺ 与 Na 碰撞中靶激发过程进行了实验研究。对 He⁺ 与 Na 碰撞过程,本文结果在总的变化趋势上与 Aumayr 等人的低能结果能够比较好的衔接。对 He²⁺ 与 Na 碰撞过程,本文 NaID_{1,2} 谱线的发射截面与 Shingal 等人的 Na(3p) 激发截面的理论值在实验误差范围内相符合。从 He⁺ 与 Na 和 He²⁺ 与 Na 两碰撞过程的比较得到: 在本实验能量范围内,碰撞离子库仑势对靶激发过程起着显著的作用。

对 He²⁺ 与 Na 碰撞过程,将光谱范围扩展到真空紫外,进一步地研究电子俘获过程,对验证理论结果和为制造短波长激光器提供依据,都是十分有意义的。

[1] F. Aumayr *et al.*, *Z. Phys. D.*, **6**(1987), 145.

[2] T. Nagata *et al.*, *Phys. Lett.*, **81A**(1981), 265.

[3] R. D. DuBois *et al.*, *Phys. Rev.*, **A31**(1985), 3603.

[4] R. Shingal *et al.*, *J. Phys. B*, **20**(1987), 793.

[5] F. Aumayr *et al.*, *J. Phys. B*, **20**(1987), 2025.

[6] 雷子明等,物理学报, **38**(1989),第 9 期。

[7] R. D. DuBois, *Phys. Rev.*, **A34**(1986), 2738.

TARGET ATOM EXCITATIONS IN COLLISIONS OF He^+ AND He^{2+} WITH Na AT $q \times (20-140)$ keV

YU DE-HONG LIU JIA-RUI LEI ZI-MING YANG FENG

PAN GUANG-YAN WANG DUAN-WEI SUN XIANG

Institute of Physics, Academia Sinica

(Received 24 December 1988)

ABSTRACT

We have studied the target atom excitations in the collisions of He^+ and He^{2+} with Na in the energy range of $q \times (20-140)$ keV by optical measurements. The NaI 589.0 + 589.6 nm ($3p \rightarrow 3s$), NaI 818.3 nm ($3d \rightarrow 3p$) and NaI 568.8 nm ($4d \rightarrow 3p$) lines for $\text{He}^+ + \text{Na}$ collision system have been observed by an OMA system. In $\text{He}^{2+} + \text{Na}$ collision system, only NaI 589.0 + 589.6 nm line was observed. The emission cross sections of the NaI lines observed and Na ($3p$) excitation cross sections are calculated. An obvious effect of coulomb potential of projectile ions on the target excitation has been observed.