

文章编号: 1000-5641(2015)01-0178-08

飞秒激光场中甲醇产物离子的角分布

范晴飞, 杨 岩, 吴 华, 周 彬, 王 潇, 滕 憧, 孙真荣, 吴良平

(华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 利用直流切片离子成像技术结合飞行时间质谱技术, 我们研究了甲醇(CH_3OH)分子在 800 nm 飞秒激光场中的多光子解离和库仑爆炸过程. 获得了甲醇分子在光场中的飞行时间质谱和产物离子的切片影像, 分析得到了不同库仑爆炸通道碎片离子的动能分布和角度分布. 本文对比分析了 C-O 键断裂产生 H_2O^+ 的 H 转移通道和产生 OH^+ 的非 H 转移通道的角分布, 计算了不同激光强度下两个通道的各向异性参数 a_2 和 $\langle \cos^2 \theta \rangle$, 并根据产物离子角度分布与激光强度和离子价态的关系, 揭示了甲醇分子在飞秒光场中的准直机制为动力学准直.

关键词: 飞秒激光; 角度分布; 分子准直

中图分类号: O437 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2015.01.022

Angular distributions of photo-fragment ions of CH_3OH molecules in the femtosecond laser fields

FAN Qing-fei, YANG Yan, WU Hua, ZHOU Bin, WANG Xiao,
TENG Chong, SUN Zhen-rong, WU Liang-ping

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University,
Shanghai 200062, China)

Abstract: The multi-photon dissociation and coulomb explosion of methanol in the femtosecond laser field have been investigated by dc-slice imaging technique combined with time of flight mass spectroscopy. Time of flight mass spectroscopy and sliced images of fragment ions were obtained, and the kinetic energy release and angular distributions of photo-fragment ions were also measured. The kinetic energy release of CH_2^+ , H_2O^+ and CH_3^+ , OH^+ meet the conservation of momentum, it is proved that they come from process of Coulomb explosion. Based on the comparison of the migration pathway and non-migration pathway from the C-O bond cleavage, the intensity dependence of the anisotropy parameter a_2 and $\langle \cos^2 \theta \rangle$ values for each channel were calculated, which indicated the dynamic molecular alignments of methanol in the femtosecond laser fields dominates.

Key words: femtosecond laser; angular distribution; molecule alignment

收稿日期: 2014-03

第一作者: 范晴飞, 女, 硕士研究生, 研究方向为量子相干控制. E-mail: qingtianfeixiang@sina.com.

通信作者: 吴良平, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为配位化学, 超分子化学.

E-mail: lpwu@ied.ecnu.edu.cn

0 引言

甲醇分子作为最简单的醇类有机物被广泛研究. 1999年 S. Harich 等人^[1]利用飞行时间质谱研究了 CH_3OH 分子在中心波长 157 nm 的光解离动力学过程, 主要分析了三种 H 键解离和两种 H_2 消去的解离机制, 两种解离机制的通道分支比为 1:0.21. 日本 Yamanouchi 小组^[2-8]应用飞秒激光结合动量协同成像对 CH_3OH 分子及氘代甲醇分子 CD_3OH 和 CH_3OD 进行对比研究, 计算了不同通道的出射角参数 ($\cos^2 \theta$), 并讨论了 H 转移发生的时间特性. 孔祥蕾等人^[9]利用 25 ns 脉冲研究了不同载气条件下甲醇分子的飞行时间质谱, 实验发现高价离子来自含甲醇团簇的库仑爆炸过程, 这是首次在纳秒光场下观察到甲醇团簇的库仑爆炸. Tang 等人^[10]研究了 CH_3OH 分子在 80 fs, $10^{13} \sim 10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, 810 nm 不同激光强度下的飞行时间质谱. 研究发现 H^+ 角分布呈各向异性, 而其余离子角分布呈各向同性, 认为甲醇分子在强场下发生阶梯式解离.

库仑爆炸的产物离子角分布呈现各向异性, 一般采用两种机制解释^[11]: 几何准直 GA (Geometric Alignment) 和动力学准直 DA (Dynamic Alignment). 几何准直指分子在光场中发生电离时, 电离几率主要取决于分子主轴与激光偏振方向的夹角, 在特定偏振夹角方向时离子的角分布最窄. 几何准直占优时, 离子角分布与激光强度没有关系, 实验结果表现为离子角分布随激光功率几乎不发生变化. 在动力学准直过程中, 中性分子与光场相互作用产生诱导偶极矩, 诱导偶极矩反过来与光场发生作用产生扭矩, 迫使分子轴转向激光偏振的方向, 从而使解离产物集中分布在激光偏振方向. 因此当动力学准直占优时, 离子角分布与激光强度和离子价态关联密切. 实验过程体现在: 同一离子角分布随激光功率的升高各向异性更明显; 随激光功率的升高, 高价态离子比低价态离子具有更窄的角分布.

前人研究表明: 在 50-150 fs 的激光场中, 质量较轻的分子发生库仑爆炸时, 准直机制一般以动力学准直为主, 如 $\text{CO}_2^{[12]}$ 、 $\text{N}_2^{[13]}$ 、 $\text{CH}_3\text{Cl}^{[14]}$ 等; 而较重的分子在飞秒激光场的准直机制主要以几何准直为主, 如 $\text{CH}_3\text{I}^{[15,16]}$ 、 $\text{CH}_2\text{I}_2^{[17]}$. 因此推测质量较轻的 CH_3OH 分子在飞秒激光场中准直机制为动力学准直机制. 研究甲醇分子飞秒光场中的准直机制, 能更好地解释甲醇分子角分布呈各向异性的原因, 有利于我们理解甲醇分子发生库仑爆炸的过程.

CH_3OH 分子在飞秒激光场中发生 C-O 键断裂的两个通道:



H_2O^+ 离子的产生, 证明了 CH_3OH 分子与激光作用过程中存在 H 转移过程, 即 H 原子从 C 原子转移到了 O 原子上. H 转移过程是近几年研究的热点问题, 分析 H 转移过程对分子超快动力学的研究具有重要意义. 本文利用直流切片离子成像技术结合飞行时间质谱技术研究了甲醇 (CH_3OH) 分子在中等强度的飞秒激光场 ($10^{12} \sim 10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$) 中的多光子解离和库仑爆炸过程, 对不同激光强度下甲醇分子 (1) 和 (2) 两个反应通道的角分布进行了分析, 揭示了 H 转移过程对通道角分布的影响.

1 实验装置

实验过程是在一套直流切片离子成像系统上进行的, 详细实验装置参见文献^[14,18]. 直流切片离子成像系统包括真空作用区、分子束系统、飞秒激光系统、同步时序控制系统等仪器部分. 本文实验中所用的激光系统是由 Newport 公司生产的飞秒振荡级和飞秒放大级

组成的飞秒激光系统, 输出重复频率为 1 KHz, 脉冲宽度可达 35 fs, 中心波长为 800 nm 的水平偏振飞秒激光脉冲. 飞秒激光系统输出的激光经过二分之一波片和格兰棱镜, 激光的偏振方向为垂直于飞行质谱时间轴, 并平行于探测器的表面. 样品甲醇液体(>99.8%) 在束源腔形成的分子束经 skimmer 进入反应腔, 与激光进行作用. 时序采用 DG535 型数字延迟脉冲发生器, PMT(H7732-10) 收集飞行质谱, CCD(PI-MAXII) 采集切片离子图像.

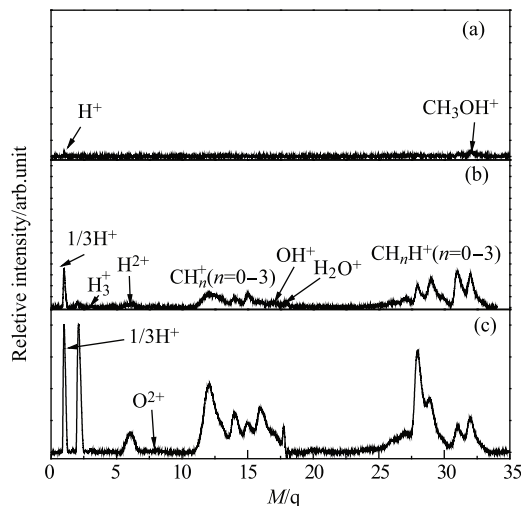


图1 CH_3OH 分子不同光场强度下的飞行时间质谱图

(a) $2.3 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $5.8 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $1.0 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

Fig. 1 The TOF-MS of methanol at different laser intensity

(a) $2.3 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $5.8 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $1.0 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

2 实验结果

实验过程采集了不同激光强度下甲醇分子的飞行时间质谱. 从质谱可见: 在飞秒激光的作用下, 甲醇分子产生了大量的碎片离子, 主要为 C-H 键和 C-O 键断裂的碎片离子: $\text{H}_n^+ (n = 1-3)$, C^{2+} , $\text{CH}_n^+ (n = 0-3)$, $\text{CH}_4^+ (\text{O}^+)$, OH^+ , H_2O^+ , $\text{CH}_n\text{OH}^+ (n = 0-3)$ 离子, 其中 O^+ , CH_4^+ 以及 $\text{CH}_3\text{OH}^{2+}$ 质荷比都是 16, 故质谱图上无法分辨.

通过分析不同激光强度下甲醇分子的飞行时间质谱, 获取了以下信息: ① 在低功率时母体离子 CH_3OH^+ 产率最高, 随激光功率的升高, H^+ 和 CH_2OH^+ 离子的产率逐渐超过了 CH_3OH^+ . 由此可见, 随着激光功率的升高, CH_3OH^+ 易发生解离. ② 质谱图上观察到了 H_2O^+ 离子, 但是不能排除 H_2O^+ 是甲醇中微量杂质水份或者腔内残存水份电离产生的母体离子.

为了更好地分析 CH_3OH 分子在飞秒光场的电离和解离过程, 我们利用直流切片离子成像技术对甲醇分子进行了深入探究. 图2为激光强度 $5.8 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, CH_2^+ 、 H_2O^+ 和 CH_3^+ 、 OH^+ 的伪彩色离子切片影像及速度分布. 根据两体库仑爆炸的特征, 爆炸后的碎片离子应满足动量守恒定律, 即

$$\frac{\text{KER}(X^{p+})}{\text{KER}(Y^{q+})} = \frac{M(X^{p+})}{M(Y^{q+})}. \quad (3)$$

式(3)中, X , Y 分别代表不同的碎片离子, p , q 表示离子 X , Y 携带的电荷数. 将所得动能值和质量数带入公式, 通道(1)和(2)的计算结果基本满足公式(3). 考虑到实验中探测器的

系统误差以及实验数据处理过程中引入的人工误差, 通常认为误差 $\leq 5\%$ 为合理误差. 通道 (2) 和 (1) 的相对误差因子经计算分别为 5.00% 和 0.97%, 认为误差在可接受范围内, 表明这两个通道确实存在.

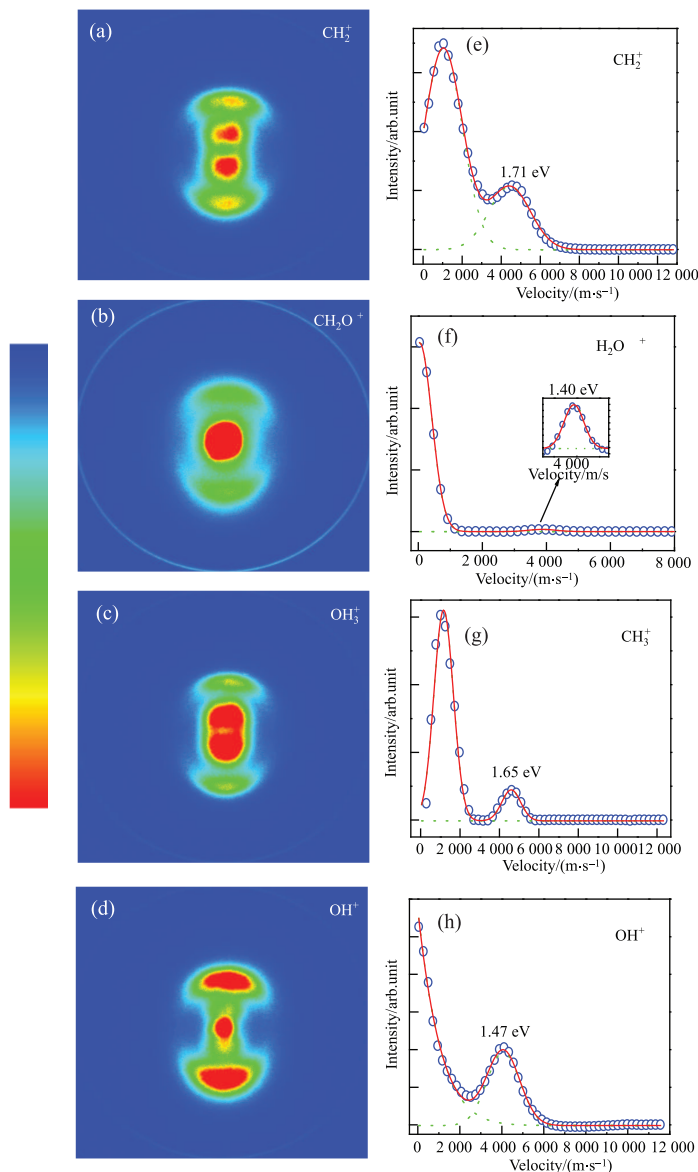


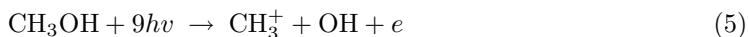
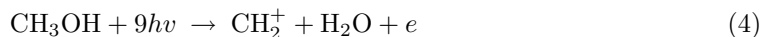
图 2 $5.8 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 激光强度时 CH_2^+ 、 H_2O^+ 和 CH_3^+ 、 OH^+ 伪彩色处理离子切片图像以及对应离子的速度分布. 圆圈(o)代表实验数据曲线, 绿色线(...)代表各个峰的高斯拟合曲线, 红色(—)线代表高斯拟合叠加后的速度分布曲线

Fig. 2 The pseudo-color sliced images and the corresponding KER distributions of CH_2^+ , H_2O^+ and CH_3^+ , OH^+ in the laser intensity of $5.8 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. The circles (o) denote the experiment data, the green lines (...) are the simulated distributions and the red lines (—) are the fitting peaks

值得注意的是, H_2O^+ 离子切片图像由一个较强的中心圆点和一个较弱的外环构成, 表

示 H_2O^+ 离子的动能包含两个能量组分, 其中一个能量组分动能接近于 0. 零动能组分来源于杂质水分子的直接电离, 而非零动能的外环部分来自 CH_3OH 分子库仑爆炸的 H 转移通道.

CH_2^+ 和 CH_3^+ 切片图像上除了有外环部分, 还有非零低动能分布的内环, 低动能的离子信号可能来源于 CH_3OH 分子的多光子解离过程, 推测发生的通道为



为验证上述通道, 应用 Gaussian09 软件 MP2-6-311++G(d, p) 基组计算了上述通道的出现势和可资用能, 计算结果见表 1. 计算结果发现 (4) 和 (5) 通道中产物的总动能均小于理论计算的通道可资用能, 表明具有较低动能的 CH_2^+ 和 CH_3^+ 离子确实来源于 CH_3OH 分子的多光子解离过程.

表 1 不同电离解离通道的出现势、可资用能以及实验中产物离子对应的动能值

Tab. 1 The appearance energy, available energy and the corresponding kinetic energies

for dissociative ionization channels are listed			
Channels	Appearance Energy/ev	Available Energy/ev	KERs/ev
(4)	13.54	0.41	0.25
(5)	13.53	0.42	0.25

3 讨论分析

3.1 不同通道产物离子的角度分布

不同离子的角分布一般用 $I(\theta)$ 表示, θ 表示出射离子与激光偏振方向的夹角. 通常, $I(\theta)$ 利用勒让德多项式拟合, 表达式为

$$I(\theta) = 1 + \sum_L a_L P_L(\cos^2 \theta) \quad (L = 2, 4, 6). \quad (6)$$

式(6)中, a_L 表示 L 阶勒让德多项式的系数. 利用公式 (6) 对离子的角分布进行三阶拟合, 得到勒让德多项式的系数 a_2 、 a_4 和 a_6 . 其中 a_2 是反映离子前驱体寿命的重要参数, 碎片离子的 a_2 值越大, 表明离子前驱体的寿命越短, 碎片离子的角分布相应越窄.

考虑到实验在 $5.8 \times 10^{12} \sim 1.0 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的飞秒激光场中进行, 我们又引入 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 表征不同碎片离子在库仑爆炸过程中的角分布, 即

$$\langle \cos^2 \theta \rangle = \frac{\int I(\theta) \cos^2 \theta \sin \theta d\theta}{\int I(\theta) \sin \theta d\theta}. \quad (7)$$

$\langle \cos^2 \theta \rangle$ 称为出射角余弦函数的数学期望值(expectation value of squared-cosine). Yamanouchi 小组认为 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 值越大, 母体离子经历的库仑排斥面越陡峭, 母体离子解离的速度越快, 而碎片离子前驱体的寿命越短, 碎片离子角分布的各向异性越明显. 为表征通道(1)和(2)产物离子的各向异性, 利用最小二乘法对产物离子的角分布进行了三阶拟合, 获得激光强度 $1.0 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时爆炸产物的 a_L 值和 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 值, 结果参见表 2.

当激光强度为 $1.0 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, $\langle \cos^2 \theta \rangle = 0.67(\text{OH}^+)$, $\langle \cos^2 \theta \rangle = 0.60(\text{H}_2\text{O}^+)$, $a_2 = 2.54(\text{OH}^+)$, $a_2 = 2.02(\text{H}_2\text{O}^+)$. 分析发现 H_2O^+ 的角分布比 OH^+ 的宽, 即 H 转移通道角分布的各向

异性相对较弱. 我们认为H转移发生的过程中, H原子在转移的同时也发生分子的转动, 其转动削弱了部分各向异性, 使H转移通道角分布各向异性减小.

表 2 $1.0 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时不同离子的角分布参数

Tab. 2 The angular distribution of different ions with the laser intensity of $1.0 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

ions	a_2	a_4	a_6	$\langle \cos^2 \theta \rangle$
OH^+	2.542	1.165	0.378	0.667
H_2O^+	2.029	0.940	0.171	0.601

3.2 准直机制

碎片离子角分布呈各向异性说明分子在飞秒激光场中发生了准直效应. 根据动力学准直机制的定义, 极性分子处于足够强的电场中会产生诱导偶极矩, 诱导偶极矩会反过来与光场作用产生扭矩, 这个扭矩迫使分子轴朝着激光偏振方向取向. CH_3OH 分子为 C_s 对称的极性分子, 满足动力学准直的条件.

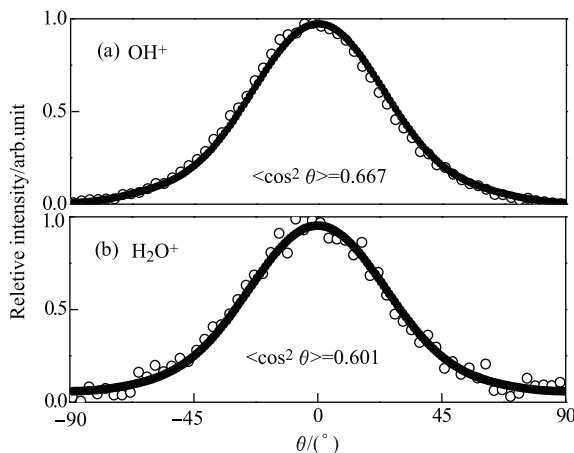


图 3 OH^+ 、 H_2O^+ 的角分布曲线以及理论拟合曲线. 其中(o)代表实验数据, (●)勒让德多项式拟合曲线

Fig. 3 The angular distribution of OH^+ , H_2O^+ . The blue circles (o) denote the experimental data, and the red dots (●) are the simulated distributions by Legendre polynomial

以 H_2O^+ 和 OH^+ 为例, 我们分析了 CH_3OH 分子发生库仑爆炸产物离子的角度分布及拟合曲线, 如图 3 所示. 从图 3 观察到, H_2O^+ 离子和 OH^+ 离子的角分布在 0° , 即平行于激光偏振方向时, 离子的信号最强, 在垂直于激光偏振方向, 产率几乎为 0, 这表明几何准直不是离子角分布呈各向异性的主要原因. 因为几何准直占优时, 激光强度达到某一程度, 垂直于偏振方向的分子也会发生电离现象, 而动力学准直为主时, 垂直于偏振方向的信号几乎看不到. 由此可见, CH_3OH 分子碎片离子角分布的各向异性不是几何准直引起的.

结合上文分析, 我们又研究了激光强度对角分布的影响. 从图 4 可见, OH^+ 离子的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 值始终比 H_2O^+ 离子的大, 且每个离子的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 值都随激光强度的增强逐渐增大. 较大的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 值, 对应分子轴和激光偏振方向的夹角较小, 爆炸产物集中在激光偏振方向, 分子的电离率大, 因此 H 转移通道的产率比非 H 转移通道的低. 这与文献 H 转移通道与非 H 转移通道产率比 0.5^[3]吻合.

产物离子的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 值随激光强度的增强逐渐增大, 表明离子角分布的各向异性与激光强度关联密切, 符合动力学准直的特征. 随着光强增强, 一方面诱导偶极矩反过来与光场作用产生

的扭力变强; 另一方面光强增强使准直需要的时间缩短, 两方面的作用使碎片离子的角分布变窄^[19].

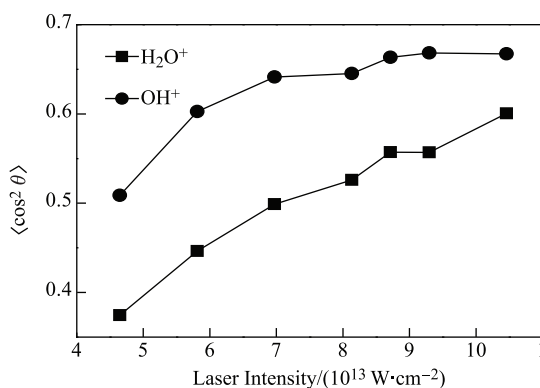


图4 不同离子 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 随激光强度变化的曲线图, (■)为 H_2O^+ , (●)为 OH^+

Fig. 4 Laser intensity dependence of the $\langle \cos^2 \theta \rangle$ of different ions, (■): H_2O^+ . (●): OH^+

为进一步确定 CH_3OH 分子的准直机理, 我们还讨论了不同价态碳离子 C^{2+} 和 C^+ 的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 随激光强度变化的规律, 如图5所示. C^{2+} 的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 值从0.35迅速增加到0.60, 而 C^+ 从0.48缓慢变化到0.59. 可见随着功率的升高, C^{2+} 角分布的各向异性比 C^+ 更明显. 高价态的碳离子比低价态的碳离子随激光强度角分布变化明显, 这也是动力学准直的特征. 动力学取向机制起主导作用时, 碎片离子随着价态的升高, 在光场中感生到的诱导偶矩变大, 分子被准直的程度高, 相应的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 值随离子价态的升高而变化明显. 这充分肯定了动力学准直是甲醇分子在飞秒激光中主要的准直机制.

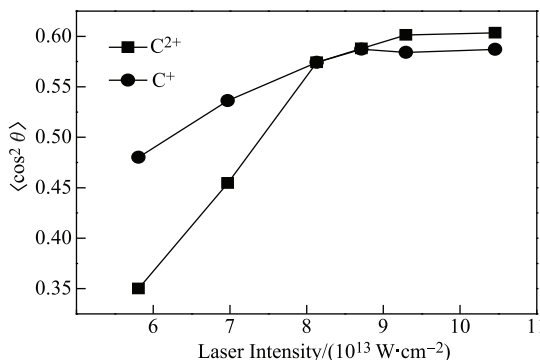


图5 不同价态碳离子的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$ 随激光强度变化曲线图. 其中, (■)为 C^{2+} 的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$, (●)为 C^+ 的 $\langle \cos^2 \theta \rangle$

Fig. 5 Laser intensity dependence of $\langle \cos^2 \theta \rangle$ of singly and multiply charged fragment ions. (■): C^{2+} . (●): C^+

4 结 论

本文利用直流切片离子成像技术结合飞行时间质谱技术研究了甲醇(CH_3OH)分子在中心波长 800 nm, 脉宽 120 fs, 激光强度 $5.8 \times 10^{12} \sim 1.0 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 光场中的多光子解离和库仑爆炸过程. CH_2^+ , H_2O^+ 和 CH_3^+ , OH^+ 离子的动能皆满足动量守恒定律, 证明它们来自甲醇分子的库仑爆炸通道. 通过比较 H_2O^+ 离子和 OH^+ 离子的角度分布, 发现非H转移通道比H转移的角分布窄, 说明非H转移通道比H转移的产率高. 实验还观察到 H_2O^+ 离子和 OH^+ 离子随激光强

度的增强, 角分布都有变窄的现象; 另外随激光功率的升高, 高价态 C^{2+} 离子比低价态 C^+ 离子具有更窄的角分布. 这表明离子角分布与激光强度和离子价态关联密切, 揭示了甲醇分子在飞秒光场中的准直机制为动力学准直, 有利于我们更好地理解甲醇分子的库仑爆炸过程.

[参 考 文 献]

- [1] HARICH S, LIN J J, LEE Y T, YANG X. Photodissociation dynamics of methanol at 157 nm [J]. *J Phys Chem A*, 1999, 103: 10324-10332.
- [2] FURUKAWA Y, HOSHINA K, YAMANOUCI K, NAKANO H. Ejection of triatomic hydrogen molecular ion from methanol in intense laser fields [J]. *Chem Phys Lett*, 2005, 414:117-121.
- [3] OKINO T, FURUKAWA Y, LIU P, ICHIKAWA T, ITAKURA R, HOSHINA K, YAMANOUCI K, NAKANO H. Coincidence momentum imaging of ejection of hydrogen molecular ions from methanol in intense laser fields [J]. *Chem Phys Lett*, 2006, 419: 223-227.
- [4] OKINO T, FURUKAWA Y, LIU P, ICHIKAWA T, ITAKURA R, HOSHINA K, YAMANOUCI K, NAKANO H. Coincidence momentum imaging of ultrafast hydrogen migration in methanol and its isotopomers in intense laser fields [J]. *Chem Phys Lett*, 2006, 423: 220-224.
- [5] XU H, MARCEAU C, NAKAI K, OKINO T, CHIN S, YAMANOUCI K. Communication: Two stages of ultrafast hydrogen migration in methanol driven by intense laser fields [J]. *J Chem Phys*, 2010, 133: 071103.
- [6] OKINO T, FURUKAWA Y, LIU P, ICHIKAWA T, ITAKURA R, HOSHINA K, YAMANOUCI K, NAKANO H. Ejection dynamics of hydrogen molecular ions from methanol in intense laser fields [J]. *J Phys B: Atom Mol Opt Phys*, 2006, 39: S515-S521.
- [7] LIU P, OKINO T, FURUKAWA Y, ICHIKAWA T, ITAKURA R, HOSHINA K, YAMANOUCI K, NAKANO H. Three-body sequential Coulomb explosions of CH_3OD^{3+} induced by intense laser fields [J]. *Chem Phys Lett*, 2006, 423: 187-191.
- [8] XU H, MARCEAU C, NAKAI K, OKINO T, CHIN S, YAMANOUCI K. Communication: Two stages of ultrafast hydrogen migration in methanol driven by intense laser fields [J]. *J Phys Chem A*, 2011, 116: 2686-2690.
- [9] 孔祥蕾, 罗晓琳等. 纳秒强激光场中甲醇光电离产生高价离子的研究 [J]. *物理学报*, 2004, 53(5): 1340-1345.
- [10] TANG X, GAO L, WANG Y, WANG C, WANG S, KONG F A. Dissociation of methanol in intense femtosecond laser field [J]. *Chinese Sci Bull*, 2002, 47(23): 1973-1978.
- [11] POSTHUMUS J H, PLUMRIDGE J, THOMAS M K, CODLING K, FRASINSKI L J, LANGLEY L J, TADAY P F. Dynamic and geometric laser-induced alignment of molecules in intense laser fields [J]. *J Phys B: Atom Mol Opt Phys*, 1998, 31: L553-L562.
- [12] CORNAGGIA C, SCHMIDT M, NORMAND D. Coulomb explosion of CO_2 in an intense femtosecond laser field [J]. *J Phys B: Atom Mol Opt Phys*, 1994, 27: L123-L130.
- [13] MIYAZAKI K, SHIMIZU T, NORMAND D. Femtosecond-laser-induced alignment in Coulomb explosion of N_2 [J]. *J Phys B: Atom Mol Opt Phys*, 2004, 37: 753-761.
- [14] SUN S Z, YANG Y, ZHANG J, WU H, CHEN Y T, ZHANG S A, JIA T Q, WANG Z G, SUN Z R. Ejection of triatomic molecular ion from methyl chloride in an intense femtosecond laser field [J]. *Chem Phys Lett*, 2013, 581: 16-20.
- [15] MA R, WU C, XU N, XU N, HUANG J, YANG H, GONG Q H. Geometric alignment of CH_3I in an intense femtosecond laser field [J]. *Chem Phys Lett*, 2005, 415: 58-63.
- [16] GRAHAM P, LEDINGHAM K, SINGHAI R P, HANKIN S M, MCCANNY T, FANG X, KOSMIDIS C, TZALLAS P, TADAY P F, LANGLEY A J. On the fragment ion angular distributions arising from the tetrahedral molecule CH_3I [J]. *J Phys B: Atom Mol Opt Phys*, 2001, 34:4015-4026.
- [17] ZHANG X, ZHANG D D, LIU H, XU H F, JIN M X, DING D J. Angular distributions of fragment ions in dissociative ionization of CH_2I_2 molecules in intense laser fields [J]. *J Phys B: Atom Mol Opt Phys*, 2010, 43: 025102-025108.
- [18] YANG Y, FAN L L, SUN S Z, ZHANG J, CHEN Y T, ZHANG S A, JIA T Q, SUN Z R. Dissociative double ionization of 1-bromo-2-chloroethane irradiated by an intense femtosecond laser field [J]. *J Chem Phys*, 2011, 135(7): 064303.
- [19] GYO W, ZHU J Y, WANG B X, WANG Y Q, WANG L. Alignment effects of NO in femtosecond laser field [J]. *Chem Phys Lett*, 2007, 448: 173-177.

(责任编辑 李 艺)