

He^{2+} 离子和 H_2, O_2 分子碰撞过程中 电子俘获和靶激发的发射截面*

潘广炎 雷子明 杨 锋 刘家瑞 于德洪 孙 湘

中国科学院物理研究所

1988 年 9 月 5 日收到

实验结果表明: 在 He^{2+} 和 H_2, O_2 碰撞过程中存在着双电子俘获而产生激发态的过程, 同时也存在着单电子俘获而产生激发态的过程. 在靶 H_2, O_2 直接激发过程中, 测量到了巴耳末系 $\text{H}_\alpha, \text{H}_\beta, \text{H}_\gamma$ 和 OI 的发射谱. 本文给出随入射离子速度变化的 HeI, HeII 和 $\text{H}_\alpha, \text{H}_\beta, \text{H}_\gamma, \text{OI}$ 谱线的发射截面.

一、引 言

在原子、分子物理中, 离子和分子碰撞物理是一个非常重要的领域, 因此, 许多物理学家对它产生了极大的兴趣^[1-7], 尤其是高电荷态的离子和分子碰撞物理, 更引人注意^[8-11]. Ciric 等人^[12]选择的 $\text{He}^{2+} + \text{H}$ 和 $\text{He}^{2+} + \text{H}_2$ 碰撞实验, 主要是对单电子俘获过程中的真空紫外辐射 (波长范围为 10—200nm) 进行了测量, 在靶原子氢和靶分子氢的情况下, 对测得的两个碰撞过程的发射截面、激发截面, 以及俘获截面进行了比较. Dijkkamp 等人^[13]进行的 $\text{C}^{4+}, \text{N}^{5+}, \text{O}^{6+}$ 离子分别和 $\text{H}, \text{H}_2, \text{He}$ 碰撞的实验, 主要也是对单电子俘获激发过程中的真空紫外辐射进行了测量, 获得大量的绝对截面数据. Yousif 等人^[14]完成了 $\text{H}_m^+(m=1, 2, 3)$ 分别和 $\text{O}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}$ 碰撞实验, 获得在碰撞过程中巴耳末 H_α 发射截面的大量数据. 最近, 我们利用光学多道分析系统 (OMA), 对 He^{2+} 离子和 H_2, O_2 碰撞过程中所产生的激发态进行了实验研究, He^{2+} 离子的实验室能量范围为 140—340keV, OMA 所覆盖的波长范围为 200—800 nm, 实验误差为 10—15%.

二、实 验 结 果

实验装置的详细描述见文献 [7], 实验用 TN-1710 光学多道分析系统对 He^{2+} 和 H_2, O_2 碰撞过程中的激发态进行了测量, 通过实验得到的 $\text{HeI}, \text{HeII}, \text{H}_\alpha, \text{H}_\beta, \text{H}_\gamma, \text{OI}$ 发射光谱表示在图 1 和图 2 中.

图 1 给出在 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中所产生的 HeI, HeII 谱线和巴耳末系 $\text{H}_\alpha, \text{H}_\beta, \text{H}_\gamma$ 谱线分别列于表 1 至表 3.

* 国家自然科学基金资助的课题.

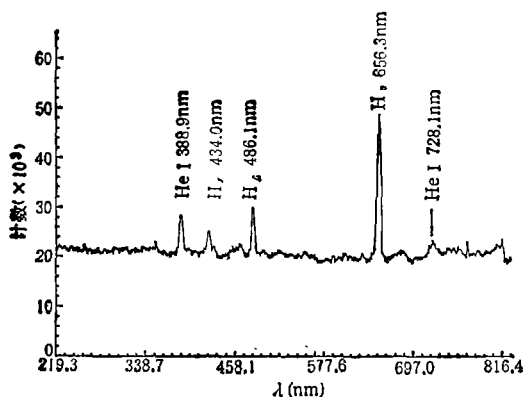


图1 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中 HeI, HeII, H_α , H_β , H_γ 发射光谱 入射离子能量为 220keV

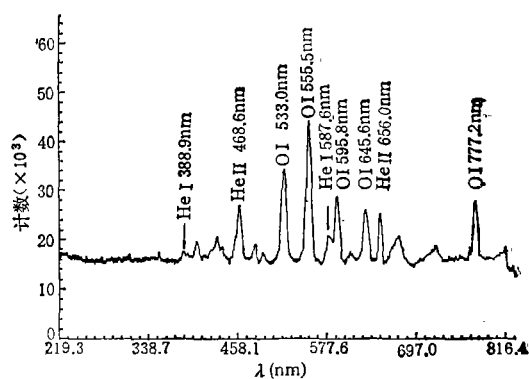


图2 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中 HeI, HeII, OI 发射光谱 入射离子能量为 280keV

表1 HeI 谱线

跃 迁	波长 (nm)
$3^1\text{S} \rightarrow 2^1\text{P}$	728.1
$3^3\text{P} \rightarrow 2^3\text{S}$	388.9

表2 HeII 谱线

跃 迁	波长 (nm)
$6g^2\text{G}_{9/2,7/2} \rightarrow 4f^2\text{F}_{7/2,5/2}^0$	656.0

表1中所列的谱线表明: 在 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中存在着双电子俘获而产生激发态的过程,即

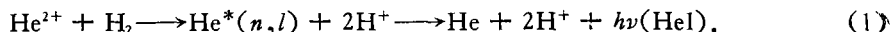


表2中所列的谱线表明: 根据一般规律,在 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中应该存在着单电子俘获而产生激发态的过程,即

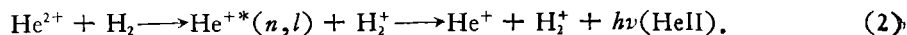


表3中所列的谱线表明: 在 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中存在着直接激发的过程,即

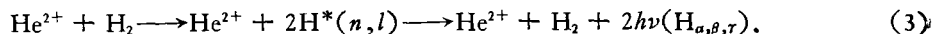


图2给出在 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中所产生的 HeI, HeII 谱线和 OI 谱线分别列于表4至表6.

表4中所列的谱线表明: 在 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中也存在着双电子俘获而产生激发态的过程,即

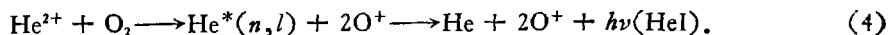


表5中所列的谱线表明: 在 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中也存在着单电子俘获而产生激发态的过程,即

表 3 巴耳末系谱线

跃 迁	波长 (nm)
$3^2D \rightarrow 2^2P^0$	656.3
$4^2D \rightarrow 2^2P^0$	486.1
$5^2D \rightarrow 2^2P^0$	434.0

表 4 HeI 谱线

跃 迁	波长 (nm)
$3^3P \rightarrow 2^3S$	388.9
$3^3D \rightarrow 2^3P$	587.6

$$\text{He}^{2+} + \text{O}_2 \rightarrow \text{He}^{+*}(n, l) + \text{O}_2^+ \rightarrow \text{He}^+ + \text{O}_2^+ + h\nu(\text{HeII}). \quad (5)$$

表 6 中所列的谱线表明: 在 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中也存在着直接激发的过程, 即

$$\text{He}^{2+} + \text{O}_2 \rightarrow \text{He}^{2+} + 2\text{O}^*(n, l) \rightarrow \text{He}^{2+} + \text{O}_2 + 2h\nu(\text{OI}). \quad (6)$$

表 5 HeII 谱线

跃 迁	波长 (nm)
$4f^2F_{7/2,5/2}^0 \rightarrow 3d^2D_{5/2,3/2}$	468.6
$6g^2G_{9/2,7/2}^0 \rightarrow 4f^2F_{7/2,5/2}^0$	656.0

根据发射截面公式^[7], 利用 OMA 测量得到的如图 1 和图 2 等大量的光谱图和数据, 就可以推演得到随入射离子能量而变化的各条谱线的发射截面。

表 6 OI 谱线

三 重 态		五 重 态	
跃 迁	波长 (nm)	跃 迁	波长 (nm)
$7s^3S_1^0 \rightarrow 3p^3P_2$	555.5	$5d^3D_{3,1,4}^0 \rightarrow 3p^3P_2$	533.1
$5d^3D_1^0 \rightarrow 3p^3P_0$	595.8	$5s^3S_1^0 \rightarrow 3p^3P_2$	645.6
		$3p^3P_3 \rightarrow 3s^3S_1^0$	777.2

表 7 和表 8 分别给出在 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中所产生 HeI 和 $\text{H}_{\alpha,\beta,\gamma}$ 谱线的发射截面, 单位为 $\sigma_{\text{Im}} (\times 10^{-19} \text{cm}^2)$ 。

表 9 和表 10 分别给出在 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中所产生的 HeI, HeII 和 OI 谱线的发射截面, 单位为 $\sigma_{\text{em}} (\times 10^{-19} \text{cm}^2)$ 。

表 7 在 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中 HeI 发射截面 [$\sigma_{\text{em}}(\times 10^{-19}\text{cm}^2)$]

$E(\text{keV})$	$3^3\text{P} \rightarrow 2^3\text{S}$ ($\lambda = 388.9\text{nm}$)	$3^1\text{S} \rightarrow 2^1\text{P}$ ($\lambda = 728.1\text{nm}$)
180	26.09	41.00
200	23.04	31.21
220	17.77	12.67
240	14.21	11.52
260	14.20	10.43
280	17.44	11.42
300	15.15	10.91
320	12.78	10.57
340	13.73	11.55

表 8 在 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中 $\text{H}_{\alpha, \beta, \gamma}$ 发射截面 [$\sigma_{\text{em}}(\times 10^{-19}\text{cm}^2)$]

$E(\text{keV})$	H_{α} ($\lambda = 656.3\text{nm}$)	H_{β} ($\lambda = 486.1\text{nm}$)	H_{γ} ($\lambda = 434.0\text{nm}$)
180	174.71	29.59	15.27
200	149.34	25.07	12.59
220	123.89	19.10	8.73
240	97.12	15.28	7.43
260	94.78	14.29	6.94
280	113.19	16.97	7.89
300	99.15	14.74	7.52
320	79.06	12.14	6.49
340	82.06	12.22	6.74

表 9 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中 HeI , HeII 发射截面 [$\sigma_{\text{em}}(\times 10^{-19}\text{cm}^2)$]

$E(\text{keV})$	HeI	HeII	
	$3^3\text{P} \rightarrow 2^3\text{S}$ ($\lambda = 388.9\text{nm}$)	$4f^2\text{F}_{8/2,7/2}^0 \rightarrow 3d^2\text{D}_{3/2,3/2}$ ($\lambda = 468.6\text{nm}$)	$6g^2\text{G}_{9/2,7/2} \rightarrow 4f^2\text{F}_{7/2,5/2}^0$ ($\lambda = 656.0\text{nm}$)
140	29.12	113.56	162.94
160	25.54	100.33	138.22
180	25.19	96.62	123.32
200	19.78	79.31	102.58
220	19.66	83.03	98.31
240	19.53	74.90	86.16
260	19.58	75.48	85.78
280	18.04	69.87	79.79
300	20.62	79.25	76.94
320	17.54	72.95	66.42
340	19.60	77.76	63.10

表 10 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中 OI 发射截面 [$\sigma_{\text{em}}(\times 10^{-19}\text{cm}^2)$]

$E(\text{keV})$	三重态		五重态		
	$7s^3S_1^0 \rightarrow 3p^3P_2$ ($\lambda = 555.5\text{nm}$)	$5d^3D_1^0 \rightarrow 3p^3P_0$ ($\lambda = 595.8\text{nm}$)	$5d^3D_{2,3,4}^0 \rightarrow 3p^3P_3$ ($\lambda = 533.1\text{nm}$)	$5s^3S_1^0 \rightarrow 3p^3P_3$ ($\lambda = 645.6\text{nm}$)	$3p^3P_3 \rightarrow 3s^3S_1^0$ ($\lambda = 777.2\text{nm}$)
140	329.25	141.32	182.39	207.95	443.51
160	277.91	116.84	154.61	172.29	381.80
180	275.86	117.76	155.02	172.46	361.09
200	221.91	93.38	123.62	138.10	293.34
220	233.59	97.80	131.97	146.29	312.34
240	219.12	93.08	125.78	139.20	280.29
260	212.47	91.98	116.67	138.69	269.96
280	210.78	88.82	119.50	134.47	266.00
300	234.71	99.73	130.56	150.79	298.88
320	204.15	85.53	114.09	128.48	248.93
340	206.39	90.07	121.18	132.27	252.26

三、讨 论

1. HeI 发射截面

在 He^{2+} 和 H_2 , O_2 碰撞过程中,测得的 HeI 发射光谱证实这两个碰撞过程都存在着双电子俘获而产生的激发态,然后退激发而发射 HeI 谱线。

图 3 表明 $3^3\text{P} \rightarrow 2^3\text{S}$, $3^3\text{S} \rightarrow 2^1\text{P}$ 的发射截面是随 He^{2+} 离子速度增加而减小的,而

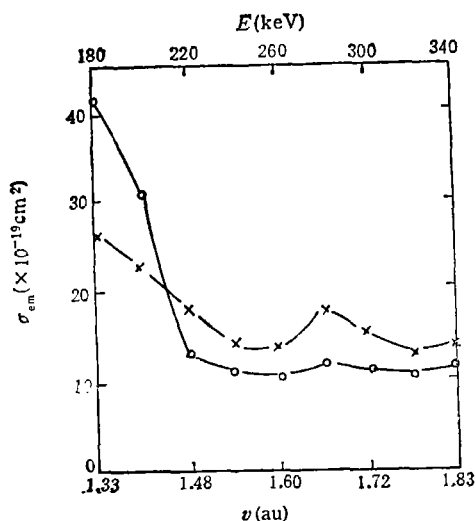


图 3 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中, HeI 发射截面随 He^{2+} 离子速度变化的曲线 \times 为 $3^3\text{P} \rightarrow 2^3\text{S}$, $\lambda = 388.9\text{nm}$; \circ 为 $3^3\text{S} \rightarrow 2^1\text{P}$, $\lambda = 728.1\text{nm}$

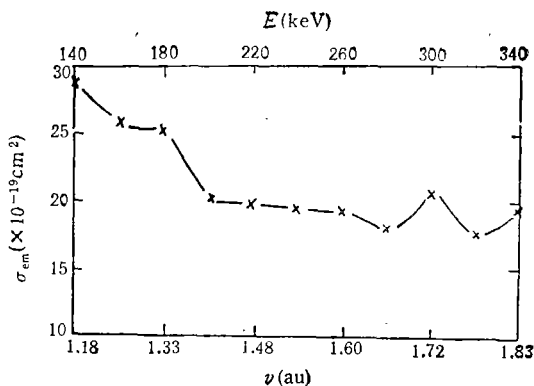


图 4 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中, HeI 发射截面随 He^{2+} 离子速度变化的曲线 \times 为 $3^3\text{P} \rightarrow 2^3\text{S}$, $\lambda = 388.9\text{nm}$

且后者比前者要减少得快些。

图 4 表明 $3^3\text{P} \rightarrow 2^3\text{S}$ 的发射截面也是随 He^{2+} 离子速度增加而减小的。

2. HeII 发射截面

在 He^{2+} 和 H_2, O_2 碰撞过程中, 测得 HeII 发射截面的事实证明这两个碰撞过程都存在着单电子俘获而产生的激发态, 然后退激发而发射 HeII 谱线。

图 5 表明 $6g^2\text{G}_{9/2,7/2} \rightarrow 4f^2\text{F}_{7/2,5/2}^0$ 和 $4f^2\text{F}_{7/2,5/2}^0 \rightarrow 3d^2\text{D}_{3/2,1/2}$ 的发射截面也是随 He^{2+} 离子速度增加而减小的。

在 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中, 由于 OMA 分辨率的限制, HeII $6g^2\text{G}_{9/2,7/2} \rightarrow 4f^2\text{F}_{7/2,5/2}^0$ ($\lambda = 656.0\text{nm}$) 和巴耳末系 H_α ($\lambda = 656.3\text{nm}$) 是不可能分辨出来, 因此在表 8 中后者应该包含有前者的发射截面, 这是造成 H_α 发射截面不精确的原因。

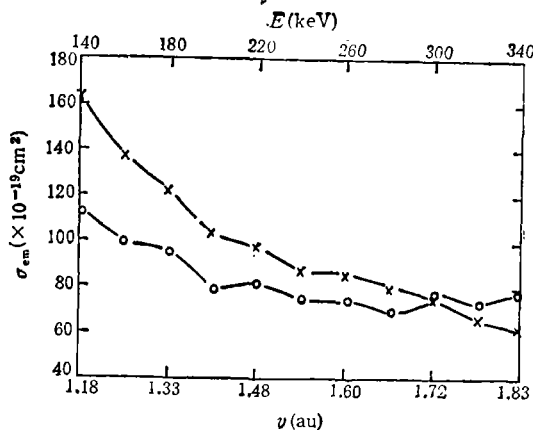


图 5 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中, HeII 发射截面随 He^{2+} 离子速度变化的曲线 \times 为 $6g^2\text{G}_{9/2,7/2} \rightarrow 4f^2\text{F}_{7/2,5/2}^0$, $\lambda = 656.0\text{nm}$; \circ 为 $4f^2\text{F}_{7/2,5/2}^0 \rightarrow 3d^2\text{D}_{3/2,1/2}$, $\lambda = 468.6\text{nm}$

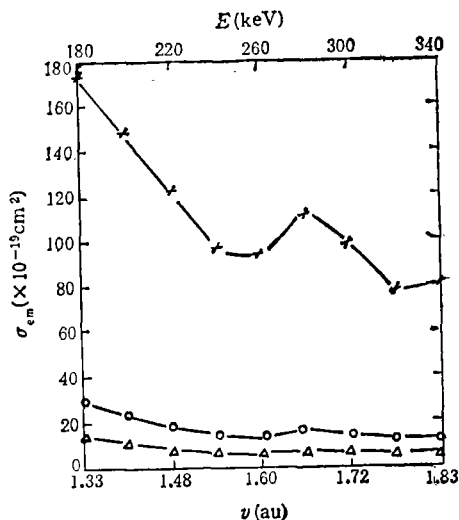


图 6 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中, $\text{H}_{\alpha, \beta, \gamma}$ 发射截面随 He^{2+} 离子速度变化曲线 \times 为 H_α $3^2\text{D} \rightarrow 2^2\text{P}^0$, $\lambda = 656.3\text{nm}$; \circ 为 H_β $4^2\text{D} \rightarrow 2^2\text{P}^0$, $\lambda = 486.1\text{nm}$; \triangle 为 H_γ $5^2\text{D} \rightarrow 2^2\text{P}^0$, $\lambda = 434.0\text{nm}$

3. $\text{H}_{\alpha, \beta, \gamma}$ 发射截面

在 He^{2+} 和 H_2 碰撞过程中, 巴耳末系 $\text{H}_\alpha, \text{H}_\beta, \text{H}_\gamma$ 的存在意味着靶直接激发过程的发生。也就是说, 在碰撞过程中靶的电子组态重新排列而使靶处于激发态, 然后退激发而发射巴耳末系 $\text{H}_\alpha, \text{H}_\beta, \text{H}_\gamma$ 谱线, 如图 6 所示。如果人们把 $\text{H}_\alpha, \text{H}_\beta, \text{H}_\gamma$ 谱线之间的发射截面作一比较, 就可知道其比率约为 $\text{H}_\alpha : \text{H}_\beta : \text{H}_\gamma = 12 : 2 : 1$, 而从文献 [8] 查表可知它们之间的跃迁几率比约为 $\text{H}_\alpha : \text{H}_\beta : \text{H}_\gamma = 6 : 2 : 1$, 这可能是由于 H_α 谱线的发射截面中含有 HeII $6g^2\text{G}_{9/2,7/2} \rightarrow 4f^2\text{F}_{7/2,5/2}^0$ 的发射截面的原因所致。

4. OI 发射截面

图 7 表示在 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中 OI 三重态、五重态的发射截面作为入射离子

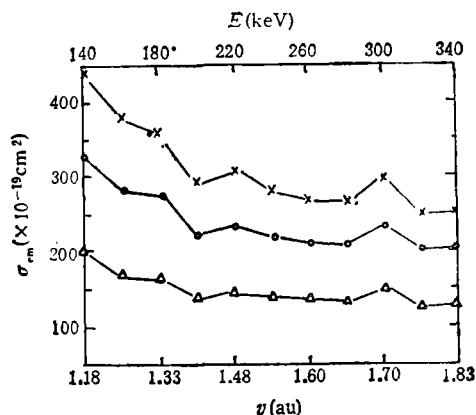


图7 \times 为 $3p^2P_{3/2} \rightarrow 3s^2S_{1/2}$, $\lambda=777.2\text{nm}$; \circ 为 $7s^3S_1^o \rightarrow 3p^2P_{3/2}$, $\lambda=555.5\text{nm}$; \triangle 为 $5s^2S_1^o \rightarrow 3p^2P_{3/2}$, $\lambda=645.6\text{nm}$
 He^{2+} 速度变化的函数。

OI 发射截面同样表明: 在 He^{2+} 和 O_2 碰撞过程中, 靶的电子组态重新排列而使靶处于激发态, 然后退激发而发射 OI 三重态和五重态谱线。

- [1] R. K. Janev and H. Winter, *Physics Reports*, 117(1985), 265.
- [2] The Physics of Highly Ionised Atoms, Proceeding of the International Conference on the Physics of Highly Ionised Atoms. Oxford, England, 2-15 July (1984); *Nucl. Instr. and Meth.*, B9, (4)(1985).
- [3] D. Dijkkamp *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 54(10) (1985), 1004.
- [4] Pan Guang-yan *et al.*, *Phys. Scripta*, T3(1983), 120.
- [5] Liu Jia-rui *et al.*, *Chinese Phys. Lett.*, 3(10) (1986), 457.
- [6] Pan Guang-yan *et al.*, *Chinese Phys. Lett.*, 5(2) (1988), 61.
- [7] 雷子明等, *物理学报*, 36(1987), 533.
- [8] W. L. Wiese, M. W. Smith and B. M. Glennon, *Atomic Transition Probabilities (NSRDS-NBS4) Vol. 1*, 2(1966).
- [9] D. Ciric *et al.*, *J. Phys. B*, 18(1985), 4745.
- [10] D. Dijkkamp *et al.*, *J. Phys. B*, 18(1985), 4763.
- [11] F. B. Yousif *et al.*, *J. Phys. B*, 19(1986), 217.

DOUBLE-ELECTRON CAPTURE INTO EXCITED STATES IN COLLISION BETWEEN He^{2+} AND H_2 , O_2

PAN GUANG-YAN LEI ZI-MING YANG FENG

LIU JIA-RUI YU DE-HONG SUN XIANG

Institute of Physics, Academia Sinica

(Received 5 September 1988)

ABSTRACT

Double-electron capture into excited states have been observed in collision between He^{2+} and H_2 , O_2 . One electron capture into excited states have also been observed in this collision system. In the channel of direct excitation of target H_2 , O_2 , the emission spectra of Balmer series H_α , H_β , H_γ , and OI have been measured. This article also give emission cross sections of HeI , HeII , and H_α , H_β , H_γ , OI dependence of that on the velocity of projectile.