

# 离子原子近距离碰撞过程研究\*

夏宗璜 王德民 沈定予 马宏骥

(北京大学技术物理系, 北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

**摘要** 对在北京大学技术物理系核物理与核技术实验室 1.7MV 串列加速器上进行的有关离子原子碰撞内壳层电离机制的研究进展作了简介.

**关键词** 近距离碰撞 直接库仑电离 准分子 分子轨道模型(MO) 电子提升 空穴分享 多重电离

离子原子碰撞过程研究在原子、分子物理学中占有重要地位,并与普遍存在于星际、大气空间、等离子体及化学反应过程中基本问题密切相关.在离子原子近距离碰撞中,碰撞双方内壳层空穴的产生机制及其规律一直是人们感兴趣的问题.目前人们的认识如图 1 所示,即内壳层空穴的产生可源于直接库仑电离过程(PWBA, SCA 描述区域)亦可来自准分子过程(MO 模型描述区域).一般来说,当碰撞能量较高时,前者为主;而随着碰撞能量降低,准分子过程变得更为重要.1.7MV 串列加速器可提取多种重离子束且能量连续可调,极适合于开展 MO 区域或介于两者之间过渡能区的碰撞电离机制研究.近年来,该所开展的有代表性研究工作如下:

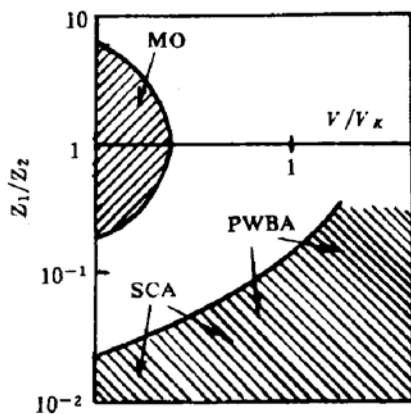


图 1 内壳层电离机制及其描述示意图.  $Z_1, Z_2$  分别为入射离子和靶原子核电荷;  $v, v_k$  分别代表入射离子速度及靶原子中  $k$  层电子平均速度

1) 重离子诱导靶原子 k-X 射线发射研究<sup>[1,2]</sup>

本研究包括 Ni-Ti、Fe、Ni、Zn 等多种弹靶体系的特征 X 射线测量和有关电离机制研究.观测到重离子 Ni 在诱导靶原子发射 k-X 射线的同时轰击离子 Ni 也被激发发射其特征 X 射线,并得到了当弹靶原子能级满足一定匹配关系时,靶原子的特征 X 射线强度出现非线性的巨增强,根据分子轨道模型,计算了上述碰撞体系的“准分子能级关联图”,并应用电子提升概念解释了上述重离子原子碰撞,在 MeV 能区特有的实验现象.从试验与理论模型计算两方面进一步阐明了在这一能区近距离碰撞过程中形成准分子,其相互靠近或交叉的(准简并)准分子轨道中的电子可通过电子提升产生 k 壳层电离机理的真实性.同时,所得规律也有独特实用价值,例如在一些特殊情况下,可指导选择利用不同重离子入射,达到提高待分析元素灵敏度,这是对常规质子激发 X 射线发射离子束分析方法的重要补充.

2) 准分子空穴分享过程的探索

W. E. Meyerhof<sup>[3]</sup>曾提出:在准分子形成时存在空穴分享,从而可能改变弹靶原子空穴分布,但至今很少研究.事实上,一些实验结果<sup>[4]</sup>亦暗示出空穴分配的变化影响了碰撞双方空穴衰变的相对几率.从 MO 模型出发,计算了近距离碰撞中构成准分子碰撞双方各单电子波函数对分子轨道的贡献.图 2. (a) 为

\* 中国核工业总公司资助教学课题.

C<sup>+</sup>-N 体系准分子轨道相关图,图 2(b)为几种核间距下,离子 C<sup>+</sup>与 Be、B、C、N、O 等构成的碰撞体系,准分子 2Pσ 轨道上 C 的 1s 电子相对于各靶原子 1s 电子占有几率之比(用 R 表示). 结果表明,比值 R 随靶 Z 非单调变化且与核间距有关. 它反映了空穴分享过程及 k 空穴分配关系. 这一切初步探索正待进一步理论计算完善及更多的实验检验.

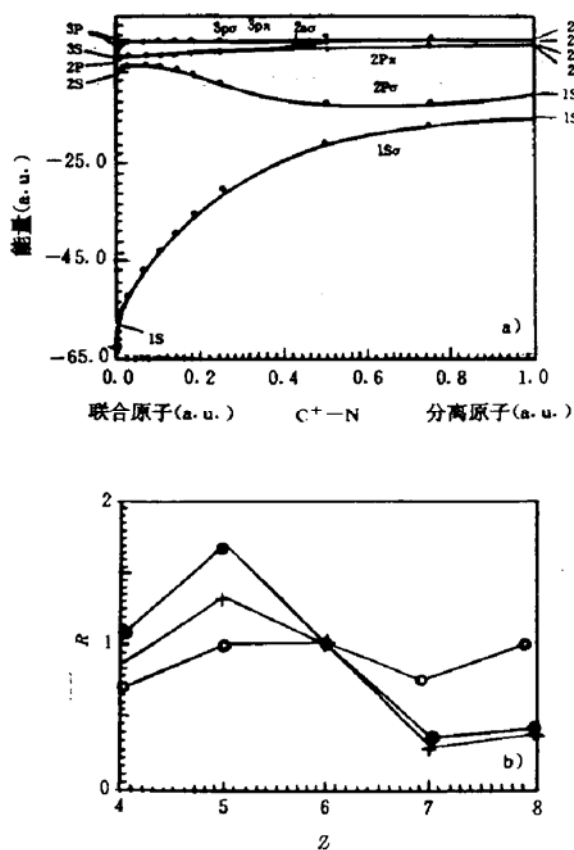


图 2 (a)C<sup>+</sup>-N 准分子轨道相关图

(b)比值 R 随靶 Z 变化关系

- • • 核间距 0.1au
- + + + 核间距 0.06au
- • • 核间距 0.02au

### 3) 准直分子束与原子近距离碰撞中角相关现象研究<sup>[5,6]</sup>

用准直的质子、α 粒子、<sup>2+</sup>Li、<sup>3+</sup>B、<sup>3+</sup>O 等离子束与重原子 Au 靶构成碰撞体系. 在入射离子能量为 0.2~2MeVamu<sup>-1</sup>能区, 测量被电离 Au 原子发射 l-X 射线能谱. 研究了碰撞电离产生的 Au 2p<sub>3/2</sub>空穴对入射离子束方

向的取向行为及 L<sub>1</sub> 辐射的极化特征. 定义 A<sub>2</sub> 为定向度, 描述 2p<sub>3/2</sub>空穴态对入射束方向的取向程度, A<sub>2</sub> 是一个通过 l-X 射线谱测定及分析、可从实验上得到的量, 又是从理论上可借助于电离机制的模型来计算的物理量. 从实验测量给出了 A<sub>2</sub> 随入射离子能量变化关系, 测量了 L<sub>1</sub> 辐射的极化特征. 有趣的是, 在较低入射离子能区 (< 0.5MeV amu<sup>-1</sup>), 2p<sub>3/2</sub>空穴态的这种取向程度减弱并随能量变低减弱加剧. 所研究能区恰处于两种电离机制描述的中间地带, 利用直接库仑电离理论, 采用平面波玻恩近似(PWBA), 通过电离截面的计算(其中考虑了空穴态总角动量 j 在准直束方向上投影 m<sub>j</sub>)预言了定向度 A<sub>2</sub> 的入射离子能量相关性. 同时考虑和处理了 l 壳层发生科斯特-克朗尼格跃迁影响及加了入靶核库仑场对入射离子直线轨迹影响的校正因子. 结果使理论计算预言的定向度 A<sub>2</sub> 的入射离子能量相关曲线更接近实验点分布. 进一步揭示了造成低能区 2p<sub>3/2</sub>空穴态取向程度减弱的物理因素. 这是对大量从总电离截面测量研究碰撞电离机理的一个重要补充, 也是一种有效的研究手段.

### 4) MeV(C)<sub>2</sub><sup>+</sup> 簇束导致 Cu k-X 射线发射及其分支比 K<sub>α</sub>/K<sub>α+β</sub>的测定

k-X 射线分支比 K<sub>α</sub>/K<sub>α+β</sub>, K<sub>α</sub>, K<sub>β</sub> 分别表示 k-X 射线谱中 α, β 分支的强度, 是一个灵敏于多重电离现象的基本物理参数. 当碰撞电离过程存在多重电离时, 由于内壳层空穴分布变化而发生 K<sub>α</sub>, K<sub>β</sub> 线能量移动及分支比值的变化. 本研究用 1.4MeV C<sup>+</sup>、2.8MeV (C)<sub>2</sub><sup>+</sup> 和 3MeV Si<sup>+</sup> 离子束轰击 Cu 薄靶, 从测得的 Cu k-X 射线谱提取了分支比值, 并与 <sup>65</sup>Zn 源得到的分支比值作了比较. 结果表明, 以上三种离子束轰击情况下, 分支比值在误差范围内与 <sup>65</sup>Zn 结果相近, 这反映了在这一能区多重电离现象是不明显的; 同时 C<sup>+</sup> 和 (C)<sub>2</sub><sup>+</sup> 束 k-X 射线谱几乎完全相同, 而用 Si<sup>+</sup> 束得到的 Cu k-X 射线谱在低能端有明显的来自分子轨道的连续 X 射线辐射, 所以尽管

(C)<sub>2</sub><sup>+</sup> 集团与单质 Si<sup>+</sup> 质量相近,但在 k-X 射线谱形上没有观察到明显的 (C)<sub>2</sub><sup>+</sup> 集团整体的效应,亦即 (C)<sub>2</sub><sup>+</sup> 簇束中单个 C 的行为是主要的.

### 参 考 文 献

- 1 Xia Zonghuang, Lu Xiting, Yao Shude, et al. Chin. Phys. Lett., 1989,6(6):257
- 2 Wang Deming, Xia Zonghuang, et al. Chin. Phys. Bulletin, 1990,35:1252
- 3 Meyerhof W E. Phys. Rev. Lett., 1973,341
- 4 Zou Y, Awaya Y, et al. Radiation Effects and Defects and Solids,1993,126:87
- 5 Xia Zonghuang, Ma Honhji, et al. Chin. Phys. Lett. 1993,10(3):135
- 6 夏宗璜,马宏骥. 物理学报, 1994,43:1764
- 7 Xia Zonghuang, Wang Qian, Shen Dingyu, et al. Chin. Phys. Lett., 1995,12(9):524

## Studies on Processes of Closing Collisions between Ion-atom

Xia Zhonghuang Wang Deming Shen Dingyu Ma Hongji

(Department of Technical Physics, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract** The work done in recent years at 1.7 MV tandem in Lab. of Nuclear and Technology, Peking University, including recent work on heavy ion induced X-ray emission, quasi-molecular vacancy sharing, alingment effect and cluster beam effect of multi-ionization, are briefly summarized.

**Key Words** closing collision direct coulomb ionization quasi-molecular molecular orbital model (MO) electron promotion vacancy sharing multi-ionization