

文章编号: 1007-4627(2010)04-0505-05

# Ne 原子(e, 2e)反应中反冲离子动量分析\*

张鹏举<sup>1,2</sup>, 马新文<sup>1, #</sup>, 闫顺成<sup>1,2</sup>, 许慎跃<sup>1,2</sup>, 张少峰<sup>1</sup>, 朱小龙<sup>1</sup>, 刘惠萍<sup>1</sup>

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 73000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 利用冷靶反冲离子动量谱仪, 对电子轰击 Ne 原子的单电离反应(e, 2e)进行了研究, 实验测量了 70—3300 eV 入射能量情况下, 反应过程中产生的一价反冲离子的动量分布, 并对反冲离子的总动量进行了还原。介绍了一个简单的碰撞机制, 据此着重分析了反冲离子纵向动量和横向动量二维谱形成的原因, 该碰撞机制能够较好地解释较高能量入射时的实验结果。最后根据反冲离子的动量, 估算了出射电子的能量范围, 为下一步进行电子、离子的符合测量奠定了基础。

**关键词:** 反冲离子; 单电离反应; 冷靶反冲离子动量谱仪; 动量分布

**中图分类号:** O562.5 **文献标识码:** A

## 1 引言

长期以来, 电子-原子电离反应作为人们检验量子力学和多体系统的一个有效手段而备受关注<sup>[1]</sup>。人们通过对电子-原子电离反应的研究, 也极大地促进了天体物理、等离子体物理、表面物理等学科的发展。人们利用传统电子谱仪的实验方法, 对电子-原子电离反应进行了比较系统的研究, 已经积累了比较多的实验数据, 深入地研究了电离反应的产物, 以及相关的电离机制。目前使用的传统电子动量谱仪主要分为两种类型: (1) 能量多通道型电子动量谱仪, 即单角度多能量同时测量; (2) 角度多通道型电子动量谱仪, 即单能量多角度同时测量。传统电子动量谱仪的具体结构是多种多样的, 但是综合分析一下, 它们的主体结构一般都包括: 真空系统、磁屏蔽、电子枪、靶室和供气系统, 减速聚焦系统、能量分析器、位置灵敏探测器以及探测器角度旋转装置<sup>[2]</sup>。

1969 年, Ehrhardt 等<sup>[3]</sup>利用传统电子谱仪第一次测量了 He 原子(e, 2e)反应的三重微分截面, 极大地推动了原子单电离反应研究的发展; 1989 年, Lahmam-bennani 等<sup>[4]</sup>第一次报道了 Ar 原子(e, 3e)反应的多重微分截面, 将人们对电离机制的认识提高到一个新的水平。但是传统电子动量谱仪

存在探测立体角小和符合效率低的缺点<sup>[5]</sup>, 制约了电离反应研究的继续深入, 新近发展起来的冷靶反冲离子动量谱仪克服了传统电子动量谱仪的缺点, 对单个电子在全空间几乎能够完全测量, 并具有很高的符合效率<sup>[6]</sup>。1999 年—2003 年, Dorn 等<sup>[7-9]</sup>利用反应显微成像谱仪对 3 keV, 2 keV, 500 eV 电子入射 He 原子双电离反应进行了一系列研究, 获得了反应的全微分截面, 阐述了不同能区下的主要电离机制。Jagutzki 等<sup>[10]</sup>于 1996 年测量了电子入射 He 单电离和双电离的反冲离子动量微分截面, 发现反冲离子的动量分布基本反映了 He 原子 1s 电子的康普顿轮廓, 首次通过对反冲离子动量的测量研究了出射电子的行为。

本文利用中国科学院近代物理研究所研制的冷靶反冲动量谱仪, 首次测量了 70—3300 eV 能量范围内 Ne 原子的(e, 2e)反应中反冲离子的动量分布, 并通过一个简单的碰撞机制, 较好地解释了反冲离子纵向动量和横向动量二维谱形成的原因。

## 2 实验装置与方法

### 2.1 实验装置

本实验是在中国科学院近代物理研究所研制的冷靶反冲离子动量谱仪(COLTRIMS)<sup>[11]</sup>上进行

\* 收稿日期: 2010-01-28; 修改日期: 2010-09-28

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10674140)

作者简介: 张鹏举(1987-), 男(汉族), 河南许昌人, 硕士研究生, 从事电子原子碰撞研究; E-mail: zhangpengju@impcas.ac.cn

# 通讯联系人: 马新文, E-mail: x.ma@impcas.ac.cn

的。COLTRIMS 主要包括超音速冷靶、靶室、飞行时间谱仪(TOF)、反冲离子探测器和电子枪等 5 部分<sup>[12]</sup>。实验装置结构如图 1 所示。

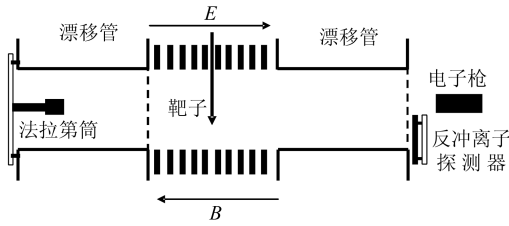


图 1 COLTRIMS 结构示意图

脉冲电子枪可以产生频率为 12 kHz 和半高全宽为 20 ns 的脉冲电子束，电子束经过亥姆霍兹线圈产生的  $5 \times 10^{-4}$  T 磁场约束后束斑直径约为 2 mm。差分系统提供的高密度、小动量分散的超音速气体冷靶，在靶室上方喷射至作用区，脉冲电子最终在作用区与气体靶发生碰撞，反应产生的反冲离子在 TOF 电场的作用下，飞向反冲离子探测器，未反应的入射电子被法拉第筒收集。

沿束流方向具有不同动量的反冲离子，由于受到 TOF 电场的影响，到达探测器上时会有不同的飞行时间。此时，探测器前端的微通道板的一路脉冲信号，作为 TDC 的开门信号，而将另一路脉冲信号延迟后作为关门信号，测量两信号的时间差可以计算出反冲离子飞行时间  $t$ ，从而得到反冲离子的 TOF 谱，同时，放大后电子团被延迟线阳极收集。通过测量电子脉冲向阳极丝两端传输的时间差，得到反冲离子落到探测器上的二维位置  $(x, y)$ ，从而得到反冲离子的二维位置谱。根据测得的飞行时间及二维位置信息，可以还原出反冲离子的三维动量。

## 2.2 反冲离子动量还原方法

### 2.2.1 横向动量还原

在实验室坐标系下，入射电子束的方向定义为  $z$  轴，靶子喷射的反方向为  $y$  轴， $x$  轴垂直于  $y-z$  平面，构成右手直角坐标系。与电子束平行的方向为纵向方向，垂直于电子束的方向为横向方向。从获得的反冲离子的飞行时间和二维位置信息可以计算出反冲离子的初始动量。

首先，由于反冲离子在横向方向具有各向同性

分布的性质，因此可以选择位置灵敏探测器上的离子束斑中心作为横向动量零点。设  $\Delta x, \Delta y$  为距离横向动量零点的位置差，横向动量在  $x$  和  $y$  方向的分量可以由以下两个公式求得：

$$P_x = \frac{\Delta x M}{t},$$

$$P_y = \frac{\Delta y M}{t}. \quad (1)$$

其中， $M$  为反冲离子的质量， $t$  为反冲离子飞行时间，根据  $P_T = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$  得到反冲离子的横向动量。

### 2.2.2 纵向动量还原

假设在反应过程中，入射电子只有能量损失，而没有与靶子发生动量交换，则反冲离子在全空间是各向同性分布的，一价离子 TOF 峰的中心即为纵向动量零点的位置，但是在实际的电离反应中，入射电子的能量损失及其与靶子之间的动量转移同时存在，这将造成反冲离子 TOF 峰整体向大动量方向移动，从而使 TOF 峰的中心偏离纵向动量零点的位置。根据能量守恒和动量守恒，初步估算了这一偏移值的大小：

$$P_{R//} \approx \frac{Q + \frac{1}{2} m \Delta v^2}{v_i}, \quad (2)$$

其中

$$\frac{1}{2} m \Delta v^2 = \left\{ 2W^2 - 1 - \frac{W[W^2 + (W + 1)^2 - 3]}{W + 1} \right\} E_0,$$

$$W = \sqrt{\frac{E_i}{E_0}}, \quad (3)$$

$v_i$  是入射电子的速度， $Q$  为反应前后的靶子内能变化， $E_0$  为靶电子的动能， $\Delta v$  是入射电子的速度变化。从上式可知，对于一个特定的电离反应，反应过程中的  $Q$  值变化和  $v_i$  是一定的，则反冲离子的纵向动量移动的大小可以由  $\Delta v$  的大小来估算。

至此，就可以通过 Simion 软件模拟反冲离子的飞行时间，得到 1 a. u. (atomic unit) 反冲离子的动量所对应的飞行时间差  $\Delta t$ ，结合上述的纵向动量零点的确定，得到反冲离子的纵向动量。

最后根据还原出来的横向动量  $P_T$  和纵向动量  $P_L$ ，利用公式  $P = \sqrt{P_T^2 + P_L^2}$  得到反冲离子的总动量。

### 3 实验结果与讨论

图 2 给出了不同入射能量下反冲离子  $\text{Ne}^+$  的总动量分布。横轴表示反冲离子的总动量,纵轴表示计数。从图中可以看出,绝大多数反冲离子集中分布在(0—2 a. u.)的范围内,不同入射能量下,反冲离子总动量最大值的位置基本不变,但随着入射电子能量的不断降低,大动量的反冲离子的相对比例逐渐增大。这表明在碰撞过程中,主要发生了小动量转移的电离反应,但是随着入射能量的降低,发生大动量转移的电离反应的比例在不断增大。

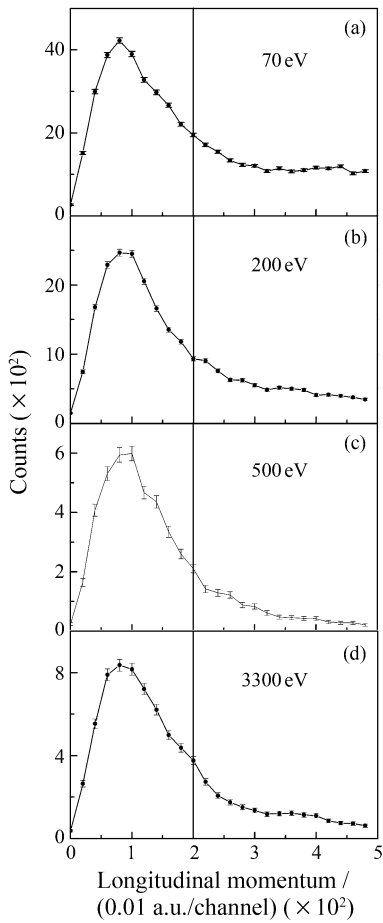


图 2 不同入射电子能量下  $\text{Ne}^+$  的总动量分布

图 3 给出了 500 eV 入射能量下  $\text{Ne}^+$  的纵向动量和横向动量的二维谱。从图可以看出,  $\text{Ne}^+$  的纵向动量主要分布在  $\pm 2$  a. u. 的范围内,而横向动量主要分布在(0—2 a. u.)范围内;二维谱分布有一定的倾斜,其最大值的中心集中分布在如图所示的圆弧上面。

如图 4 所示,在反应过程中,由动量守恒  $P +$

$P_{\text{Ne}}^i = P_{\text{Ne}}^f + P_0' + P_e$  (其中,  $P_0$  为入射电子的动量,  $P_0'$  为散射电子的动量,  $P_{\text{Ne}}^i$  为靶原子的初始动量,  $P_{\text{Ne}}^f$  为反冲离子的动量,  $P_e$  为出射电子的动量)可知,若入射电子损失的能量等于 Ne 原子的第一电

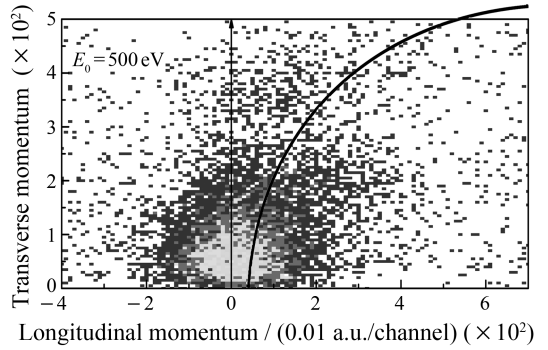


图 3 500 eV 电子入射时  $\text{Ne}^+$  的纵向动量(x 轴)和横向动量(y 轴)二维谱

离能,则散射电子的动量为  $P_0'$ ,方向不确定,在反应前,靶原子的初始动量很小,可以忽略不计,且反应后被电离电子携带的动量很小,则反冲离子的动量几乎等于反应中的动量转移<sup>[7]</sup>,于是上式可化为  $P_{\text{Ne}}^f \approx P_0 - P_0' = K$ ,  $K$  为反应中入射电子与靶原子之间的动量转移。因此,反冲离子就主要分布在一个以  $P_0$  顶点为圆心,  $P_0'$  为半径的圆弧上,但在实际反应过程中,出射电子携带的动量不可能全部为零,则有  $P_{\text{Ne}}^f + P_e = K$ ,  $P_e$  的大小和方向不确定,于是,反冲离子就会分布在一个以  $P_0'$  为半径的圆弧周围,这与图 3 的实验结果符合得比较好。

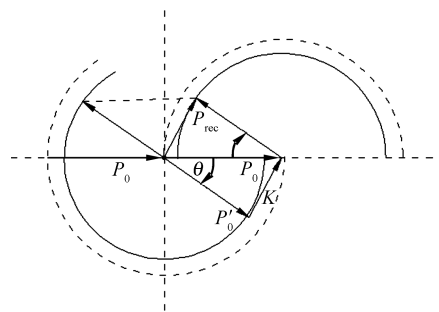


图 4 二体碰撞示意图

$P_{\text{rec}}$  为反冲离子的动量,  $P_0$  为入射电子的动量,  $P_0'$  为散射电子的动量。

图 5 给出了不同入射能量情况下  $\text{Ne}^+$  的纵向动量和横向动量的二维谱。通过对比发现,这些谱图的不同点有:(1)对于每个能量点,反冲离子的纵向动量和横向动量的二维谱上均有一个极大值出现,并集中分布在小动量范围内;(2)二维谱都有一定

的倾斜度。它们的不同点有：(1)随入射能量的增加，二维谱的倾斜度降低，反冲离子在二维谱上的分布区域变小；(2)70 eV 入射时，二维谱中除极大值之外，在某一动量附近还有一次极大值出现。

由图 4 可知，反冲离子主要分布在一个以  $P'_0$

为半径的圆弧周围，圆弧的半径为  $P_0$ ，该圆弧对应的弦有一定的倾斜度，随着入射电子能量的增加，圆弧的半径  $P'_0$  变大，圆弧的曲率就越越来越小，其对应的弦的倾斜度也就越来越小，造成二维谱的倾斜度变小。

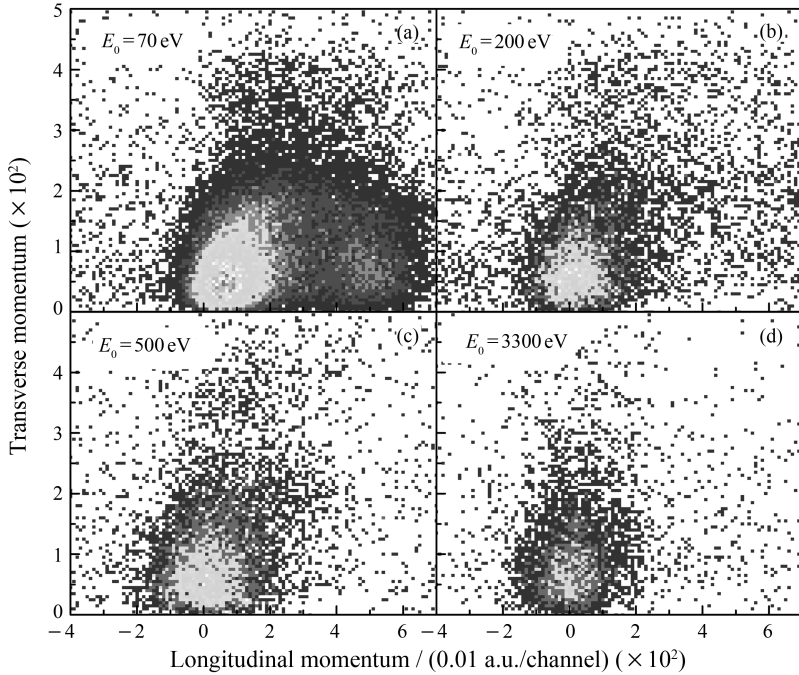


图 5 不同入射能量下  $Ne^+$  的纵向动量( $x$  轴)和横向动量( $y$  轴)的二维谱(每道对应的动量为 0.01 a. u.)

从图 4 可知，反冲离子在圆弧周围的分布基本反映了动量转移的大小。如果忽略低能( $e, 2e$ )反应和高能( $e, 2e$ )反应出射电子能谱的差异，则在低能电子入射时，反冲离子在动量二维谱上的分布区域较大，且主要是由于大动量转移的电离反应比例增加引起的。对于 70 eV 电子入射时，二维谱中次极大值的出现，目前还没有找到合理的解释。

此外，根据反冲离子的纵向动量和横向动量的二维谱，以圆弧上一点为圆心画圆，把绝大部分离子包括进来，该圆的半径就约等于出射电子动量的大小，则可计算得到相应的出射电子的能量范围，在 500 eV 电子入射时，计算得到出射电子的能量范围为 0—35 eV，也就是说，小能量出射的电子占绝大多数。

### 4 结论

利用中国科学院近代物理研究所研制的冷靶反冲动量谱仪成功实现了  $Ne$  原子的单电离实验，并

对反冲离子的动量进行了测量。结果表明，在入射电子能量为 3300, 500, 200 和 70 eV 时，反冲离子主要集中在小动量范围内，随着入射能量的降低，大动量反冲离子的相对比例逐渐增大；根据反应过程中的能量守恒和动量守恒，并结合二体碰撞示意图，较好地解释了反冲离子纵向动量和横向动量二维谱的形成原因；500 eV 电子入射时，计算得到出射电子的能量范围为 0—35 eV，小能量出射的电子占绝大多数。

### 参考文献 (References):

[1] Kieffer L J. Review of Modern Physics, 1971, 4(3): 1.  
 [2] Chen Xuejun, Zheng Yanyou. The Principles and Applications of EMS. Beijing: Tsinghua University Press, 1999, 160 (in Chinese).  
 (陈学俊, 郑延友. 电子能谱学的原理和应用. 北京: 清华大学出版社, 1999, 160.)  
 [3] Ehrhardt H, Schulz M, Tekaath T, et al. Phys Rev Lett,

- 1969, **22**: 89.
- [4] Lahman-bennani A, Dupre C, Duguet A. *Phys Rev Lett*, 1989, **63**(15): 1582.
- [5] Moshhammer R, Unverzagt M, Schmitt W, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 1996, **108**: 425.
- [6] Cao Shiping, Ma Xinwen, Dorn A, *et al.* *High Energy and Nuclear Physics*, 2007, **31**: 278(in Chinese).  
(曹士娉, 马新文, Dorn A, 等. *高能物理与核物理*, 2007, **31**: 278.)
- [7] Dorn A, Moshhammer R, Schröter C D, *et al.* *Phys Rev Lett*, 1999, **82**: 2496.
- [8] Dorn A, Kheifets A S, Schröter C D, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2001, **86**: 3755.
- [9] Dorn A, Kheifets A, Schröter C D, *et al.* *Phys Rev*, 2003, **A68**: 012715.
- [10] Jagutzki O, Spielberger L, Dörner R, *et al.* *Z Phys*, 1996, **D36**: 5.
- [11] Cao Shiping, Ma Xinwen, Dorn A, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2007, **24**(3): 208(in Chinese).  
(曹士娉, 马新文, Dorn A, 等. *原子核物理评论*, 2007, **24**(3): 208.)
- [12] Ullrich J, Moshhammer R, Dörner R, *et al.* *J Phys: At Mol Opt Phys*, 1997, **B30**: 2917.

## Analysis of Recoil Ion Momentum in Ne(e, 2e)Ne<sup>+</sup> Reaction<sup>\*</sup>

ZHANG Peng-ju<sup>1, 2</sup>, MA Xin-wen<sup>1, #</sup>, YAN Shun-cheng<sup>1, 2</sup>, XU Shen-yue<sup>1, 2</sup>,

ZHANG Shao-feng<sup>1</sup>, ZHU Xiao-long<sup>1</sup>, LIU Hui-ping<sup>1</sup>

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*;

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Using cold target recoil-ion momentum spectroscopy(COLTRIMS) we have measured the momenta of recoil target ions in the single ionization(e, 2e) reactions of Ne at the energies between 70 and 3300 eV. A simple collision mechanism was introduced to analyze the distributions of the momenta of recoil ions. This mechanism can qualitatively well explain the distributions for the intermediate and high impact energy. Finally, the energy range of the ionized electron according to the momenta of the ion was estimated, which lays the foundation for the next coincidence measurement of electrons and ions.

**Key words:** recoil ion; single ionization; cold target recoil-ion momentum spectroscopy; momentum distribution

\* **Received date:** 28 Jan. 2010; **Revised date:** 28 Sep. 2010

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10674140)

# **Corresponding author:** Ma Xin-wen, E-mail: x.ma@impcas.ac.cn