

电子与原子 He, Ar 碰撞过程中 激发态的实验研究

于德洪 杨 锋 雷子明 潘广炎 刘家瑞

(中国科学院物理研究所)

1988 年 1 月 7 日收到

我们通过光学方法研究了电子与原子 He, Ar 碰撞过程中靶的激发过程. 利用光学多道分析系统 (OMA) 对发射光谱进行了测量, 给出了绝对发射截面数据. 入射电子的实验室能量范围为 200—500 eV.

一、引 言

关于电子与原子碰撞中的激发过程, 无论是理论上还是实验上, 都已经有了大量的研究^[1-3].

本文通过光学方法对 $e + \text{He}$, $e + \text{Ar}$ 两个碰撞体系进行了研究. 实验结果表明, 主要存在如下几个过程:



通过光学多道分析系统对上述几个过程的发射光谱进行了测量, 并算出了相应谱线的发射截面.

二、实验装置

实验装置(见图 1)分三部分: 第一部分为电子枪, 各电极电压配置情况见图 2, 电子束斑直径约为 5—7 mm, 能量范围为 70—500 eV, 束流为 1—50 μA . 第二部分为气体靶室, 本底真空度达 2×10^{-6} Torr, 充气后为 10^{-3} — 10^{-4} Torr. 第三部分为光学测量系统, 由 TN-1710 光学多道分析系统, 磁带机和绘图仪组成. 关于后两部分的详细描述见参考文献 [5]. 测量中光谱仪固定在相对于入射电子束成 90° 角方向上. 整个光学多道分析系统的量子效率用钨带灯标定.

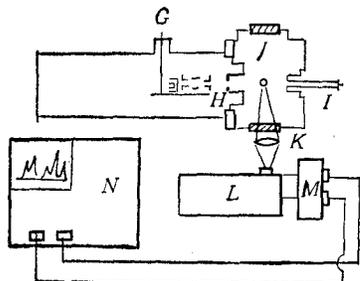


图1 实验装置示意图 G为可移动电子枪; H为准直器; I为法拉第筒; J为接真空紫外单色仪; K为透镜; L为光谱仪; M为硅光二极管阵列; N为多道分析器; L + M + N 为 TN-1710 光学多道分析系统 (OMA)

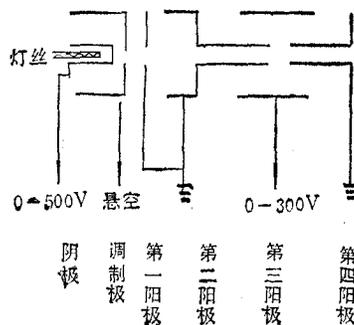


图2 电子枪结构示意图

三、实验结果

由光学多道分析系统测到的 $e + \text{He}$, $e + \text{Ar}$ 碰撞中 HeI, ArI, ArII 的发射光谱分别见图3和图4。由图3, 图4可知测得的 HeI, ArI, ArII 谱线分别列于表1, 表2和表3。

发射截面的定义为

$$\sigma_{em} = \frac{4\pi}{\omega} \frac{S(\lambda)}{N \cdot L \cdot K(\lambda) \cdot Q/e}, \quad (4)$$

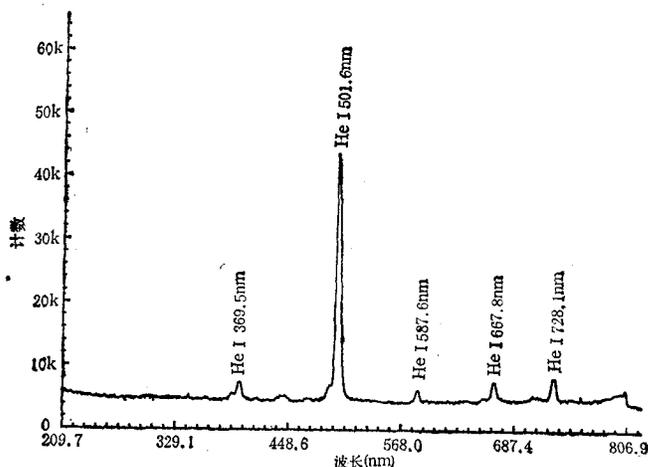


图3 电子与原子 He 碰撞中 HeI 单态、三重态发射光谱 入射电子能量为 200 eV

表1 HeI 单态、三重态谱线

跃 迁	波长(nm)	跃 迁	波长 (nm)
$3^1S \rightarrow 2^1P$	728.1	$4^1P \rightarrow 2^1S$	396.5
$3^1P \rightarrow 2^1S$	501.6	$3^3D \rightarrow 2^3P$	587.6
$3^1D \rightarrow 2^1P$	667.8		

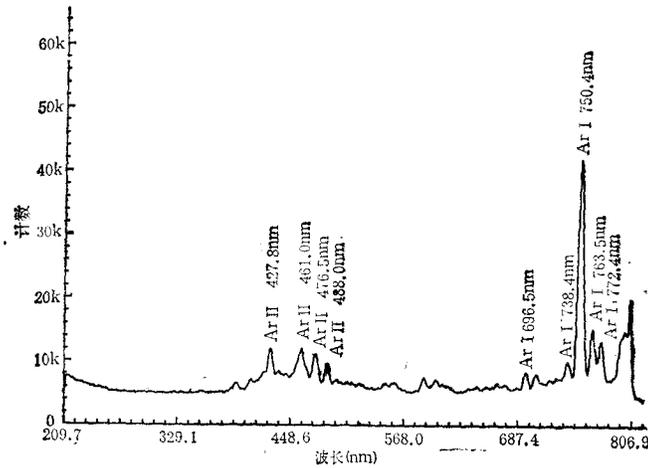


图 4 电子与原子 Ar 碰撞中 ArI, ArII 的发射光谱 入射电子能量为 300 eV

表 2 ArI 谱线

跃 迁	波长 (nm)	跃 迁	波长 (nm)
$4p'[3/2]_2 \rightarrow 4s[3/2]_2^0$	738.4	$4p'[1/2]_1 \rightarrow 4s[3/2]_2^0$	696.5
$4p'[1/2]_1 \rightarrow 4s'[1/2]_1^0$	750.4	$4p[3/2]_2 \rightarrow 4s[3/2]_2^0$	763.5
$4p'[1/2]_1 \rightarrow 4s'[1/2]_1^0$	772.4		

表 3 ArII 双重态谱线

跃 迁	波长 (nm)	跃 迁	波长 (nm)
$4p'^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4s'^2D_{3/2}$	427.8	$4p^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4s^2P_{1/2}$	476.5
$4p'^2F_{7/2}^0 \rightarrow 4s'^2D_{3/2}$	461.0	$4p^2D_{3/2}^0 \rightarrow 4s^2P_{3/2}$	488.0

式中 Q 为入射电子的总积分电荷量; e 为单位电荷量; Q/e 为入射电子数; N 为靶原子数; $K(\lambda)$ 为测量系统的量子效率; $S(\lambda)$ 为扣除本底的测量信号计数; $S(\lambda)/K(\lambda)$ 为发射某波长的光子数; L 为观察长度; ω 为光谱仪入射狭缝相对于光源的立体角。

由 (4) 式算得的 HeI 单态, 三重态和 ArI 及 ArII 双重态发射截面分别列于表 4, 表 5 和表 6。为比较起见, 也将文献 [4] 中的 HeI 728.1 nm 线的发射截面列于表 7。

表 4 HeI 单态、三重态谱线的发射截面 ($\times 10^{-20} \text{ cm}^2$)

$\lambda(\text{nm})$	728.1	501.6	667.8	396.5	587.6
$E_0(\text{eV})$					
200	32.30	85.09	16.98	5.67	6.78
250	22.36	64.96	11.40	3.91	5.50
300	23.09	74.95	12.57	4.80	7.10
350	14.22	43.16	7.14	2.64	3.31
400	12.33	37.02	6.35	2.28	3.11
450	7.79	24.06	4.37	1.49	1.92
500	5.96	17.39	3.28	1.02	1.59

表5 ArI 谱线的发射截面 ($\times 10^{-20} \text{cm}^2$)

$\lambda(\text{nm})$ $E_0(\text{eV})$	738.4	750.4	772.4	696.5	763.5
200	68.36	968.67	117.35	38.80	178.96
250	30.44	521.70	61.92	21.59	76.87
300	33.07	570.91	60.79	24.28	84.48
350	10.20	258.86	32.87	10.68	29.47
400	15.34	279.45	36.31	11.97	38.10
450	8.50	184.75	25.53	8.57	22.29
500	6.99	147.66	19.71	6.52	15.17

表6 ArII 双重态谱线的发射截面 ($\times 10^{-20} \text{cm}^2$)

$\lambda(\text{nm})$ $E_0(\text{eV})$	427.8	461.0	476.5	488.0
200	27.56	46.69	30.76	18.70
250	15.43	24.60	16.40	10.02
300	16.84	26.46	16.44	10.03
350	6.79	10.43	7.60	5.08
400	7.37	11.21	6.87	4.24
450	4.60	7.19	4.62	2.89
500	3.70	5.34	3.85	2.34

表7 文献[4]的 HeI 728.1 nm 线的发射截面 ($\times 10^{-20} \text{cm}^2$)

$E_0(\text{eV})$	50	100	500	1000	2000
σ_{em}	35.2	24.9	9.23	5.11	2.75

四、讨论与误差

1. HeI 发射谱

从 HeI 发射谱可知,在 $e + \text{He}$ 碰撞过程中,存在入射电子将靶原子外层电子从基态激发到高激发态的机制。

图5,图6分别给出了 HeI 单态和三重态各谱线的发射截面随入射电子能量的变化。从图中看出,总的趋势上各发射截面都是随入射电子能量的增高而下降的,这与其它文献的报道相符合^[4]。并且各谱线发射截面具有相似的能量依赖关系。在本文中的能量范围内,近似存在 $\sigma_{em} \sim e^{-AE_0}$ 的关系,其中 A 为某常数, E_0 为入射电子的能量。

由图5可知,对于 HeI 单态 3l 能级, P 态的发射截面远大于 S, D 态的,并且主量子数 $n = 3$ 的能级的发射截面要比 $n = 4$ 能级的发射截面大。

实验结果还表明,在 $e + \text{He}$ 碰撞中,在本实验的能量范围内,单态比三重态更容易激发。

2. ArI, ArII 发射谱

在 $e + \text{Ar}$ 碰撞过程中,除了存在入射电子将靶原子外层电子从基态激发到高激发

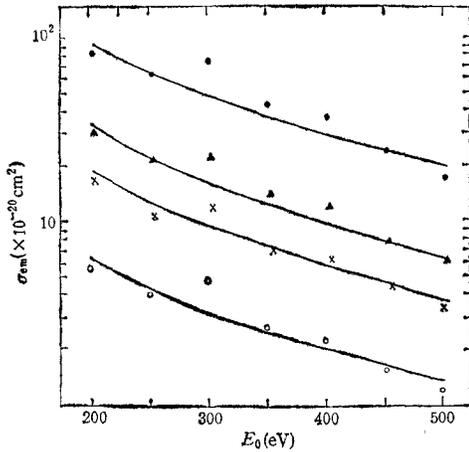


图5 电子与 He 原子碰撞中 HeI 单态发射截面随入射电子能量的变化曲线 ●为 $3^1P \rightarrow 2^1S$, $\lambda = 501.6$ nm; ×为 $3^1D \rightarrow 2^1P$, $\lambda = 667.8$ nm; ▲为 $3^1S \rightarrow 2^1P$, $\lambda = 728.1$ nm; ○为 $4^1P \rightarrow 2^1S$, $\lambda = 396.5$ nm

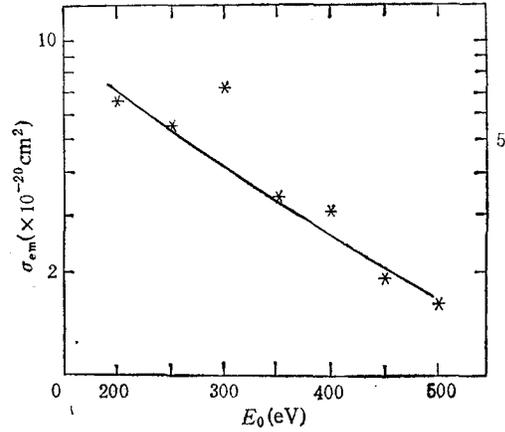


图6 电子与 He 原子碰撞中 HeI 三重态发射截面随入射电子能量的变化曲线 * 为 $3^3D \rightarrow 2^3P$, $\lambda = 587.6$ nm

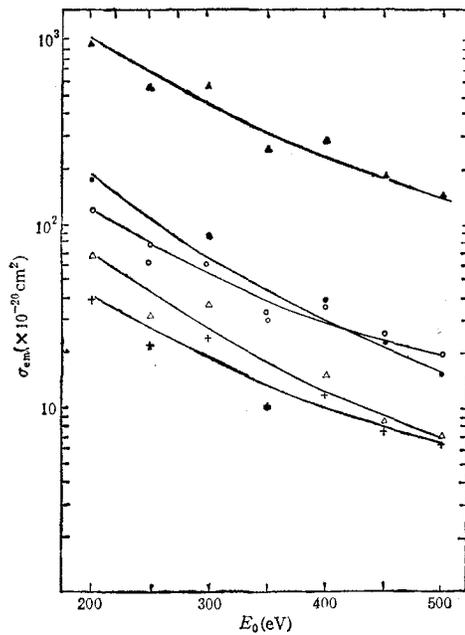


图7 电子与 Ar 碰撞中, ArI 谱线的发射截面随入射电子能量的变化曲线 △为 $4p'[3/2]_2 \rightarrow 4s[3/2]_2^o$; ○为 $4p'[1/2]_1 \rightarrow 4s'[1/2]_1^o$; ●为 $4p[3/2]_2 \rightarrow 4s[3/2]_2^o$; ▲为 $4p'[1/2]_0 \rightarrow 4s'[1/2]_0^o$; +为 $4p'[1/2]_1 \rightarrow 4s[3/2]_2^o$

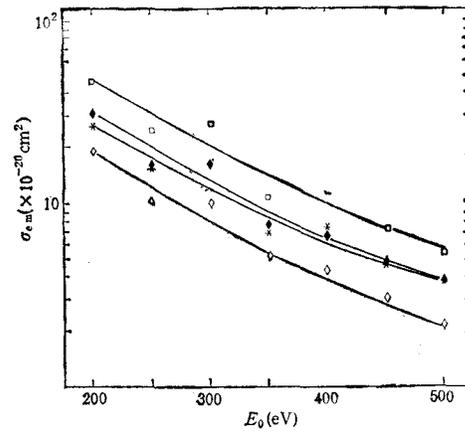


图8 电子与 Ar 碰撞中, ArII 双重态谱线的发射截面随入射电子能量的变化曲线 □为 $4p'^2 F_{7/2}^o \rightarrow 4s'^2 D_{5/2}$; * 为 $4p'^2 P_{3/2}^o \rightarrow 4s'^2 D_{3/2}$; ◆为 $4p'^2 P_{3/2}^o \rightarrow 4s'^2 P_{1/2}$; ◇为 $4p'^2 D_{3/2}^o \rightarrow 4s'^2 P_{3/2}$

态的作用机制外, 还存在入射电子将靶原子电离同时使其处于激发态的机制。并且从图7和图8比较看出, 前者比后者作用要强。

实验结果还表明, 对 $e + Ar$ 碰撞体系, 主要存在从基态 ($n = 3$) 激发到 $n = 4$ 的高激发态。

关于 ArI, ArII 双重态各谱线的发射截面随入射电子能量的变化关系, 与 HeI 各

谱线的相类似,见图 7 和图 8.

3. 两体系的比较

本实验显示了 $e + \text{He}$ 和 $e + \text{Ar}$ 两体系的不同,对于前者只存在靶原子本身的直接激发,而后者除此之外还存在靶离子的激发. 这可以从 He, Ar 电离电势的明显差别得到定性解释. He 的第一电离电势为 24.59 eV, 而 Ar 的只有 15.76 eV, 很显然, Ar 要比 He 容易电离得多,因而就容易产生 Ar^+ 的激发.

另一方面,两体系又有共同的地方,这就是都遵从 Wigner 电子自旋守恒法则 (electron-spin-conservation rule)^[6]. 此法则要求,在碰撞过程中,一对原子或分子的总电子自旋角动量应该是守恒的. 按照 Massey 和 Burhop 的描述^[7],此法则如下: 设两个离子、原子或分子,初态电子自旋量子数为 s_1 和 s_2 , 体系的初态总电子自旋角动量 S 为各个成员的电子自旋角动量的矢量和,总合成自旋量子数为

$$S = |\mathbf{S}| = (s_1 + s_2), \dots, |s_1 - s_2|.$$

假设在碰撞中,电子自旋和轨道角动量之间的耦合非常弱, Wigner 法则指出只有总电子自旋守恒的跃迁才是最可能发生的. 所以如果各成员的末态自旋量子数为 s_3 和 s_4 , 那么 $(s_3 + s_4), \dots, |s_3 - s_4|$ 其中之一必须包含在 $(s_1 + s_2), \dots, |s_1 - s_2|$ 之中.

将 Wigner 法则应用于我们的结果,发现所有 HeI 单态、三重态及 ArII 双重态谱线都严格遵守此法则,见表 8 和表 9. 表中分别给出了两个体系的相应激发过程的初态、末态电子自旋量子数的合成情况.

表 8 $e + \text{He}$ HeI 基态 $1s^2^1S$

单 态	初态	$s_1 = \frac{1}{2}, s_2 = 0$	$S_{i\text{合}} = \frac{1}{2}$
	末态	$s_3 = \frac{1}{2}, s_4 = 0$	$S_{f\text{合}} = \frac{1}{2}$
三 重 态	初态	$s_1 = \frac{1}{2}, s_2 = 0$	$S_{i\text{合}} = \frac{1}{2}$
	末态	$s_3 = \frac{1}{2}, s_4 = 1$	$S_{f\text{合}} = \frac{3}{2}, \frac{1}{2}$

表 9 $e + \text{Ar}$ ArI 基态 $3p^6^1S$

双 重 态	初态	$s_1 = \frac{1}{2}, s_2 = 0$	$S_{i\text{合}} = \frac{1}{2}$
	末态	$s_3 = \frac{1}{2}, s_4 = \frac{1}{2}, s_5 = \frac{1}{2}$	$S_{f\text{合}} = \frac{3}{2}, \frac{1}{2}$

注: S_i 为靶的电离电子的自旋量子数, $S_{f\text{合}}$ 为 s_3, s_4, s_5 三者合成.

4. 误差讨论

从表 4、表 7 HeI 728.1 nm 线的比较可以看出,在能量较高时 (≥ 500 eV), 我们的结果与文献 [4] 的基本相符,但在能量较低时,本文的结果要比文献 [4] 的结果随着能量的减少增加的快得多. 这可以从下面实验误差的讨论得到定性的解释.

本实验计数都在 10^4 以上, 统计误差约为 1%。靶原子密度测量误差约为 2%; 光子数目测量误差约为 3%; 检测系统量子效率标定误差约为 3%。由于我们的电子枪还不够完善, 聚焦状态不够理想, 特别是在能量比较低时尤为严重, 从而使我们的结果偏离文献 [4] 的结果比较大, 这可能主要来源于实际参加作用的电子数目要比测量到的电子数多得多的缘故。在能量较高时, 聚焦状态相对比较好, 因而我们的结果比较接近文献 [4] 的结果。实验总误差约为 35%。我们正在努力改进电子枪, 以期得到更为满意的结果。

- [1] B. L. Moiseiwitsh and S. J. Smith, *Rev. Mod. Phys.*, **40**(1968), 238.
- [2] H. R. Moustafa Moussa *et al.*, *Physica*, **40**(1969), 517.
- [3] H. R. Moustafa Moussa *et al.*, *Physica*, **36**(1967), 546.
- [4] B. Vav Zyc *et al.*, *Phys. Rev.*, **A22**(1980), 1916.
- [5] 雷子明等, *物理学报*, **36**(1987), 533.
- [6] John H. Moore, Jr., *Phys. Rev.*, **A8**(1973), 2359.
- [7] H. S. W. Massey and E. H. Burhop, *Electronic and Ionic Impact Phenomena*, Oxford U. P. London, (1952), p. 427—432, 522—524.

EXPERIMENTAL STUDIES OF EXCITED STATES IN THE COLLISIONS OF ELECTRON WITH HELIUM AND ARGON

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

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

We studied excitation processes of the targets in collisions of electron with helium and argon by optical method. Using the optical multichannel analysis system (OMA), we measured the emission spectrum of the collision systems. And the absolute emission cross sections are obtained in the electronic energy range of 200—500 eV.