

# 强激光中原子分子的 阿秒超快动力学

辛国国 刘 辉

(省部共建西部能源光子技术国家重点实验室,西北大学物理学院,  
光子学与光子技术研究所,西安市激光红外学会 710127)

氢原子中基态电子的经典轨道周期约为150阿秒。通常为了方便描述该量级的时间,人们用原子单位,一个原子单位时间约为24阿秒,这个时间尺度也被看作电子运动的自然时间尺度,要对如此快的运动过程进行直接测量的时钟则需要阿秒量级的分辨本领。为了探测超快过程,人们早在20世纪30年代就发明了频闪摄影术<sup>[1]</sup>,当频闪观测器的频率与被测对象的频率同步时,就能把被测对象的画面钉住而静态观察,这样就实现了对人眼来不及反应的快速过程进行清楚地观察。化学家Zewail使用飞秒脉冲光源作为频闪观测器<sup>[2]</sup>,即使用飞秒脉冲激光进行“泵浦-探测”实验,泵浦脉冲激发化学反应,与该脉冲具有一定时间延迟的探测脉冲对其演化过程进行逐帧成像并分析,从而实现了对于化学反应过程中的分子进行了实时观察,该研究获得了1999年诺贝尔化学奖。要对原子内电子的动态过程进行观察,则需要阿秒时间量级的脉冲才行。人们早在2001年就实现了脉冲宽度为250 as的阿秒脉冲串<sup>[3]</sup>和脉冲宽度为650as的独立的阿秒脉冲<sup>[4]</sup>。自此以后人们就期待将其运用于对电子运动的自然时间尺度实时观察和控制<sup>[5,6]</sup>,并由此开创了阿秒科学<sup>[7]</sup>这一新的科学研究领域。该研究领域具有多学科交叉的特色,涉及的学科包括原子分子物理、凝聚态物理、生物、医学、化学等各个学科<sup>[8]</sup>。本文主要对强激光场与原子分子相互作用中的高次谐波的应用、阿秒超快光电离动力学、阿秒超快电子关联动力学和阿秒瞬态吸收谱做一简要介绍,使人

们对原子分子内超快电子的动力学过程和探测技术有直观的认识。

## 1. 高次谐波的应用

阿秒脉冲主要通过强激光与原子分子相互作用产生的高次谐波实现,该过程在本系列文章的《阿秒脉冲的产生和测量》一文中进行了详细综述。高次谐波谱中包含了大量的原子和分子在电离和复合过程的超快动力学信息。利用这些信息,在过去二十多年的时间里,高次谐波已经被用于探测原子的强场隧穿过程、超快原子动力学过程和分子的电荷转移过程等,相关内容见综述性文献[9,10]。我们发现,高阶阈下谐波谱中包含着丰富的超快激发动力学信息<sup>[11]</sup>,从相应谐波中提取出原子和分子内更细致的超快激发动力学过程将是高次谐波重要的应用之一。

## 2. 阿秒超快光电离动力学

对于原子内电子的超快动力学探测是超快光学的最主要应用之一,通过超短脉冲与原子分子发生相互作用,超短脉冲中电场的振荡信息得以在光电子能谱和动量谱中体现出来<sup>[12]</sup>。通过控制强场可以在一个振荡周期内控制原子中电子的运动过程,从而产生出一系列非线性非微扰现象,比如阈上电离<sup>[13]</sup>和高次谐波的产生<sup>[14]</sup>。阈上电离指一个原子可以吸收比其电离所需的更多的光子而发生电

离,多出来光子的能量和动量会体现在光电子能谱和动量谱中。如图1所示,在光子能量为2.34 eV时,氙原子的光电子能谱中不仅显示出吸收一个光子的处于1.9 eV附近的光电效应能谱,且在3.3 eV附近有多吸收了一个光子的次级峰。光电子的能谱可以在实验中使用飞行时间质谱仪进行测量<sup>[15,16]</sup>,而动量谱可以通过冷靶反冲离子动量谱仪(COLTRIM)<sup>[17]</sup>和速度映射成像谱仪(VMIS)<sup>[18]</sup>进行测量。这些可以直接测到的光电子的能谱和动量谱中包含了丰富的超快动力学信息,成为了目前研究各种超快现象最重要的手段之一。

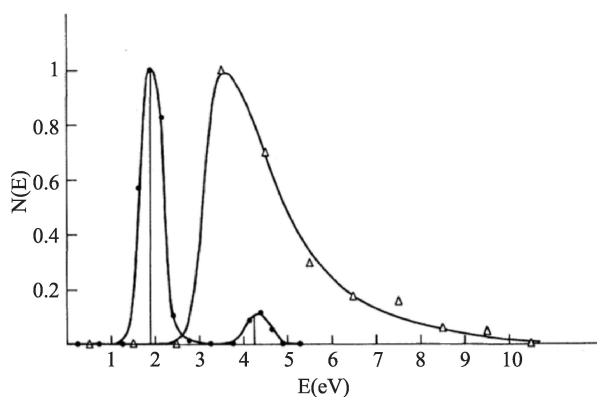


图1 两光子电离氙原子的光电子能谱。其中三角形的点对应的参数为  $\hbar\omega = 1.17$  eV,  $I = 4 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>,  $E_{\max} = 4$  eV; 圆圈的点对应的参数为  $\hbar\omega = 2.34$  eV,  $I = 8 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>,  $E_{\max} = 0.2$  eV, 其中  $E_{\max}$  表示电子能够从电场中获得的能量(摘自文献[13])

我们在电离电子微分动量分布中发现随着激光场强增强时在低能区出现了反常的少分布现象<sup>[19]</sup>,该现象无法用通常使用的强场近似模型描述。通过分析发现该现象对应于如图2所示的一种超快电子动力学——隧穿未电离动力学,即原子中的电子

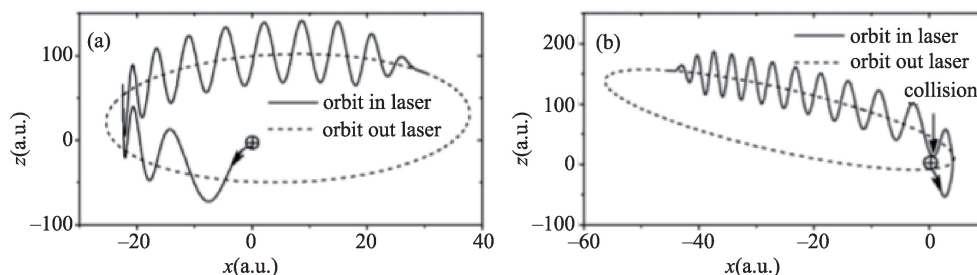


图2 处于存活窗口中的两类典型的轨道。在激光存在时为实线,激光关闭后的自由演化为虚线。图(a)为第一类轨道,在激光场关闭后电子沿一个稳定的椭圆运动,这对应于隧穿未电离动力学轨道;图(b)为第二类轨道,在激光场结束后电子与母体离子发生碰撞后最终电离(摘自文献[19])

在光场的作用下从光与原子库仑势形成的复合势垒中隧穿出来以后在光场中运动,然而处于未被加速到很高能量的相位上,因此之后一直处于未能电离的束缚态,在光场结束后处于一个如图2(a)中所示的虚线描述的很稳定的高里德堡态上。

通过对正交双色光中具有取向分子电离的微分动量谱分析,我们发现电子在隧穿电离的过程中其波包在势垒下存在两中心干涉现象<sup>[20]</sup>,该干涉导致与主光场偏振方向非平行和非垂直取向的分子电离后的光电子微分动量谱以主场轴作为对称轴出现左右不对称分布,其不对称度随着分子的取向角、光场的场强和频率而变化。

目前,使用阿秒光场直接对原子分子电离过程电子动力学探测的最重要的手段之一是被称为光场驱动阿秒条纹相机<sup>[21]</sup>的方法,通过控制一个包络内场的波形,然后使用各种波形的场电离原子或分子,就可以将其超快的动力学信息映射到最终的光电子角分布上。德国一个小组使用阿秒条纹相机实验实现了几十阿秒时间尺度的分辨本领,测得氙原子中2p态的光电离过程比2s态的光电离过程落后20阿秒<sup>[22]</sup>。

另一项测量光电离超快动力学的方法是“阿秒钟”方法<sup>[23-25]</sup>。其核心思想是使用近圆的椭圆偏振光电离原子,通过测量所得的光电子在偏振平面内的微分动量谱的最可几点相对于理论给出的最可几点的角度偏差来估计电子在电离过程中的时间延迟信息,进而推断电子的隧穿时间、势垒出口的位置、势垒出口处电子的纵向和横向动量分布以及

原子分子势能面构型等信息。光场旋转一圈构成了阿秒钟的钟面,而几率最大的光电子动量的矢量方向为指针,指向的时刻为电子穿出势垒的时刻<sup>[23]</sup>。该技术基于以下两点假定:(1)原子中束缚的电子在被外场压弯的势垒中隧穿电离出来,该电子穿入势垒的最可几时刻对应于峰值场强时刻。(2)隧穿出来的电子在激光场中加速运动,并最终打到探测器上,探测器测到的电子携带着从势垒穿出来时刻的光场矢势信息,利用该信息就可以推断出电子穿出势垒的时刻的相关信息。第(2)点中所述的穿出势垒的时刻相对于第(1)点中电子穿入势垒的时刻的时间延迟即为隧穿时间。该“阿秒钟”方法自从被提出来之后,电子隧穿电离的众多现象被迅速揭示出来,比如隧穿时间<sup>[23, 24]</sup>、非绝热隧穿过程、电子穿越势垒后的纵向和横向动量分布<sup>[25]</sup>等。而对该时间的起源问题也激发了人们的广泛讨论,目前被大多数人认可的观点为:该时间与能量相关的相位

移动相关,被称为Wigner时间延迟<sup>[26]</sup>。

最近,我们一系列的研究<sup>[26-30]</sup>表明:传统的“Simple-man模型”和“强场近似模型”并不足以描述阿秒钟实验规律。光场作用于原子或分子,一侧的库仑势被压低形成了一个势垒,电子在穿越势垒以后仍然处于长程库仑势中,并不能像“Simple-man模型”和“强场近似模型”模型描述的那样会瞬间发生电离,而是需要停留一段时间(100阿秒量级,如图3(b)和图3(d)所示)之后才能电离出去,我们称这段时间为延迟时间<sup>[27]</sup>或响应时间<sup>[28]</sup>,该时间会影响最终光电子的动量分布(如图3(c)所示),进而影响阿秒钟实验中作为指针方向的偏转角,事实上阿秒钟实验中测量的时间正是该响应时间,而不是之前人们认为的隧穿时间<sup>[23]</sup>或Wigner时间<sup>[26]</sup>。该响应时间和固有偶极矩导致了极性分子光电子微分动量谱沿着偏振方向的不对称分布,该不对称分布对测定分子取向度有潜在的应用<sup>[29]</sup>。

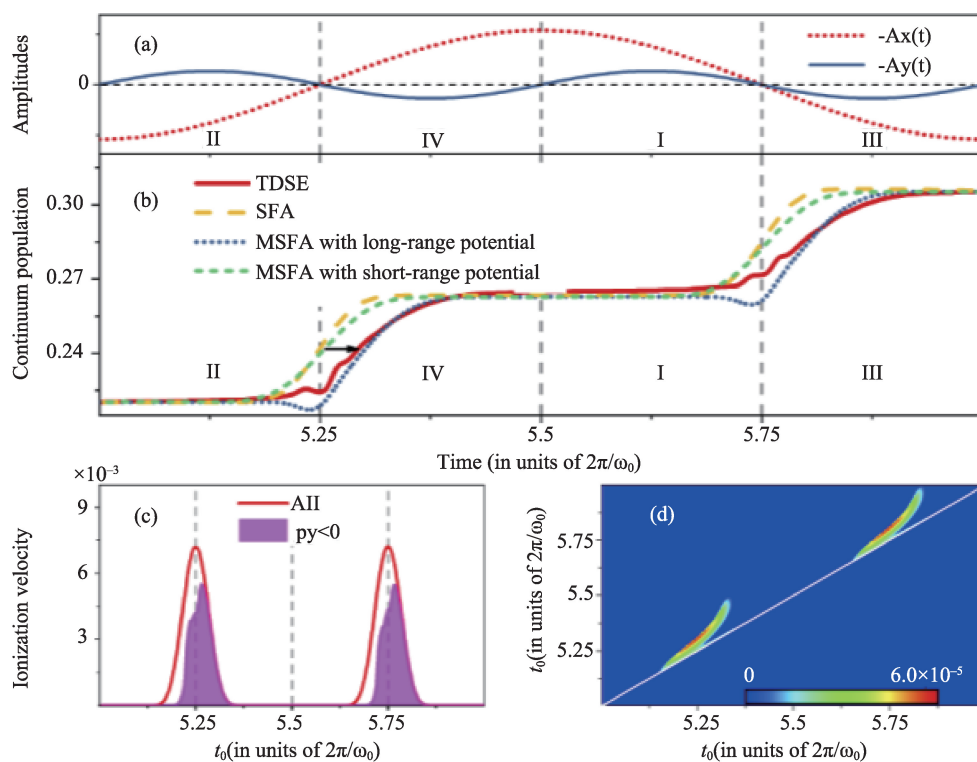


图3 电子电离过程的时间延迟。(a)计算中使用的正交双色激光场沿着主场(x)方向和垂直于主场(y)方向的电场矢势相反数的曲线;(b)用各种方法计算的电子电离率曲线;(c)贡献于最终电离的所有光电子和最终光电子沿着y方向动量小于0的初始时刻 $t_0$ (处于势垒出射点时刻)的分布;(d)初始时刻 $t_0$ 和电离时刻 $t_{con}$ 关联分布(摘自文献[27])



### 3. 阿秒超快电子关联动力学

在三步再散射模型中<sup>[31]</sup>,当隧穿后的电子被外场重新拉回到母体离子核附近时,该电子有可能与母体离子中的其他电子发生碰撞,最后连同该电子一起出来,导致非序列双电离现象<sup>[32]</sup>。控制阿秒再碰撞<sup>[33]</sup>为揭示多电子的相互作用和由再碰撞引起的多电子关联动力学提供了强大的工具。最近人们使用UV泵浦/EUV探测技术研究了氦原子中两个电子径向分布的演化过程<sup>[34]</sup>,向我们实时地展示了氦原子发生双电离的整个超快过程:如图4(a)所示,刚开始没有外场影响时,氦原子中的两个电子均处于基态 $1s^2$ ;在泵浦脉冲刚结束的时刻(如图4(b)所示),其中一个原子接近原子核而另一个电子远离原子核,该过程对应于单电子激发;随后,在探测光结束后250 as,由于探测光的作用,两个电子以一定几率的都远离原子核,从而发生了双电离。该技术体现了独立阿秒脉冲在电子波包超快动力学成像过程中的巨大作用,使用阿秒光泵浦或探测都可以将所关心的超快过程定格于一幅幅静态图片进行逐帧研究。

我们的研究发现在少周期脉冲中,电子的超快关联动力学与激光场的强度、载波包络相位(CEP)<sup>[35]</sup>

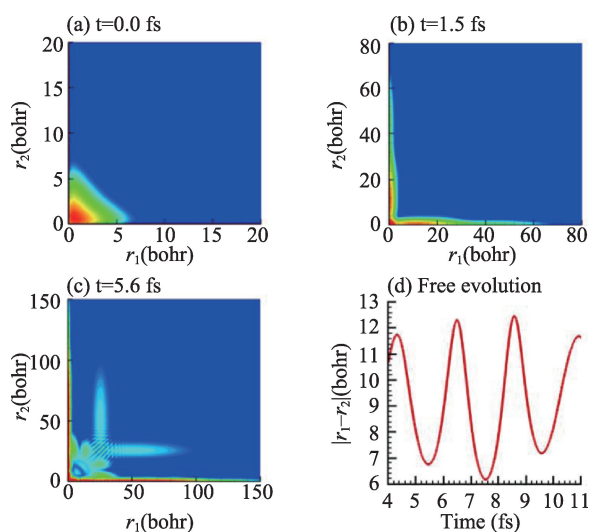


图4 两个电子在径向平面( $r_1, r_2$ )内的不同时刻的几率分布。(a)初始时刻处于基态的He原子;(b)极紫外泵浦光结束的时刻;(c)探测光结束后并自由演化250as的时刻;(d)归一化的电子间距 $|r_1 - r_2|$ 随时间演化的结果(摘自文献[34])

(如图5所示)、激光脉冲长度以及啁啾强度有关。例如:如图5所示,一三象限中的“V形结构”在低场强和高场强时更明显。在低场强时,该结构随着CEP从0到 $\pi/2$ 变化逐渐从第一象限往第三象限移动;然而在高场强时,该变化趋势正好相反。我们的研究结果说明两个电子的超快关联过程可以通过激光的光强、啁啾强度和CEP操控。

在此基础上,我们发现在圆偏振光<sup>[36]</sup>和高核电荷数原子<sup>[37]</sup>双电离过程中两个电子具有更复杂的超快关联动力学过程。如图6所示,在圆偏振光中,发生非序列双电离前,两电子往往会发生多次弱碰撞,从而使得第一个电子电离时刻和隧穿时刻以及第二个电子电离时刻与第一个电子电离时刻之间有很长的时间延迟。类似的多次碰撞现象在线偏振光场照射高核电荷数原子的非序列双电离过程中表现得依然很明显<sup>[37]</sup>。同时,我们对分子的非序列双电离也进行了系统的研究,发现分子中发生双电离的两个电子超快动力学同时受到分子的对称性和组成该分子的原子核运动的影响<sup>[38]</sup>。

### 4. 阿秒瞬态吸收谱

阿秒脉冲可以用于原子和分子的瞬态吸收谱中,第一种方案是使用一束少周期的飞秒可见或近红外脉冲激发样品,然后使用一束与该飞秒光具有一定时间延迟的阿秒光进行探测。在该类阿秒瞬态吸收谱中,飞秒脉冲影响了样品吸收截面,从样品中透射出来的与泵浦光和探测光时间延迟相关的阿秒脉冲的光谱使用极紫外光谱仪测量。每一时间延迟步测量一次极紫外光谱(阿秒光的透射光谱)。存在和不存在泵浦光时所测量的光强信息分别用 $I_{\text{on}}$ 和 $I_{\text{off}}$ 表示,测量到的吸收谱信息则为 $\text{Abs} = -\ln(I_{\text{on}}/I_{\text{off}}) = \alpha L$ ,这里 $\alpha$ 为吸收系数, $L$ 为样品的厚度。所使用的阿秒脉冲有很宽的光谱,因此可以探测到随泵浦和探测时间延迟时间相关的众多吸收特征谱线。第二种阿秒瞬态吸收谱的方案是使用阿秒脉冲光激发样品,然后使用一束延迟时间可以调控的X射线极紫外飞秒脉冲探测。按照这种

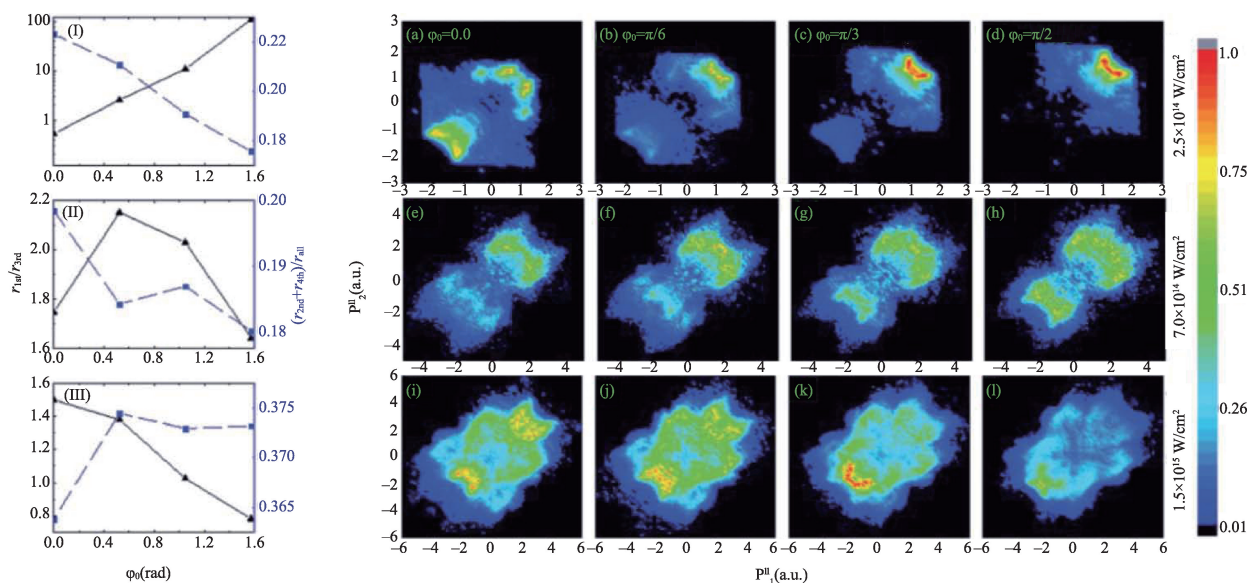


图5 He原子双电离的纵向动量关联谱。第一行到第三行的激光场强分别为  $2.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 、 $7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  和  $1.5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 。对于每个强度,彩色图片的第一到第四列分别表示激光CEP的值为  $0, \pi/6, \pi/3$  和  $\pi/2$ 。(I)、(II)和(III)图分别表示相应行的彩色图中第一和第三象限电子几率之比(黑色三角实线)及第二和第四象限几率之和与总几率之比(蓝色方块虚线)(摘自文献[35])

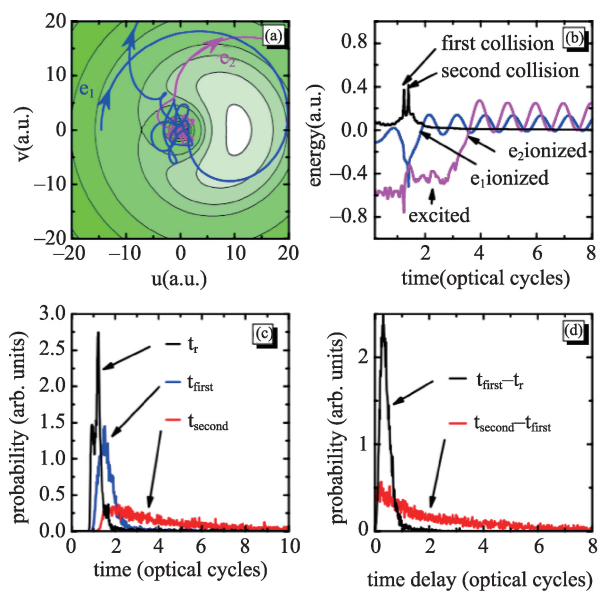


图6 典型的超快关联动力学轨道。(a)势能等高线和典型的非序列双电离轨道;(b)两个电子及其相互作用的势能随时间演化曲线;(c)再碰撞以及两个电子最终电离时刻的分布;(d)第一个电子最终电离时刻与再碰撞时刻延迟以及第二个电子最终电离时刻与第一个电子最终电离时刻延迟的分布(摘自文献[36])

方案,阿秒光用于激发出各种激发态,从而产生持续的振荡偶极矩,接下来使用飞秒脉冲通过将不同的束缚态或束缚态与激发态之间耦合起来,从而对这些偶极矩产生扰动。由于振荡的偶极矩会向外

辐射光场,因此探测光可以影响从样品中透射出来的光谱,该光谱也与泵浦-探测光的时间延迟有关。通过对不同时间延迟的瞬态吸收谱进行分析,就可以获得超快时间分辨本领的原子或分子中电子的超快动力学过程。

人们使用阿秒瞬态吸收谱已经成功地对氩原子的电离态中电子的运动过程进行了实时探测<sup>[39]</sup>。使用一束强少周期红外脉冲光电离氩气体,随后使用一束时间延迟的孤立阿秒脉冲照射同样的气体样品,如图7所示在  $76\sim 96 \text{ eV}$  具有较强的吸收线,这提示了该原子在  $4p\sim 3d$  能级间发生了跃迁,而且该吸收谱随着这两束脉冲的时间延迟而发生变化,从该含时吸收谱中可以获得电子跃迁的动态信息,在时间延迟  $< 1.25 \text{ fs}$  主要观察到的是  $\text{Kr}^+$  的  $4p^{-1}-3d^{-1}$  跃迁吸收谱,而从  $1.25 \text{ fs}$  开始,则出现了  $\text{Kr}^{2+}$  的  $4p^{-2}-4p^{-1}3d^{-1}$  跃迁吸收谱,在时间延迟  $2.5 \text{ fs}$  后出现了  $\text{Kr}^{3+}$  的  $4p^{-3}-4p^{-2}3d^{-1}$  跃迁吸收谱,对该含时吸收谱进行分析可以获得电子和离子之间相互纠缠的动态过程。这些观测结果为人类深入理解原子分子内超快的量子动力学过程奠定了基础。

我们的计算表明电子的交换关联作用也会在

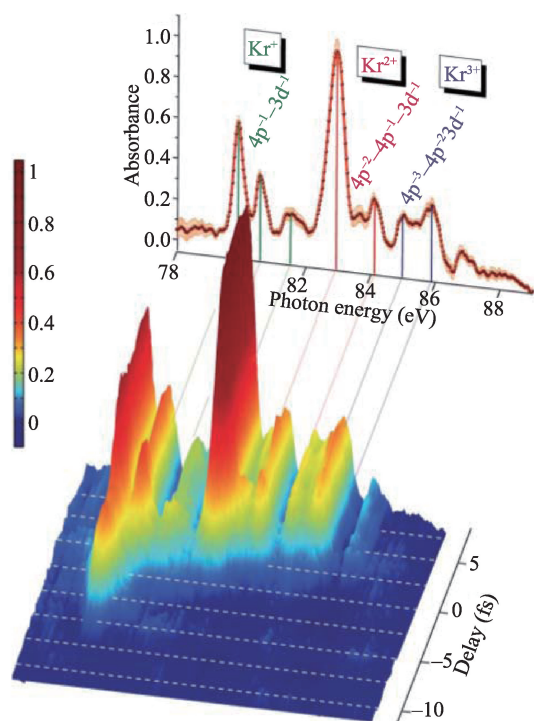


图7 氪原子的瞬态吸收谱(摘自文献[39])

阿秒瞬态吸收谱中得以体现,并对该吸收谱的强度、主吸收峰的位置以及次级吸收峰的相对强度均有较大的影响<sup>[40]</sup>,这些结果为运用阿秒瞬态吸收谱探测原子内的电子超快动力学提供了一些参考。

## 5. 总结和展望

随着超短激光技术的不断发展,人类对原子分子中电子的超快动力学认识得越来越深刻。一方面,使用飞秒激光操控被电离的电子再返回到母体离子附近并与该离子复合而释放高次谐波,从而产生脉冲宽度越来越短的阿秒脉冲;另一方面通过对强激光场与原子分子相互作用而产生的高次谐波谱、电离电子谱、非序列双电离电子关联谱和阿秒瞬态吸收谱进行分析,获得原子内电子自然时间尺度的超快动力学过程,为测量并操控瞬态量子动力学提供了一种可行的途径。今后,阿秒技术将进一步应用于对原子分子各壳层的电子动力学进行实时观测和控制,以实现更精准的光控化学反应和产生满足各种需求的人工原子和分子。

## 参考文献

- [1] H. E. Edgerton, Stroboscopic moving pictures, *Electrical Engineering*, 50(5) (1931)327-329.
- [2] A. H. Zewail, Femtochemistry: Atomic- Scale Dynamics of the Chemical Bond, *The Journal of Physical Chemistry A*, 104(24) (2000)5660-5694.
- [3] P. M. Paul, E. S. Toma, P. Breger, G. Mullot, F. Augé, Ph. Balcou, H. G. Muller, P. Agostini, Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation, *Science*, 292(5522) (2001) 1689-1692.
- [4] M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz, Attosecond metrology, *Nature*, 414(6863) (2001)509-513.
- [5] G. Sansone, L. Poletto, M. Nisoli, High-energy attosecond light sources, *Nature Photonics*, 5(11) (2011)655-663.
- [6] O. Smirnova. Attosecond prints of electrons, *Nature*, 466(7307) (2010)701-702.
- [7] P. B. Corkum, F. Krausz, Attosecond science, *Nature Physics*, 3(6) (2007)381-387.
- [8] F. Krausz, M. Ivanov, Attosecond physics, *Reviews of Modern Physics*, 81(1) (2009)163-234.
- [9] P. H. Bucksbaum, The Future of Attosecond Spectroscopy, *Science*, 317(5839) (2007)766-769.
- [10] F. Calegari, G Sansone., S. Stagira, C. Vozzi, M. Nisoli, Advances in attosecond science, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 49(6) (2016)062001.
- [11] 于术娟, 董福龙, 辛国国, H<sup>2+</sup>分子阈下谐波极化起源的理论研究, *西北大学学报(自然科学版)*, 48(3) (2018)349-354.
- [12] G. G. Paulus, F. Grasbon, H. Walther, P. Villoria, M. Nisoli, S. Stagira, E. Priori, S. De Silvestri, Absolute-phase phenomena in photoionization with few-cycle laser pulses, *Nature*, 414(6860) (2001)182-184.
- [13] P. Agostini, F. Fabre, G. Mainfray, G. Petite, N. K. Rahman, Free-Free Transitions Following Six-Photon Ionization of Xenon Atoms, *Physical Review Letters*, 42(17) (1979)1127-1130.
- [14] A. McPherson, G. Gibson, H. Jara, U. Johann, T. S. Luk, I. A. McIntyre, K. Boyer, C. K. Rhodes, Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases, *Journal of the Optical Society of America B*, 4(4) (1987)595.
- [15] Y. Uehara, T. Ushiroku, S. Ushioda, Y. Murata, High Resolution Time-of-Flight Electron Spectrometer, *Japanese Journal of Applied Physics*, 29(12R) (1990)2858.



- [16] W. C. Wiley, I. H. McLaren, Time of Flight Mass Spectrometer with Improved Resolution, *Review of Scientific Instruments*, 26(12) (1955)1150-1157.
- [17] J. Ullrich, R. Moshhammer, A. Dorn, R. Dorner, L. P. H. Schmidt, H. Schmidt-Backing, Recoil-ion and electron momentum spectroscopy: reaction-microscopes, *Reports on Progress in Physics*, 66(9) (2003)1463-1545.
- [18] D. H. Parker, A. T. J. B. Eppink, Photoelectron and photofragment velocity map imaging of state-selected molecular oxygen dissociation/ionization dynamics, *The Journal of Chemical Physics*, 107(7) (1997)2357-2362.
- [19] H. Liu, Y. Liu, L. Fu, G. Xin, D., J. Liu, X. T. He, Y. Yang, X. Liu, Y. Deng, C. Wu, Q. Gong, Low Yield of Near-Zero-Momentum Electrons and Partial Atomic Stabilization in Strong-Field Tunneling Ionization, *Physical Review Letters*, 109(9) (2012) 093001.
- [20] F. Gao, Y. J. Chen, G. G. Xin, J. Liu, L. B. Fu, Distilling two-center-interference information during tunneling of aligned molecules with orthogonally polarized two-color laser fields, *Physical Review A*, 96(6) (2017) 063414.
- [21] J. Itatani, F. Quéré, G. L. Yudin, M. Yu. Ivanov, F. Krausz, P. B. Corkum, Attosecond Streak Camera, *Physical Review Letters*, 88(17) (2002) 173903.
- [22] M. Schultze, M. Fieß, N. Karpowicz, J. Gagnon, M. Korbman, M. Hofstetter, S. Neppl, A. L. Cavalieri, Y. Komninos, Th. Mercouris, C. A. Nicolaides, R. Pazourek, S. Nagele, J. Feist, J. Burgdörfer, A. M. Azzeer, R. Ernstorfer, R. Kienberger, U. Kleineberg, V. S. Yakovlev, Delay in Photoemission, *Science*, 328(5986) (2010)1658-1662.
- [23] P. Eckle, A. N. Pfeiffer, C. Cirelli, A. Staudte, R. Dorner, H. G. Müller, U. Keller, Attosecond ionization and tunneling delay time measurements in helium, *science*, 322(5907) (2008)1525-1529.
- [24] N. Camus, E. Yakoboylu, L. Fechner, M. Klaiber, M. Laux, Y. Mi, K. Z. Hatsagortsyan, T. Pfeifer, C. H. Keitel, R. Moshhammer, Experimental Evidence for Quantum Tunneling Time, *Physical Review Letters*, 119(2) (2017) 023201.
- [25] N. Teeny, E. Yakoboylu, H. Bauke, C. H. Keitel, Ionization Time and Exit Momentum in Strong-Field Tunnel Ionization, *Physical Review Letters*, 116(6) (2016)063003.
- [26] R. Pazourek, S. Nagele, J. Burgdörfer, Attosecond chronoscopy of photoemission, *Reviews of Modern Physics*, 87(3) (2015)765-802.
- [27] X. Xie, C. Chen, G. Xin, J. Liu, Y. Chen, Coulomb-induced ionization time lag after electrons tunnel out of a barrier, *Optics Express*, 28(22) (2020)33228.
- [28] C. Chen, J. Che, X. Xie, S. Wang, G. Xin, Y. Chen, Strong-field response time and its implications on attosecond measurement, *Chinese Physics B*, 31(3) (2022)033201.
- [29] S. Wang, J. Y. Che, C. Chen, G. G. Xin, Y. J. Chen, Tracing the origins of an asymmetric momentum distribution for polar molecules in strong linearly polarized laser fields, *Physical Review A*, 102(5) (2020) 053103.
- [30] 辛国国, 韩浩, 椭圆偏振光中库伦势对原子单电离的影响, *西北大学学报(自然科学版)*, 47(6) (2017)796-800.
- [31] P. B. Corkum, Plasma perspective on strong field multiphoton ionization, *Physical Review Letters*, 71(13), (1993)1994-1997.
- [32] D. N. Fittinghoff, P. R. Bolton, B. Chang, K. C. Kulander, Observation of nonsequential double ionization of helium with optical tunneling, *Physical Review Letters*, 69(18) (1992)2642-2645.
- [33] D. Zeidler, A. Staudte, A. B. Bardon, D. M. Villeneuve, R. Dörner, P. B. Corkum, Controlling Attosecond Double Ionization Dynamics via Molecular Alignment, *Physical Review Letters*, 95(20) (2005) 203003.
- [34] S. X. Hu, L. A. Collins, Attosecond Pump Probe: Exploring Ultrafast Electron Motion inside an Atom, *Physical Review Letters*, 96(7) (2006) 96.073004.
- [35] G. G. Xin, D. F. Ye, J. Liu, Dependence of the correlated-momentum patterns in double ionization on the carrier-envelope phase and intensity of a few-cycle laser pulse, *Physical Review A*, 82(6) (2010) 063423.
- [36] L. B. Fu, G. G. Xin, D. F. Ye, J. Liu, Recollision Dynamics and Phase Diagram for Nonsequential Double Ionization with Circularly Polarized Laser Fields, *Physical Review Letters*, 108(10) (2012) 103601.
- [37] X. Sun, M. Li, D. Ye, G. Xin, L. Fu, X. Xie, Y. Deng, C. Wu, J. Liu, Q. Gong, Y. Liu, Mechanisms of Strong-Field Double Ionization of Xe, *Physical Review Letters*, 113(10) (2014) 103001.
- [38] S. Wang, R. Xu, W. Li, X. Liu, W. Li, G. Xin, Y. Chen, Strong-field double ionization dynamics of vibrating HeH<sup>+</sup> versus HeT<sup>+</sup>, *Optics Express*, 28(4) (2020)4650.
- [39] E. Goulielmakis, Z.-H. Loh, A. Wirth, R. Santra, N. Rohringer, V. S. Yakovlev, S. Zherebtsov, T. Pfeifer, A. M. Azzeer, M. F. Kling, S. R. Leone, F. Krausz, Real-time observation of valence electron motion, *Nature*, 466(7307) (2010)739-743.
- [40] 刘喜, 张睿智, 辛国国, 交换作用对于原子极紫外光吸收谱的影响, *光学学报*, 42(5) (2022)0502001.