

文章编号: 1007-4627(2002)02-0298-03

## He 原子价壳层跃迁的电子碰撞研究\*

刘小井, 朱林繁, 苑震生, 李文斌, 成华东, 徐克尊

(中国科学技术大学选键化学重点实验室, 近代物理系, 安徽 合肥, 230027)

**摘要:** 在入射电子能量 2 500 eV 下测量了 He 的  $1^1S \rightarrow 2^1S$ ,  $2^1P$ ,  $3^1S$  和  $3^1P$  的微分散射截面和广义振子强度, 并与前人的实验和理论结果进行了比较, 认为在此入射电子能量下一阶 Born 近似对此 4 个跃迁成立.

**关键词:** 跃迁; 微分散射截面; 广义振子强度

**中图分类号:** O561.5      **文献标识码:** A

### 1 引言

电子与原子分子的碰撞是等离子体输运、化学反应、气体放电和激光产生等领域中的基本过程之一, 同时电子碰撞方法是研究原子分子激发动力学的基本手段之一. 在非相对论条件下, 当入射电子能量足够大, 一阶 Born 近似成立且不考虑电子交换作用时, 广义振子强度(缩写 GOS)  $f(K)$  和微分散射截面(缩写 DCS)  $d\sigma/d\Omega$  有下面关系(即 Bethe-Born 公式)<sup>[1]</sup>:

$$f(K, E) = \frac{E}{2} \frac{p_0}{p_a} K^2 \frac{d\sigma(K, E)}{d\Omega}, \quad (1)$$

其中  $E$  为激发能量,  $p_0$ ,  $p_a$  分别为入射和散射电子的动量, 当入射电子能量  $E_0$  不够大时, 不论一阶 Born 近似成立与否, 均可由公式(2)定义表观广义振子强度(缩写 AGOS):

$$f(K, E, E_0) = \frac{E}{2} \frac{p_0}{p_a} K^2 \frac{d\sigma(K, E, E_0)}{d\Omega}, \quad (2)$$

$$\lim_{E_0 \rightarrow \infty} f(K, E, E_0) = f(K, E), \quad (3)$$

AGOS 提供了定量检验实验测量与一阶 Born 近似理论之间差异的手段.

He 是结构最简单、化学性质稳定的原子体系, 其原子价壳层跃迁的微分散射截面或广义振子强度无论是理论还是实验都有很多的研究. 以前的实验入射电子能量一般小于 200 eV, 大于 500 eV 的只

有少数几家<sup>[2-5]</sup>. Kim 等<sup>[6]</sup> 计算了一阶 Born 近似(FBA)下的  $1^1S \rightarrow 2^1S$ ,  $2^1P$ ,  $3^1S$  和  $3^1P$  跃迁的广义振子强度, 其中  $1^1S \rightarrow 2^1P$  的结果已经被公认为是非常准确的. 一般认为电子入射能量越高, 实验测量条件越接近于一阶 Born 近似条件, 从前人的实验结果来看, 在电子入射能量 1 500 eV 下对  $3^1S$  实验结果在动量转移较大时与理论结果有较大的差异. 而其它 3 个跃迁符合得很好<sup>[3-4]</sup>, 目前尚没有进一步的实验检验在对此跃迁入射电子能量达到多大时实验条件满足一阶 Born 近似条件.

### 2 实验方法

实验装置和实验方法已经在文献[3]和[7]中作了详细介绍. 电子枪热发射的电子束经静电半球能量分析器单色化后与气体靶碰撞, 散射后的电子经过同样类型的能量分析器后由一个位置灵敏探测器收集, 分析器的轴线可以绕电子入射方向转动, 以接收沿不同散射角度飞出的电子. 本工作的实验条件如下: 入射电子能量 2 500 eV, 能量分辨 85 meV, 散射角度  $1-8^\circ$ , 对应动量转移 0.06—3.6 atomic unit. 测量了 He  $1^1S \rightarrow 2^1S$ ,  $2^1P$ ,  $3^1S$  和  $3^1P$  跃迁的微分散射截面和广义振子强度, 测量总误差不大于 8%.

在一定的理论模型下, Lassetre 等<sup>[8]</sup> 以下述公式描述了表观广义振子强度随动量转移变化的行为

收稿日期: 2002-03-05; 修改日期: 2002-04-05

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10134010, 10004010); 中国科学技术大学青年基金资助

作者简介: 刘小井(1976-), 男(汉族), 贵州安顺人, 博士, 讲师, 从事原子分子物理实验研究.

$$f(K, E, E_0) = \frac{1}{(1+y)^6} \left( f_0 + \sum_{k=1}^m f_k \left( \frac{y}{1+y} \right)^k \right), \quad (4)$$

其中  $y = K^2/\alpha^2$ ,  $\alpha = (2I)^{1/2} + [2(I-E)]^{1/2}$ ,  $I$  是电离能,  $f_0$  是光学振子强度(缩写 OOS),  $f_k$  是拟合系数.

由于 Xu 等<sup>[3]</sup>已经证明在入射电子能量 1 500 eV 下对  $1^1S \rightarrow 2^1P$  跃迁一阶 Born 近似成立, 故将本工作测量的  $1^1S \rightarrow 2^1P$  跃迁的广义振子强度归一到 Xu 等<sup>[3]</sup>的结果, 其他跃迁的广义振子强度由它们与  $1^1S \rightarrow 2^1P$  跃迁的强度比给出.

### 3 结果和讨论

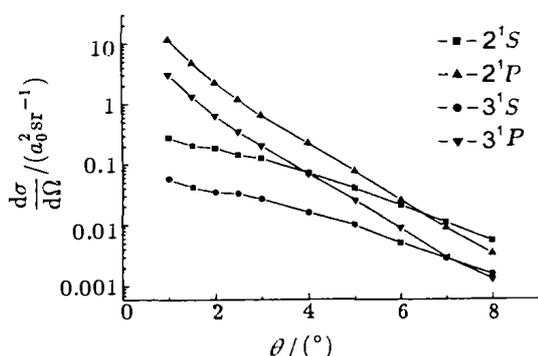


图 1 He 原子  $1^1S \rightarrow 2^1S, 3^1S$  跃迁在入射电子能量 2 500 eV 下的微分散射截面( $a_0$ 为 Bohr 半径)

图 1 为  $1^1S \rightarrow 2^1S, 2^1P, 3^1S$  和  $3^1P$  跃迁的微分散射截面. 可以看出在  $2^1P$  和  $3^1P, 2^1S$  和  $3^1S$  的曲线基本上平行, 散射角  $6.5^\circ$  为  $2^1S$  与  $2^1P$  的交叉点, 动量转移平方  $K^2 = 2.4$  atomic unit; 散射角  $7.2^\circ$  为  $3^1S$  与  $3^1P$  的交叉点,  $K^2 = 2.9$  atomic unit. 对应 Kim 等<sup>[7]</sup>的交叉点  $K^2$  分别为 2.6 和 3.0 atomic unit. 而 Xu 等<sup>[3]</sup>测量到的  $2^1S$  与  $2^1P$  的交叉点的动量转移平方  $K^2 = 2.7$  atomic unit. 这也从另一个方面表明当入射电子能量大于 2 500 eV 时,  $1^1S \rightarrow 2^1S, 2^1P, 3^1S$  和  $3^1P$  跃迁一阶 Born 近似成立.

图 2 为 He  $1^1S \rightarrow 2^1S, 2^1P, 3^1S$  和  $3^1P$  跃迁的广义振子强度(GOS), 图中同时给出其他实验和理论结果. 对  $2^1P$  和  $3^1P$  各个实验结果和 FBA 理论结果符合得很好. 对  $2^1S$  各个实验结果与 FBA 理论结果在实验误差范围内基本符合, 符合的程度随入射能量的增加变得更好. 在入射能量小于等于 1 500 eV 时, 对  $3^1S$  的实验结果在动量转移较大时与 FBA 理论结果有较大的差异, 本工作测量的入射能量和动量转移范围比以前的实验测量均有扩展, 且与 FBA 理论结果符合得很好. 另外从图中可以得到,  $1^1S \rightarrow 2^1S$  跃迁广义振子强度极大在  $K^2 = 0.78$  atomic unit,  $1^1S \rightarrow 3^1S$  跃迁广义振子强

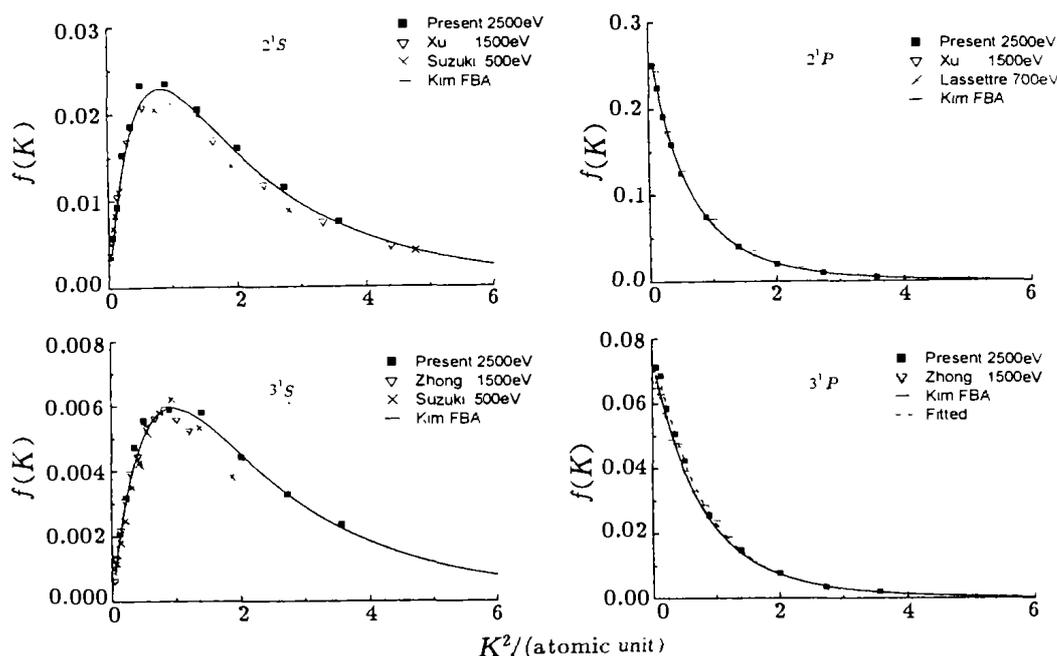


图 2 He 原子  $1^1S \rightarrow 2^1S, 3^1P, 3^1S$  和  $3^1P$  跃迁的广义振子强度

度  $K^2 = 0.85$  极大在 atomic unit, 对应 Kim 等<sup>[7]</sup>的极大值处  $K^2$  分别为 0.82 和 0.95 atomic unit. 总之, 对不同的跃迁 FBA 近似成立的条件是不一样的, 这 4 个跃迁中对  $3^1S$  的条件最严格, 直到入射

能量 2 500 eV 时 FBA 近似才很好地成立. 利用 Lassettre 公式拟合  $1^1S \rightarrow 3^1P$  跃迁的广义振子强度, 给出光学振子强度为 0.075, Zhong 等<sup>[4]</sup>利用偶极(e, e)方法测量到的光学振子强度为 0.073 9.

### 参 考 文 献:

- [1] Inokuti M. Inelastic Collisions of Fast Charged Particles with Atom and Molecules, The bethe theory revisited [J]. *Rev Mod Phys*, 1971, **43**: 297.
- [2] Dillon M A, Lassettre E N. A Collision Cross-section Study of the  $1^1S \rightarrow 2^1P$  and  $1^1S \rightarrow 2^1S$  Transition of Helium at Kinetic Energies from 200—700 eV [J]. *J Chem Phys*, 1975, **62**: 2 373.
- [3] Xu K Z, Feng R F, Wu S L, *et al.* Absolute Generalized Oscillator Strengths of  $2^1S$  and  $2^1P$  Excitations of Helium Measured by Angle-resolved Electron-energy-loss Spectroscopy [J]. *Phys Rev*, 1996, **A53**: 3 081.
- [4] Zhong Z P, Feng R F, Wu S L, *et al.* Electron-impact Study for the  $3^1S$  and  $n^1P$  ( $n=3-6$ ) Excitations in Helium[J]. *J Phys*, 1997, **B30**: 5 305.
- [5] Suzuki T Y, Suzuki H, Currell F G, *et al.* Measurements of the Electron-impact Differential Cross Sections and Generalized Oscillator Strengths for Excitation of the  $2^1S$  and  $3^1S$  States in Helium at Small Scattering Angles[J]. *Phys Rev*, 1998, **A57**: 1 832.
- [6] Kim Y K, Inokuti M. Generalized Oscillator Strengths of the Helium Atom[J]. *Phys Rev*, 1968, **175**: 176.
- [7] Liu X J, Zhu L F, Jiang X M, *et al.* Application of a Multi-channel Detection System to the High-resolution Fast Electron Energy Loss Spectrometer [J]. *Rev Sci Instr*, 2001, **72**: 3 357.
- [8] Lassettre E N, Skerbele A, Dillon M A. Generalized Oscillator Strengths for  $1^1S \rightarrow 2^1P$  Transition of Helium, Theory of Limiting Oscillator Strengths[J]. *J Chem Phys*, 1969, **50**: 1 829.

## Investigation of Valence-shell Excitations of Helium by Electron Impact\*

LIU Xiao-jing, ZHU Lin-fan, YUAN Zhen-sheng, LI Wen-bin, CHEN Hua-dong, XU Ke-zun  
(Key Laboratory of Band-selective Chemistry, Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** With electron impact energy of 2 500 eV and energy resolution of 85 meV, the differential cross sections and the generalized oscillator strengths of the excitations of  $1^1S \rightarrow 2^1S$ ,  $2^1P$ ,  $3^1S$  and  $3^1P$  of helium has been measured by electron energy loss spectroscopy. Comparing with previous experimental and theoretical results, it seems that the first Born approximation is valid for these excitations under such an electron impact energy.

**Key words:** excitation; differential cross section; generalized oscillator strength

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10134010, 10004010); Youth Foundation of the University of Science and Technology of China