

文章编号: 1007-4627(2016)04-0506-07

## 一套用于研究原子团簇热力学的离子速度成像谱仪

张旭杰<sup>1,2</sup>, 石福栋<sup>2,3</sup>, 钱东斌<sup>2</sup>, 张大成<sup>2</sup>, 朱小龙<sup>2</sup>, 杨杰<sup>2</sup>, 李新忠<sup>1</sup>, 马新文<sup>2</sup>

1. 河南科技大学物理工程学院, 河南 洛阳 471023;
2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
3. 西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 原子团簇的激发温度可由反应产物(出射电子或碎片)的初始平动能这一可观测量间接获得, 为了提高原子团簇激发温度的测量精度, 设计并搭建了一套具有高动能分辨的离子速度成像谱仪。本谱仪的高动能分辨性能首先借助 Simion8.0 软件优化静电透镜和分子束限束装置的几何结构来实现, 然后通过理论模拟证明本套谱仪具有预期好的动能分辨能力。设备搭建完成后, 研究了 C<sub>60</sub> 分子束在纳秒激光场中发生的延迟电离过程, 获得了 C<sub>60</sub><sup>+</sup> 离子随延迟时间增加而逐渐变窄的二维时间切片图像。分析表明, 激光脉冲产生的多个 C<sub>60</sub><sup>+</sup> 离子间的库仑耦合作用将会扩展二维切片图像的横向分布, 提取库仑耦合作用对 C<sub>60</sub><sup>+</sup> 离子初始平动能的影响, 并通过分析 C<sub>60</sub><sup>+</sup> 离子间的库仑耦合随延迟时间增加而逐渐变弱的定量依赖关系, 证实了本套谱仪具有了设计预期的高动能分辨能力。这一工作为下一步基于离子速度成像技术细致研究分子热力学的相关课题提供技术参考。

**关键词:** 原子团簇; 激发温度; 离子速度成像谱仪; 动能分辨; 延迟电离

**中图分类号:** O551.2    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.04.506

### 1 引言

自 1987 年以来, 离子速度成像技术经过二十多年的演化<sup>[1-7]</sup>, 已逐渐发展成为一种研究分子动力学和分子热力学的重要方法<sup>[8-10]</sup>。特别是 1997 年静电透镜的引入<sup>[2]</sup>, 在很大程度上降低了因离子源空间分布引起的动能弥散, 提高了探测离子动能的分辨率。对于原子团簇而言, 激发温度是理解其热力学问题的基本参数, 通常情况下这一参数可由反应产物的初始平动能获得<sup>[11]</sup>, 因此实验精确测量反应产物的动能在研究原子团簇的热力学问题上具有重要的意义。

C<sub>60</sub> 分子是目前实验室最容易操纵的原子团簇, 采用纳秒激光与 C<sub>60</sub> 分子束交叉碰撞实验具有独特的优势: (1) 相对于电子、离子和飞秒激光加热 C<sub>60</sub> 过程而言, 纳秒激光加热 C<sub>60</sub> 是一个慢过程, 保证了母体系统电离和碎裂前达到了热平衡状态; (2) 该加热方式中只有单价态的受激母体产生<sup>[12]</sup>, 其电离和碎裂过程与系统内部的激发能相关而不受库仑排斥的干扰。一般情况下, 测量带电产物初始平动能的常规方法有 2 种: (1)

通过飞行时间质谱峰形获取对应带电产物的初始平动能信息; (2) 通过速度二维影像获取对应带电产物的初始平动能信息。以上 2 种方法中, 影响平动能测量精度的一个共性因素是蒸气靶束的发散度。值得提及的是, 纳秒激光加热 C<sub>60</sub> 分子时会引起微秒时间尺度的延迟电离现象<sup>[13]</sup>。采用方法(1)时, 由于延迟电离严重改变了带电产物的飞行时间质谱峰形, 因此通过峰形获取平动能时其测量精度将遭受严重影响。采用方法(2)时, 延迟电离意味着带电产物产生的位置偏离了作用区, 位置的有限偏离对测量平动能的影响可以通过满足三维聚焦条件的速度成像技术给予消除, 因此离子速度成像谱仪是实验研究原子团簇碎裂热力学的理想选择。目前, 国内已有几个科研单位根据不同的物理目标搭建起了不同结构的离子速度成像谱仪<sup>[14-17]</sup>, 但仍没有具有高动能分辨且适合于开展激光与分子束交叉碰撞实验的速度成像谱仪报道。

本文将详细介绍一台适合于激光与分子束交叉碰撞实验手段开展原子团簇热力学的速度成像谱仪。本谱仪核心部分(分子束限束装置和静电透镜的几何结构)

收稿日期: 2015-12-18; 修改日期: 2016-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1232122, 10904152)

作者简介: 张旭杰(1988-), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 从事团簇碎裂热力学研究; E-mail: zhangxujie@impcas.ac.cn

通信作者: 钱东斌, E-mail: qiandb@impcas.ac.cn.

的设计着重考虑了对带电产物初始平动能的高精度测量。通过 Simion8.0 软件模拟和实验测试两种途径检验了整套谱仪的工作性能。结果表明, 本套谱仪具有了高动能分辨的能力, 满足了精细研究原子团簇碎裂热力学的实验要求。

## 2 实验装置的设计和理论模拟

### 2.1 实验装置设计

对分子蒸气靶束的限束部分和双场静电透镜部分的合理设计是精确测量离子碎片初始平动能的关键。下面重点介绍为了提高平动能的测量精度, 我们对分子束产生装置和双场静电透镜的设计与考虑。

分子蒸气靶束具有尽可能小的发散度是高精度测量离子碎片初始平动能的前提。本实验装置采用电阻加热式分子炉来产生分子蒸气束。分子炉的结构如图 1 所示, 设计中选取金属钼作为炉胆的制作材料、金属钼作

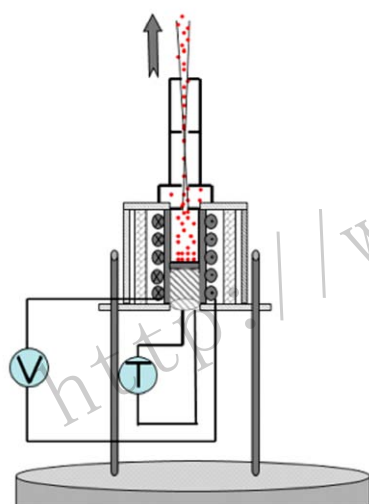


图 1 (在线彩图) 电阻加热式分子炉示意图

为加热丝的制作材料。炉胆置于圆柱状陶瓷内部, 直径为 0.2 mm 的钼丝均匀缠绕在圆柱状的陶瓷上。采用连续可调谐的交流变压器为钼丝提供加热电流, 所产生的热量通过热传导的方式实现对炉胆加热。分子炉的温度可通过改变变压器的工作电压来有效控制, 并通过与圆柱状陶瓷紧密结合的热电偶温度计探头进行实时监测。C<sub>60</sub> 固体粉末置于炉胆内, 分子蒸气由炉胆上方直径为 1 mm 的小孔溢出, 然后经过 3 个直径为 1 mm 的限束小孔(由下而上小孔间隔分别为 10, 25, 25 mm)。基于设计的限束小孔空间几何尺寸, 理论计算出限束后的分子蒸气束的发散度约为 1 度, 很好地降低了分子蒸气束在垂直于其传输方向的热平动能弥散。

双场静电透镜是由组装在绝缘陶瓷棒上的 17 块互相平行、中间带圆孔的正方形铜电极板组成(见图 2)。电极板的边长为 80 mm, 厚度为 2 mm。从左到右, 前三块电极板的圆孔直径为 10 mm, 其余 14 个电极板的圆孔直径均为 30 mm。作用区间的电极板间隔为 10 mm, 其余电极板间隔均为 5 mm, 离子总的飞行长度为 570 mm, 探测器直径为 40 mm。设计中采用开口状电极代替传统的栅网状电极, 其优势主要有 2 点: (a) 提高离子的透过率; (b) 弯曲电场犹如光学透镜, 可牵引处于不同位置的具有相同速度矢量的离子聚焦到探测器的同一位置, 这就是速度成像的原理<sup>[2]</sup>。电极板的结构和总的离子飞行长度(取决于真空腔室的实际尺寸)一旦确定, 谱仪的速度聚焦能力主要依赖于双场静电透镜的电场强度比值, 即最优的电场强度比值条件使得同一速度矢量的离子到达探测器后的径向分布最小化。我们借助 Simion8.0 软件确定出最佳速度聚焦条件对应的电场比值  $E_1/E_2 = 4.3:10$ 。最后选用合适的电阻把各电极板串联起来, 实现只用一台直流高压电源为双场静电透镜提供工作电压。

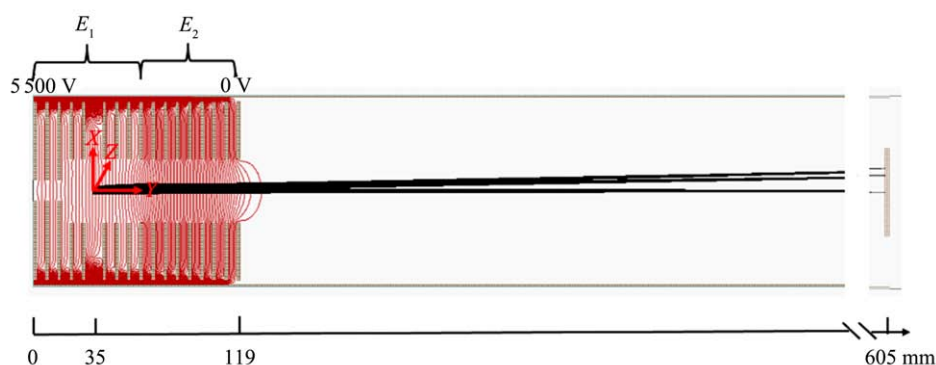


图 2 (在线彩图) 双场静电透镜结构示意图

其中  $x$  轴对应激光传输方向,  $y$  轴对应静电加速电场方向,  $z$  轴对应 C<sub>60</sub> 分子束蒸发方向。

### 2.2 理论模拟

谱仪的几何结构和聚焦条件确定后, 其动能分辨率主要依赖于作用区离子源的空间分布和静电透镜的工作电压。考虑到  $C_{60}$  分子束经限束后在作用区与激光束垂直交叉碰撞的实际情况 (详见第 3 节描述), 以下 Simion8.0 模拟过程中设置  $C_{60}^+$  离子均匀分布在长为 3 mm (激光传播  $X$  方向)、半径为 0.5 mm ( $YZ$  平面) 的圆柱体内 (坐标如图 2 所示)。模拟中设定离子总计数为 3000 个, 每个离子具有相同的初始平动能, 且离子的出射方向均沿着  $X$  轴方向 (原因详见第 3 节描述)。

在静电透镜工作电压的作用下, 离子图像的半径  $R$  与所对应的离子初始平动能  $E_T$  以及离子飞行时间  $t$  满足以下关系式:

$$N = \frac{R}{t} \cdot \sqrt{\frac{m}{2E_T}}, \quad (1)$$

其中:  $N$  为谱仪的图像放大率;  $m$  为离子质量。把  $t \propto \sqrt{m/q \cdot V}^{[18]}$  代入公式(1)得:

$$R \propto N \cdot \sqrt{\frac{E_T}{q \cdot V}}, \quad (2)$$

其中:  $q$  为离子的电荷数;  $V$  为静电透镜的工作电压。

谱仪的图像放大率  $N$  是通过测定离子的二维图像标定离子绝对平动能的重要参数之一。文献[2]中已经通过模拟证实, 当谱仪的几何结构和聚焦条件确定时, 图像放大率  $N$  依赖于离子源沿  $Y$  轴的具体位置, 即随着离子源在作用区沿着  $Y$  轴正方向移动时  $N$  值具有逐渐增加的趋势。在目前设计的谱仪中, 严格限束的分子束沿着  $Z$  方向传输并在作用区中心实现交叉碰撞, 使得离子源在  $Y$  轴的具体位置可视为一固定值; 相反, 离子源在  $Z$  轴方向的具体位置敏感依赖于离子产生的实际位置 (见下文对延迟电离的描述)。因此, 通过理论模拟探索图像放大率  $N$  随离子源沿  $Z$  轴具体位置的变化关系尤为重要。在模拟中我们设定离子的初始平动能为 1 eV, 静电透镜工作电压为 5500 V, 得到了离子源在  $Z$  轴不同位置的图像放大率  $N$  (如图 3 所示), 结果显示离子源沿着  $Z$  轴正向移动时  $N$  值具有整体降低的变化趋势。值得注意的是, 在作用区中心附近  $Z = 0 \sim 4$  mm 的较大区间内, 其放大率  $N$  值基本保持不变。

设计和搭建本套谱仪的主要目的是实现对离子初始平动能的高精度测量。由公式(2)可知, 当图像放大率  $N$  看作一定值时, 离子的初始平动能  $E_T$  只与离子图像的半径  $R$  和静电透镜工作电压  $V$  相关。在此定义谱仪测量具有特定能量  $E_T = 1/2 \text{ mv}^2$  的离子的动能分辨

率为:

$$\frac{\Delta E_T}{E_T} = 2 \cdot \frac{\Delta v}{v} = 2 \cdot \frac{N \cdot \Delta v \cdot t}{N \cdot v \cdot t} = 2 \cdot \frac{\Delta R}{R}, \quad (3)$$

其中:  $t$  为具有相同速度矢量的离子的飞行时间;  $\Delta R$  为该速度矢量下离子到达探测器的径向分布宽度;  $R$  为离子到达探测器的径向分布平均半径。  $\Delta R$  和  $R$  随离子平动能的变化具有非线性特征, 意味着谱仪的动能分辨率依赖于离子的初始平动能。对此, 我们首先设定静电透镜工作电压为一固定值, 模拟探索了本谱仪对不同初始平动能的分辨能力; 然后改变静电透镜的工作电压, 进一步模拟探索了谱仪的动能分辨率随静电透镜工作电压的变化关系。模拟结果展示在图 4 中, 可以明显看出: (1) 当静电透镜工作电压一定时, 随着离子平动能的增加, 谱仪的动能分辨率大大提高; (2) 对特定的离子平动能, 静电透镜工作电压小的情况下谱仪具有较高的动能分辨率。为了与先前工作已搭建的谱仪进行比较, 我们呈现出本谱仪在静电透镜工作电压为 2000 V、离子的平动能为 1 eV 时的动能分辨率约为 0.4%。这一结果明显好

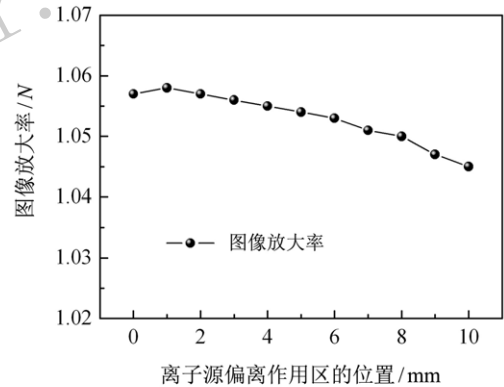


图 3 图像放大率  $N$  随离子源中心沿  $Z$  轴具体位置的变化关系曲线

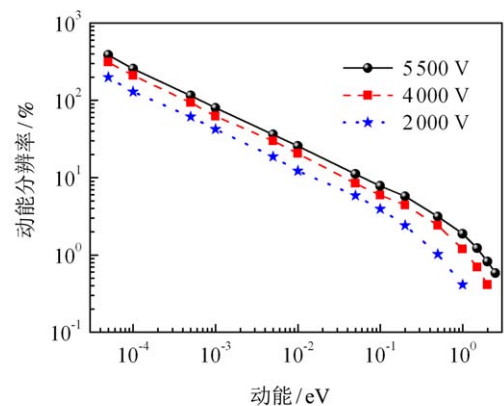


图 4 (在线彩图) 谱仪的动能分辨率随离子平动能和静电透镜工作电压的变化关系

于近期文献[19-20]所报道的动能分辨率。

由于纳秒激光-C<sub>60</sub> 碰撞过程中会发生微秒尺度的延迟电离过程<sup>[13]</sup>。延迟电离过程带来的主要后果是，在给定的延迟时间窗内离子产生的实际位置偏离了激光束与分子蒸气靶束的交叠区，并且随着延迟时间窗的后移，离子偏离交叠区的距离越来越大。下面通过模拟来分析延迟电离过程对速度成像质量的影响。在模拟过程中，设置静电透镜的工作电压为 5 500 V，平动能为 1 eV 的离子沿着 X 轴正方向出射，模拟结果如图 5 所示。结果发现，随着离子源沿着 Z 轴正向移动谱仪的动能分辨率逐渐变差。当离子源偏离作用区中心位置的距离小于 4.0 mm 时，动能分辨率变化缓慢(仅从 2% 变到 3%)。实验中设置炉温 900 K 时，对应 C<sub>60</sub> 蒸气束的平均

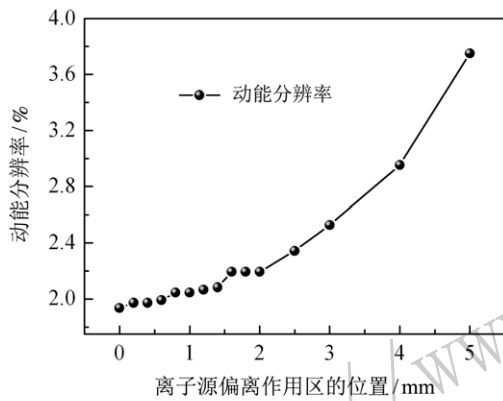


图 5 模拟谱仪的动能分辨率随着离子源在 Z 轴方向不同位置的变化关系

速率约为 200 m/s，此种情况下，分子蒸气束沿 Z 轴正向移动 4.0 mm 需要 20 μs 的时间。因此，该模拟结果暗示了本谱仪可轻松对 0 ~ 20 μs 延迟时间窗内产生的所有离子实现较好的速度聚焦。

### 3 实验测试与讨论

C<sub>60</sub> 固体粉末(纯度 ≥ 99.5%) 放置于炉胆中，加热使其形成 C<sub>60</sub> 分子蒸气束。限束后的分子束在作用区中心位置与 Nd: YAG 激光器产生的二倍频 532 nm 脉冲激光束垂直交叉碰撞。C<sub>60</sub> 分子首先被激发，然后产生一价态的母体离子，带电母体形成后就会感受到静电透镜的电场并立刻被加速飞向二维位置探测器。离子的飞行时间和位置信号分别被示波器和置于荧光屏后的 CCD 相机接收并由计算机存储和处理(图 6)。本套离子探测系统有两种工作模式：“No Gating” 和 “Synchronous Gating” 工作模式。选择 “No Gating” 工作模式时，利用数字示波器采集 MCP 探测器输出的快离子信号实现离子飞行时间质谱信息的获取。选择 “Synchronous Gating” 工作模式时，利用门控单元(IGC2) 给脉冲电源(GM-MCP-2) 一个时间脉冲信号，然后把这个时间脉冲信号转化为 500 V 脉冲高压信号施加到第二块 MCP 上，以此控制探测器的“开关门” 状态(门宽度可窄至 10 ns)。在 “Synchronous Gating” 工作状态下，谱仪可以实现对所选定荷质比的离子进行切片成像。

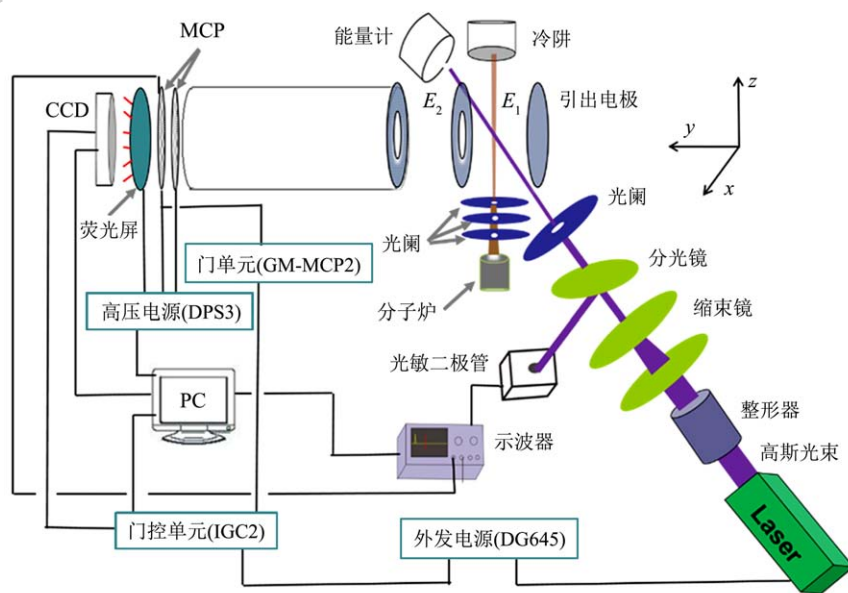


图 6 (在线彩图) 测试谱仪工作性能的实验装置示意图  
其中双场静电透镜的电场  $E_1/E_2 = 4.3:10$ 。

本谱仪的探测系统固定第一片MCP探测器的前表面电势为零。为提高 $C_{60}^+$ 离子的探测效率,实验中选取了较高的静电透镜工作电压(在此选用5500 V)、分子炉的工作温度稳定在900 K。首先设置谱仪工作在“*No Gating*”模式下,并利用示波器采集到的 $C_{60}^+$ 离子质谱如图7所示。 $C_{60}^+$ 离子的飞行时间质谱拖了一条微秒尺度的尾巴,这种长时间延伸的“尾巴”是延迟电离的典型特征。

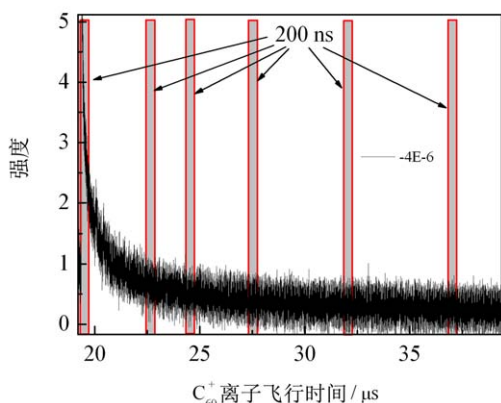


图 7 (在线彩图)  $C_{60}^+$ 离子飞行时间质谱和时间切片示意图

为了准确测定本谱仪的工作性能,在保持相同的

实验条件下将谱仪设置为“*Synchronous Gating*”工作模式,对不同延迟时间窗内的 $C_{60}^+$ 离子进行了切片成像,每次切片成像时选取了相同的时间门宽度(200 ns,见图7)。图8展示了不同延迟时间下母体 $C_{60}^+$ 离子在XZ平面的二维图像。所得图像均为细条状分布结构,Z方向的条状位置结构对应了分子蒸气靶束的麦克斯韦速率分布。我们对 $C_{60}^+$ 离子的二维图像向Z轴进行投影发现(见图9),不同延迟时间下的离子强度分布很好地重合在一起。该实验结果表明本谱仪可以轻松地对0~17  $\mu s$ 延迟时间窗内产生的所有离子具有几乎相同的速度聚焦效果。这一测试结果与上述模拟结果吻合得很好。

不同延迟时间下的二维图像在X方向的投影后的离子强度分布信息,将会给出本谱仪中分子炉装置产生的分子束在垂直于其传输方向(X方向)的热平动能弥散。我们进一步分析了0~17  $\mu s$ 内分子束在X方向强度的位置分布信息,位置分布通过公式(1)转化为对应的动能分布,最后得出在不同延迟时间窗口下 $C_{60}^+$ 离子动能分布半高全宽随延迟时间的依赖关系(见图10)。结果显示,当延迟时间从0  $\mu s$ 变为17  $\mu s$ 过程中,获得分子束在X方向的动能分布半高全宽从0.57 meV降到0.37 meV。

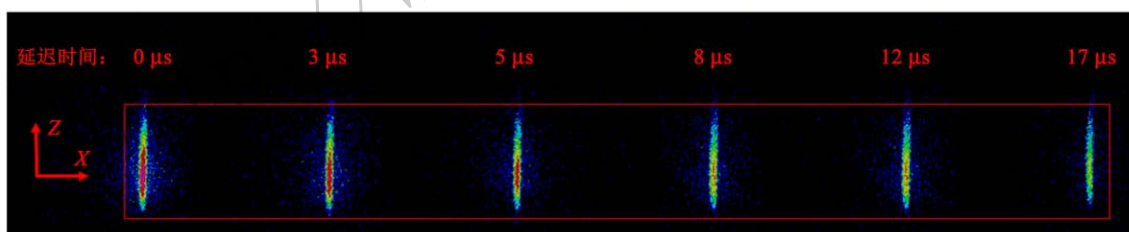


图 8 (在线彩图) 实验测得的不同延迟时间窗内  $C_{60}^+$ 离子二维图像

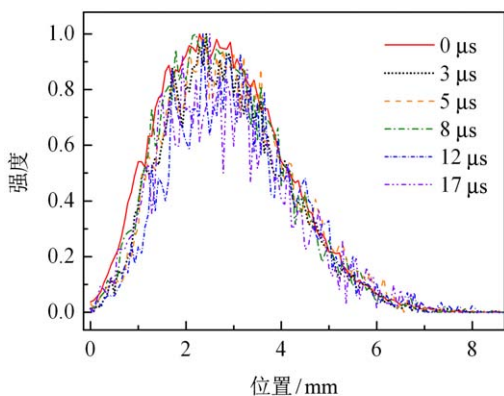


图 9 (在线彩图) 对图8中不同延迟时间下的二维图像在Z方向的投影(均作了归一化处理)

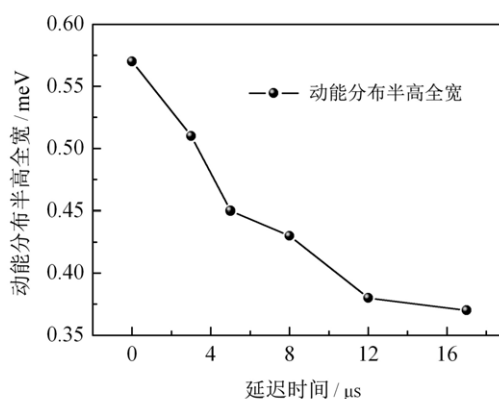


图 10 在5500 V工作电压下,  $C_{60}^+$ 离子在X方向的动能分布半高全宽随延迟时间的依赖关系

以上实验结果可通过考虑谱仪的固有分辨和离子间的库仑耦合效应给予解释。我们知道, 单个激光脉冲对应特定延迟时间门内产生了多个  $C_{60}^+$  离子, 这些几乎相同时间内产生的离子之间具有了强耦合库仑排斥作用。离子的动能由以下两部分组成: 一部分是分子炉引起的热动能(准直后约为0.04 meV); 另一部分来自于  $C_{60}^+$  离子间的库仑排斥势。在延迟时间为0  $\mu\text{s}$  时, 通过实验中设定的炉温我们估算出  $C_{60}$  蒸气靶束在作用区的分子密度约为  $4 \times 10^9/\text{cm}^3$  (依据参考文献[21-23]估算), 从而估算出  $C_{60}^+$  离子的间距约为  $r \approx 6 \times 10^{-6}$  m, 根据离子间库仑势公式计算  $W = k \times QQ/r \approx 0.24$  meV。实验中测量到的延迟时间为0  $\mu\text{s}$  时, 离子流在  $X$  方向动能分布半高全宽约为0.57 meV。根据公式(3)可估算出设备测量能量为0.28 meV 的离子的动能分辨约为  $\Delta E/E_e = 2 \cdot (0.57 - 0.28)/0.28 = 207\%$ , 这一实验测定的动能分辨值与图4给出的5500 V工作电压下理论模拟得到的动能分辨值相符合。随着延迟时间的增加,  $C_{60}^+$  离子的数目逐渐减少, 对应着离子间的距离在不断加大, 因此对应着离子间库仑势降低。这一结果与实验测量到的离子流在  $X$  轴方向动能分布的半高全宽随着延迟时间的增加而减少相符合。当延迟时间为17  $\mu\text{s}$  时, 测得离子流在  $X$  方向动能分布半高全宽约为0.37 meV, 离子流密度降为0  $\mu\text{s}$  时的十分之一(即库仑耦合作用降为约0.12 meV)。因此, 对于动能为0.16 meV 的离子, 实验测定的动能分辨值(约为260%)与图四中的动能分辨值(约250%)相符合。以上分析, 进一步说明了我们通过实验测量的谱仪动能分辨与图4所示的理论模拟结果相符合。换言之本套谱仪具有了设计预期的高动能分辨能力。

## 4 结论

我们设计并搭建了一套具有高动能分辨率且适合于开展激光与分子束交叉碰撞实验的离子速度成像谱仪。理论设计过程中, 高动能分辨是通过细致调整静电透镜结构(电极片的数量, 尺寸和电场安排)和分子束限束装置的结构来实现。理论分析过程中, 充分考虑影响动能分辨的因素, 呈现出好于近期文献所报道的动能分辨能力的结果, 并进一步证明在0~20  $\mu\text{s}$  的延迟时间内具有较好的速度聚焦能力。我们基于搭建完成的设备开展了纳秒激光诱导  $C_{60}$  分子发生延迟电离过程的研究, 测量了  $C_{60}^+$  离子在  $X$  轴方向的动能分布随延迟时间的变化规律。这一测定的变化规律通过充分考虑谱仪的固有分

辨和离子间的库仑耦合效应给予了很好的解释, 并证实本套自行研制的速度成像谱仪具有高动能分辨能力。

## 参考文献:

- [1] CHANDLER D W, HOUSTON P L. *J Chem Phys*, 1987, **87**: 1445.
- [2] EPPINK A T J B, PAKER D H. *Rev Sci Instrum*, 1997, **68**: 3477.
- [3] CHANG B Y, HOETZLEIN R C, MUELLER J A, *et al. Rev Sci Instrum*, 1998, **69**: 1665.
- [4] WINTERHALTER J, MAIER D, HONERKAMP J, *et al. J Chem Phys*, 1999, **110**: 11187.
- [5] GEBHARDT C R, RAKITZIS T P, SAMARTZIS P C, *et al. Rev Sci Instrum*, 2001, **72**: 3848.
- [6] LIN J J, ZHOU J G, SHIU W C, *et al. Rev Sci Instrum*, 2003, **74**: 2495.
- [7] TOWNSEND D, MINITTI M P, SUITS A G. *Rev Sci Instrum*, 2003, **74**: 2530.
- [8] BAGUENARD B, PINARÉV J C, BORDAS C, *et al. Phys Re A*, 2001, **63**: 023204.
- [9] HOLLAND D M P, SHAW D A. *Chem Phys*, 2012, **409**: 11.
- [10] WANG X D, XUAN C J, FENG W L, *et al. J Chem Phys*, 2015, **142**: 064316.
- [11] QIAN D B, MA X, CHEN Z, *et al. Phys Chem Chem Phys*, 2011, **13**: 3328.
- [12] QIAN D B, MA X, CHEN Z Q, *et al. J Chem Phys*, 2014, **141**: 054307.
- [13] QIAN D B, MA X, CHEN Z Q, *et al. Chem Phys Lett*, 2009, **470**: 215.
- [14] ZHANG J H, TAO C, DAI D X, *et al. Chin Jour Chem Phys*, 1998, **11**: 491. (in Chinese)  
(张竞辉, 陶冲, 戴东旭, 等. 化学物理学, 1998, **11**: 491.)
- [15] ZHANG Y, WANG J, ZHENG Q S, *et al. Acta Phys-Chim Sin*, 2009, **25**: 661. (in Chinese)  
(张延, 王俊, 郑秋莎, 等. 物理化学学报, 2009, **25**: 661.)
- [16] TANG X F, ZHOU X G, NIUM L, *et al. Rev Sci Instrum*, 2009, **80**: 113101.
- [17] ZHANG J, ZHANG S A, YANG Y, *et al. Phys Rev A*, 2014, **90**: 053428.
- [18] WLELEY W C, MCLAREN I H. *Rev Sci Instrum*, 1955, **26**: 1150.
- [19] GARCIA G A, NAHON L, HARDUNG C J, *et al. Rev Sci Instrum*, 2005, **76**: 053302.
- [20] ZHEN C, TANG X F, ZHOU X G, *et al. Acta Phys-Chim Sin*. 2011, **27**: 1574. (in Chinese)  
(甄承, 唐小峰, 周晓国, 等. 物理化学学报2011, **27**: 1574.)
- [21] ABREFAH J, OLANDER D R, BALOOCH M, *et al. App Phys Lett*, 1992, **60**: 1313.
- [22] PIACENTE V, GIGLI G, SCARDALA P, *et al. J Phys Chem*, 1995, **99**: 14052.
- [23] JAENSCH R, KAMKE W. *Mol Materials*, 2000, **13**: 163.

## Velocity Map Imaging Spectrometer for Studying the Atomic Cluster Thermodynamics

ZHANG Xujie<sup>1</sup>, SHI Fudong<sup>2,3</sup>, QIAN Dongbin<sup>2</sup>, ZHANG Dacheng<sup>2</sup>,  
ZHU Xiaolong<sup>2</sup>, YANG Jie<sup>2</sup>, LI Xinzhong<sup>1</sup>, MA Xinwen<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Excitation temperature of fragmenting atomic clusters can be extracted from the initial kinetic energies of ionic products. To improve the accuracy of the temperature measurements, we have designed an ionic velocity map imaging spectrometer with high kinetic energy resolution. Firstly, based on the simulations using Simion8.0 software, the high resolution is obtained by adjusting the structure of the electrostatic lenses and collimation of molecular beam. According to theoretical analysis, it is proved that the spectrometer has a well defined kinetic energy resolution. Then, we have studied the delay ionization processes of  $C_{60}$  induced by nanosecond laser. A series of narrowed two-dimensional time-sliced velocity images of the  $C_{60}^+$  with increasing the delayed time were recorded. Analysis revealed that Coulomb force between  $C_{60}^+$  clusters in same laser shots will broaden the transverse distribution of 2D image. Considering the influence of Coulomb force on initial kinetic energy of  $C_{60}^+$  clusters, the high resolution has been proved by analysing the negative relationship between Coulomb force and delayed time. It indicates that the establishment of the spectrometer builds up a good basis for next experiments on the studies for molecular thermodynamics in atomic clusters.

**Key words:** atomic cluster; excitation temperature; ionic velocity map imaging spectrometer; kinetic energy resolution; delay ionization

<http://www.impcas.ac.cn>

**Received date:** 18 Dec. 2015; **Revised date:** 20 Jan. 2016

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (U1232122,10904152)

**Corresponding author:** QIAN Dongbin, E-mail: qiandb@impcas.ac.cn.