

超快强激光驱动的原于分子电离*

全威^{1,†} 柳晓军^{1,†} 陈京^{2,††}

(1 中国科学院武汉物理与数学研究所 波谱与原子分子物理国家重点实验室 武汉 430071)

(2 北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

2014-08-21 收到

† email: xjliu@wipm.ac.cn

†† email: chen_jing@iapcm.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150104

Atom ionization driven by ultrafast intense laser fields

QUAN Wei¹ LIU Xiao-Jun^{1,†} CHEN Jing^{2,††}

(1 State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

(2 Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

摘要 强场电离是超快强激光与物质相互作用时发生的基本物理过程。强场驱动原子分子的电离电子动力学过程发生在一个光学振荡周期以内,是在阿秒时间尺度上研究电子超快动力学的典范。不仅如此,强场驱动下的超短电子束还为探测原子分子的结构及其超快动力学提供了重要的技术手段。文章首先简要阐述了超快强光场中原子分子电离的基本物理图像,在此基础上,介绍了近年来基于强场电离电子开展的超快过程研究的几个例子,最后简要讨论了强场电离研究的未来可能发展方向。

关键词 超快强激光, 原子分子, 电离, 超快过程

Abstract Ionization is a fundamental process during the interaction of matter with an ultrafast intense laser field. The ionization dynamics of atoms and molecules driven by an intense field proceed on a sub-laser-cycle time scale and represent a prototype in exploring attosecond electron dynamics. Moreover, the ultrashort electron bunches produced by the intense laser field can be exploited for measurements of atomic and molecular structure and their ultrafast dynamics. In this review we first briefly introduce the fundamental physics behind intense field ionization; next we discuss a few examples of ultrafast measurements based on the intense field ionized electrons; finally we discuss the prospects of research on intense field ionization.

Keywords ultrafast intense laser, atoms and molecules, ionization, ultrafast processes

1 引言

作为探索微观物质世界规律的重要手段,光与物质相互作用一直是物理学研究的前沿。其中的一个著名范例是光电效应的研究。从1887年赫兹首次实验发现到1905年爱因斯坦提出光量子理论对其进行正确解释,光电效应研究对量子理论

的发展及波粒二象性假设的提出起到了关键性的作用。

近代光与物质相互作用研究直接受益于激光的发明和发展。上世纪80年代诞生并发展起来的飞秒激光技术为人类探索微观物质运动规律提供了前所未有的强有力工具。相比传统光源,飞秒激光具有持续时间短、峰值功率高等特点,使人类得以在极短时间尺度内研究自然界的各种超快动力学过程。上世纪80年代中期,美国加州理工

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB922201)及国家自然科学基金(重点)(批准号: 11334009)资助项目

学院 Zewail 教授利用基于飞秒激光的泵浦探测技术成功地探测到了化学反应中的超快原子运动, 实现了对化学键的形成与断裂的控制, 开创了飞秒化学研究领域, 并因此获得了 1999 年诺贝尔化学奖^[1]。然而, 与化学反应过程中分子内原子核运动相比, 原子或分子中电子的运动发生在更短时间尺度上, 即阿秒(1 阿秒为 10^{-18} s) 时间尺度。早在原子核移动前, 电子的位置就已经发生了剧烈变化。本世纪以来, 实时捕捉电子的超快运动, 实现对物质中电子运动的控制, 成为人类奋斗的新目标。

探测并控制电子超快动力学的前提条件是获得具有阿秒时间分辨能力的“探针”。目前发展起来的超快探针基本可分为两类: 第一类是“超快光探针”, 即阿秒光脉冲。通过飞秒强激光与原子分子气体相互作用产生高次谐波的方法是获得阿秒光脉冲的首选方案, 也是当前唯一实现了阿秒光脉冲的方案。有关阿秒光脉冲产生与测量的具体介绍可以参阅韩海年等人^[2]和霍义萍等人^[3]发表在《物理》上的专题文章。第二类是“超快电子束探针”。通过飞秒强激光与原子分子气体相互作用, 驱动原子分子电离产生的电子束具有超短时间特性, 可以应用于开展阿秒时间分辨的微观物理过程研究。值得一提的是, 无论是阿秒光脉冲抑或是超快电子束探针, 其产生机制都与强场驱动的原子分子电离过程紧密相关。对强场电离过程的理解为深入开展阿秒时间分辨超快测量奠定了坚实的物理基础。本文重点介绍第二类探针即超快电子束探针。

探测并控制电子超快动力学的前提条件是获得具有阿秒时间分辨能力的“探针”。目前发展起来的超快探针基本可分为两类: 第一类是“超快光探针”, 即阿秒光脉冲。通过飞秒强激光与原子分子气体相互作用产生高次谐波的方法是获得阿秒光脉冲的首选方案, 也是当前唯一实现了阿秒光脉冲的方案。有关阿秒光脉冲产生与测量的具体介绍可以参阅韩海年等人^[2]和霍义萍等人^[3]发表在《物理》上的专题文章。第二类是“超快电子束探针”。通过飞秒强激光与原子分子气体相互作用, 驱动原子分子电离产生的电子束具有超短时间特性, 可以应用于开展阿秒时间分辨的微观物理过程研究。值得一提的是, 无论是阿秒光脉冲抑或是超快电子束探针, 其产生机制都与强场驱动的原子分子电离过程紧密相关。对强场电离过程的理解为深入开展阿秒时间分辨超快测量奠定了坚实的物理基础。本文重点介绍第二类探针即超快电子束探针。

2 超快强激光场驱动原子分子电离的基本物理图像

在强激光技术出现之前, 物质在光照射下的电离可以理解为原子中的电子吸收单个光子从束缚态跃迁到连续态的过程。如前文所述, 这一过程由爱因斯坦提出的光量子理论进行描述(见图 1 (a))。

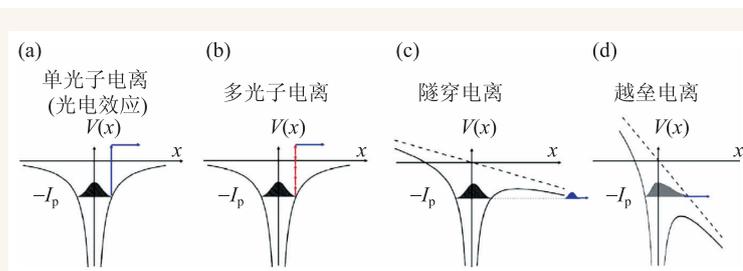


图1 原子电离的不同物理机制

上世纪 60 年代, 激光的发明使得研究原子的多光子过程成为可能。就在激光器发明之后不久, 科学家就观察到, 将激光聚焦于空气中会产生火花, 意味着空气中的大量分子发生了电离。由于空气组成分子(如氮气、氧气等)的电离势都远大于所用可见波段激光的单个光子能量, 要使其电离必须吸收多个光子(见图 1(b))。实际上, 早在 1931 年, 德国物理学家 Goepfert-Mayer 就从理论上预言了多光子过程的发生^[4], 但直到激光出现前, 由于光源的功率密度较低, 多光子过程发生的概率极小, 导致实验上无法探测。Goepfert-Mayer 的预言在很长一段时间里并未引起人们的注意。

随着激光峰值强度的提高, 以至于当电子感受到的激光电场可以与原子核对电子的库仑吸引作用相比拟时, 人们发现实验测量到的原子电离几率随激光光强的变化似乎呈指数关系, 而不是按照微扰理论所预言的幂指数变化。这预示着随着激光场强度的增大, 激光与物质相互作用进入非微扰区, 原子电离的物理机制随之发生根本变化。

1964 年, 前苏联物理学家 Keldysh 在他的一篇研究论文中指出^[5], 对于强度足够强、频率足够低的激光场, 原子的电离行为可以用下面介绍的准静态场电离或隧穿电离模型进行描述: 如果将强激光电场看成瞬时静电场, 则强激光电场与原子库仑场的联合作用会导致在激光场偏振方向上形成一个势垒。当激光周期远大于电子穿过势垒所需要的时间时, 束缚电子可以被认为通过势垒隧穿方式发生电离, 即隧穿电离, 如图 1(c) 所示。可以想象, 随着激光场强度进一步增强,

势垒也会变得越来越低。当激光场达到某一特定强度时,原子基态电子能量将高于势垒,电子可以直接克服原子实束缚而成为自由电子,这时越垒电离就发生了,如图1(d)所示。按照隧穿电离图像,电子电离几率取决于激光电场的瞬时强度,与激光振荡频率无关。由于隧穿电离几率与激光电场呈指数依赖关系,电子电离主要发生在激光电场振荡周期内最大值附近的一个非常短的时间尺度内。强激光场中原子电离的这一特性,是产生超短电子束并利用该电子束作为超快探针开展阿秒物理过程研究的基础。

1993年,加拿大物理学家Corkum^[6]和美国物理学家Kulander^[7]等人在隧穿电离图像基础上提出并发展了电子再散射模型(又称为三步模型),为深入理解强场中的各种原子物理过程及本世纪蓬勃发展起来的阿秒物理研究奠定了理论基础。按照电子再散射模型(如图2所示),强场下的原子超快动力学过程通过以下几步发生:第一步,处于原子基态的束缚电子首先通过强激光电场和原子库仑场共同形成的势垒发生隧穿电离(如图2(a)所示)。第二步,电离电子随后在激光电场中加速并获得能量,随着激光电场反向,部分电子被电场重新拉回到母离子的位置(如图2(b)所示)。第三步,返回到母离子附近的再散射电子可以与母离子发生非弹性碰撞,将部分能量转移给其他束缚电子并使之电离,导致如图2(c)上部所示的非顺序双电离过程;当然电子也可与母离子发生弹性散射,散射电子将继续从激光电场中获得能量,导致高能电子的出现,对应图2(c)中部所示的高阶阈上电离过程;回碰电子还可能被母离子俘获,并把从激光电场中获得的能量以高能光子

的形式释放出去,即产生高次谐波,如图2(c)下部所示。注意到高次谐波由于能覆盖从红外到紫外乃至软X射线的极宽谱段,目前已成为产生阿秒光脉冲的实用方案,极大地推动了阿秒科学研究的发展。

值得指出的是,在基于电子隧穿的强场电离图像下,我们可以建立起电子的末态动量与它发生隧穿电离时刻之间的对应关系。这样,在量子力学建立过程中经历了巨大思想革命所抛弃的经典电子轨道概念又在强场电离的研究中复活了。当然,这是在特定条件下的回归,即虽然电子电离从本质上说仍是吸收多个光子的量子跃迁过程,但在我们所关心的隧穿电离区域,物理过程的典型能量变化(如电离势)远远大于单个光子的能量,所以根据量子-经典对应原理,经典描述成为一种很好的近似。强场电离过程中电子轨道图像的建立为人们阿秒时间尺度上研究原子分子中的超快过程奠定了坚实基础。

3 基于强场电离电子的超快动力学过程研究

从上面的介绍中,大家或许已经发现,在隧穿电离区域,电子电离过程本身就发生在远小于激光振荡周期的时间范围内,所以强场电离本身就是开展阿秒物理过程研究的合适体系。近年来,人们发展了一种名为“阿秒钟”的实验方案,对原子分子的隧穿电离过程进行了深入的研究。下面简单介绍一下阿秒钟的工作原理。

对于实验室常用的线偏振少周期飞秒光脉冲来讲,在某一时刻,激光电场的绝对值大小不仅与激光脉冲的包络有关,还与该时刻激光电场载波-包络相位有关。而对于圆偏振激光,激光电场的绝对值大小仅由脉冲包络决定,载波-包络相位只决定电场最大值矢量的方向,如图3所示。按照半经典理论,考虑到隧穿电离产生

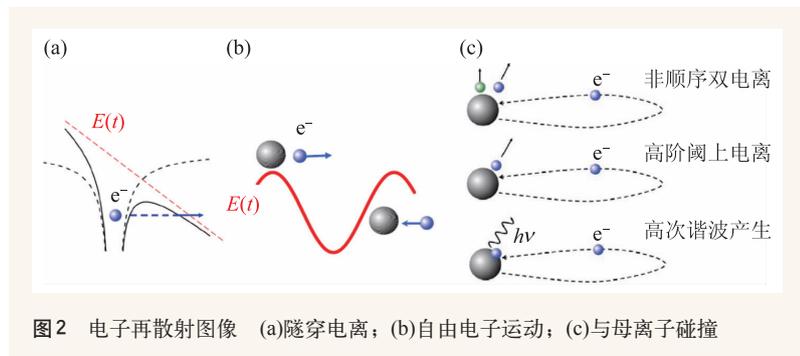


图2 电子再散射图像 (a)隧穿电离; (b)自由电子运动; (c)与母离子碰撞

的光电子初始动量为零，其最终动量将完全来自于电子在激光场中的加速，并由隧穿时刻的激光场矢势决定。对于载波-包络相位确定的激光场，在某一时刻，激光电场具有确定的指向，如图3中绿色箭头所示。而激光电场的方向与电子所获得的矢势方向的关系如图3中的红色箭头与蓝色箭头所示，即激光场矢势方向与激光电场方向垂直，矢势与电场的大小是相对于时间的导数关系^[8]。激光场矢势的大小和方向就代表了电子最终被探测器测量的动量。通过精确地测量电子的最终动量，就可以反推出电子在隧穿电离发生时刻的矢势和激光电场^[9]。这里隧穿电离的时间信息可以从两个物理量读出，即电子动量的大小和电子动量的方向。电子动量大小与隧穿时刻激光电场的大小具有确定的关系，测量出电子动量的大小也就知道了隧穿电离时刻激光电场的大小。考虑到圆偏振激光场的电场大小只由激光场的包络决定，而这一包络往往可以认为是随时间变化的高斯函数，因此，通过简单的计算，就可以从电子动量的大小反推出电子电离发生时对应的激光电场振幅大小。另一方面，知道了电子动量的方向，我们可进一步根据激光场矢势与激光电场的关系，推断出电子电离时对应的激光电场方向。在一个激光周期以内，圆偏振激光场每一个时刻对应的电场指向不同，因此可以从激光电场的方向非常精确地推算出电离发生的具体时刻。例如：对于动量为1个原子单位的电子，假设电子谱仪的动量分辨率为0.1原子单位，则可以分辨的最小角度为0.1 rad。对于常见800 nm的飞秒激光场，一个光学振荡周期为2.67 fs，因此0.1 rad对应的的时间分辨率大约为43 as。因此，通过实验测量的电子动量大小，可以粗略地确定隧穿电离发生在激光脉冲上升沿的哪个光学振荡周期内，而根据电子动量方向则可确定在该光学振荡周期内隧穿电离发生的精确时刻。这二者的关系类似于我们日常生活中时钟的时针和分针，因此人们将这种基于电子动量测量的时间高分辨测量技术称为阿秒钟^[9, 10]。

由于技术上的限制，文献中报道的阿秒钟并

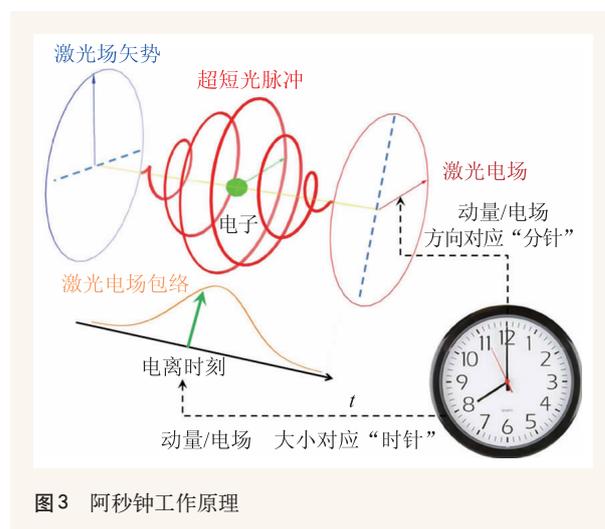


图3 阿秒钟工作原理

没有采用圆偏振光，而是采用椭圆偏振光。在椭圆偏振激光场中，由于电离几率与激光电场呈指数依赖关系，电离产量主要集中在椭圆偏振的长轴方向，这将导致每一个激光振荡周期内隧穿电离产量会在沿着长轴的两个方向上出现峰值。这样，即便不使用绝对相位稳定的飞秒激光电场，这样两个峰值也可以提供非常精确的时间信息，减少了稳定载波-包络相位所带来的复杂技术要求。目前使用椭圆偏振光的阿秒钟方案已经有很多应用，其中一个例子是对隧穿电离是否需要时间的探讨。对于这一长期存在争论的问题，人们到目前为止仍然保持着很大的兴趣^[11]。2008年，Eckle等人^[9]采用阿秒钟实验方案测量得到He原子发生隧穿电离所需时间的上限为12 as。2011年，Pfeiffer等人^[12, 13]进一步使用阿秒钟技术研究了Ar原子的两个最外层电子在椭圆偏振光场中发生电离的时间随光强的演化关系，发现第二个电子的隧穿电离时间与基于独立电子模型的半经典理论预言相偏离，表明这两个电子的电离过程可能存在关联。2012年，他们使用同一技术精确确定了电子隧穿电流的几何构型和隧穿出口位置^[14]，并揭示了多电子效应对Ar原子隧穿电离的重要影响。

通过上面对阿秒钟方法的介绍，我们可以看出，相比于利用阿秒光脉冲直接探测电子动力学，该方案避免了阿秒光脉冲产生、传播及精确控制所带来的技术复杂性，它的成功应用建立在

人们对原子电离过程中激光场对光电子作用的深入理解以及电子动量的高分辨实验测量基础上。仔细分析可以发现，阿秒方案是将激光载波光振荡周期作为精确的时间标准去度量光电子的超快运动。

通过前面对电子再散射图像的介绍，我们还知道，电离电子可以返回到母离子附近发生再散射。类似于传统的电子碰撞方法，利用再散射电子束本身所具有的超短时间特性(可以短至1 fs)，我们可将它作为一种超快探针去研究母体原子分子的超快动力学过程。在介绍这方面研究工作之前，我们先介绍一个“分子钟”实验^[15]，即通过研究分子在强激光场下的解离过程，来揭示再散射电子束的超短时间特性。

以氘分子为例，“分子钟”实验的基本原理如图4所示。当氘分子的价电子在飞秒强激光场作用下发生隧穿电离时，产生了两个关联的波包，即沿着氘分子离子基态($X^2\Sigma_g^+$)势能面振荡的离子振动波包和沿着激光电场方向振荡的电离电子波包。当激光电场改变方向后，电离电子波包将重新回到氘分子离子附近并与之发生碰撞，并将氘分子离子激发到第一激发态($A^2\Sigma_u^+$)，如图4(a)中虚线垂直箭头所示。之后，氘分子离子将发生解离，产生具有一定动能的 D^+ 离子。容易理解， D^+ 离子的动能分布取决于解离时刻的氘分子核间距大小，而后者则由电子再碰撞时刻及再碰撞电子波包的宽度决定。再碰撞时刻越晚，分子

核间距就越大，解离产生的 D^+ 离子动能就越小；另一方面，再碰撞电子波包越窄， D^+ 离子动能分布也越窄；反之亦然。因此，通过实验测量 D^+ 离子的动能分布，可以反映电子再碰撞时刻以及再碰撞电子波包的宽度。利用该“分子钟”方案，人们证实再碰撞电子束的时间宽度可以短至1 fs。

根据电子再散射图像，再散射电子轨道的运动周期将取决于激光波长，通过改变激光波长，就可以改变再散射电子轨道周期。对于波长较长的激光电场，电子的再散射轨道周期较长，电子回碰时分子振动波包经历了较长时间演化，分子核间距较大，导致解离形成的 D^+ 离子动能较小；而对于波长较短的激光电场，电子再散射轨道的周期也较短，电子回碰时分子核间距较小，最终探测到的 D^+ 离子动能较大。2003年，Niikura等人^[16]通过改变激光波长来调控再散射电子轨道周期，通过探测解离产物 D^+ 离子动能分布随激光波长的变化关系，首次在阿秒时间尺度和亚埃空间尺度上探测到由强场电离形成的 D_2^+ 的振动波包的运动。

通过上面的介绍可以看到，基于再散射电子束的超短特性，通过对其诱导分子解离过程产生的质子动能的测量，可以用阿秒时间精度来观察分子振动波包的运动^[16]。另一方面，我们也知道，被母体离子散射后的再散射电子，将携带母体离子结构的信息，因此通过对电子动量的测量，有可能提取出母体离子的结构及超快动力学演化的信息。考虑到分子具有多原子中心结构，在强飞秒激光场驱动下，分子电离产生的电子可以来自不同的原子中心。类似于光的杨氏双缝干涉，来自不同原子中心的电子波包之间可发生干涉，产生的衍射图案与分子结构特性(如核间距等)紧密相关。基于以上原理，Zuo等人^[17]在1996年提出，利用激光诱导电子衍射作为探测分子结构及动力学的一种有效手段，之后，人们进一步对该方案进

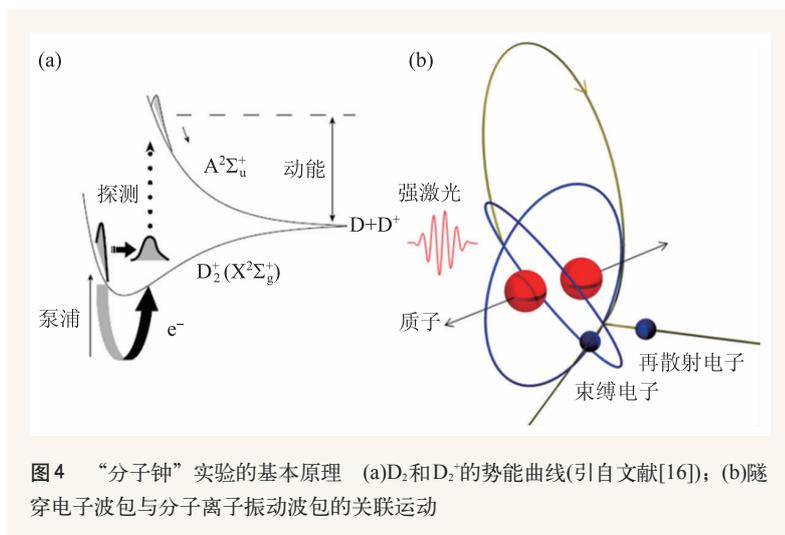


图4 “分子钟”实验的基本原理 (a) D_2 和 D_2^+ 的势能曲线(引自文献[16]); (b)隧穿电子波包与分子离子振动波包的关联运动

行了发展与完善^[18]。2008年, Meckel等人^[19]开展了基于激光诱导电子衍射原理探测分子结构及动力学的实验研究。他们测量了空间取向的双原子分子N₂和O₂分子的三维电子动量分布,并从中获得了分子基态电子轨道及母体离子位置的信息。之后, Okunishi等人^[20]及Kang等人^[21]则通过实验测量空间随机取向的N₂和O₂分子的高阶阈上电离电子的角分布,结合量子力学散射矩阵理论,揭示了电子角分布与分子初态结构的紧密关系,为进一步利用高能电子角分布探测分子结构研究提供了思路。2012年, Blaga等人^[22]利用激光诱导电子衍射方案研究了N₂和O₂分子电离后形成的分子离子的键长随时间的超快演化。基于电子再散射图像,激光诱导的隧穿电子束返回到母离子的时间与激光波长相关,通过测量并比较在不同波长条件下隧穿电子与母离子的两个原子中心散射形成的衍射图样,可以获得分子离子键长随时间演化的信息。为此,他们选择在三个中红外波长条件下进行实验,测量了分子电离引起的电子动量谱,从电子动量谱中提取出了对应的电子散射截面。在此基础上,通过与理论计算结果的对比,从实验数据中提取出了不同波长条件下分子离子键长的最佳拟合值。他们的研究表明,使用激光诱导电子衍射方法可以分辨几个飞秒时间间隔内发生在亚埃空间量级上的分子键长变化。利用激光诱导电子衍射方法,有望能在亚飞秒时间与亚埃空间尺度上实现对分子内电子与母体离子动力学的同时探测。

4 未来的挑战与展望

作为飞秒强激光与原子分子相互作用引起的基本物理过程电离的研究,对深入理解强激光与物质相互作用机制起着不可或缺的作用。对于强场电离基本物理图像,本文所涉及的内容仅限于近红外波段激光场对原子分子的作用。近年来,随着中红外长波段强激光以及自由电子激光技术的出现和成熟,使强场原子物理研究向“长波长”及“短波长”极限拓展。在长波长条件下,

原子电离将进入深隧穿区域,有可能会引起一些新的电离现象的出现^[23-25],同时深隧穿区域的选择将对考察强场条件下电子动力学行为的经典—量子对应具有重要意义。而在短波长(如在极紫外甚至X射线波段)条件下,本文所讨论的隧穿电离及电子再散射等半经典图像将不再适用,由于原子内壳层结构、电子关联以及共振等多种物理效应的介入,“短波长”极限下的强场原子电离将为我们带来更丰富的物理现象^[26, 27],如何理解短波长下的强场原子过程为相关理论工作者提出新的挑战。另一方面,随着研究体系逐渐从简单原子向复杂分子、团簇甚至固体体系扩展,更多有意义的物理效应(如多原子中心干涉、分子空间取向、多体效应等)将介入电离过程^[28, 29]。目前基于单电子和两电子等简单原子分子体系建立起来的强场物理图像,如前面介绍的隧穿电离、电子再散射图像等,能否有效地处理复杂体系中的多体效应,描述复杂分子、团簇甚至固体体系的强场电离动力学,尚有待更深一步的研究。

与此同时,强场电离产生的超短电子束探针还将不断地推动人们在亚飞秒时间尺度内对原子分子超快动力学过程的认识。如将阿秒钟方法与多粒子符合测量技术相结合,可帮助人们深入了解强场驱动的原子分子多体关联行为,如电子关联和电子—核关联等^[12]。而长波长激光驱动下的超短电子束将具有更高能量,其对应的更短德布罗意波长将为激光诱导电子衍射方法提供更高空间分辨率,直接推动分子超快结构成像的研究。

另外,超快强激光技术的发展也已使得人们对电离电子超快动力学的操控成为可能。由于电离电子行为决定诸多后续强场超快过程(如高次谐波产生等),电离电子超快操控研究的进展无疑将促进新兴阿秒科学研究领域的发展。如通过少周期飞秒激光的载波-包络相位对电离电子行为的控制已成为获得单个阿秒光脉冲的重要手段^[30]。

我们有理由相信,在未来几年里,伴随着飞

秒强激光技术的不断发展与原子分子谱学测量方法的日益成熟, 强场电离研究还将不断取得新突破。

参考文献

- [1] Zewail A H. J. Phys. Chem. A, 2000, 104: 5660
- [2] 韩海年, 魏志义, 苍宇等. 物理, 2003, 32: 762
- [3] 霍义萍, 曾志男, 李儒新. 物理, 2004, 33: 907
- [4] Goeppert-Mayer M. Ann. Phys., 1931, 9: 273
- [5] Keldysh L V. Sov. Phys. -JETP, 1965, 20: 1307
- [6] Corkum P B. Phys. Rev. Lett., 1993, 71: 1994
- [7] Schafer K J, Yang B, Dimauro L F *et al.* Phys. Rev. Lett., 1993, 70: 1599
- [8] Krausz F, Ivanov M. Rev. Mod. Phys., 2009, 81: 163
- [9] Eckle P, Pfeiffer A N, Cirelli C *et al.* Science, 2008, 322: 1525
- [10] Eckle P, Smolarski M, Schlup P *et al.* Nat. Phys., 2008, 4: 565
- [11] Aichmann H, Nitz G. Found. Phys., 2014, 44: 678
- [12] Pfeiffer A N, Cirelli C, Smolarski M *et al.* Nat. Phys., 2011, 7: 428
- [13] Pfeiffer A N, Cirelli C, Smolarski M *et al.* New J. Phys., 2011, 13: 093008
- [14] Pfeiffer A N, Cirelli C, Smolarski M *et al.* Nat. Phys., 2012, 8: 76
- [15] Niikura H, Legare F, Hasbani R *et al.* Nature, 2002, 417: 917
- [16] Niikura H, Legare F, Hasbani R *et al.* Nature, 2003, 421: 826
- [17] Zuo T, Bandrauk A D, Corkum P B. Chem. Phys. Lett., 1996, 259: 313
- [18] Lein M. J. Phys. B, 2007, 40: R135
- [19] Meckel M, Comtois D, Zeidler D *et al.* Science, 2008, 320: 1478
- [20] Okunishi M, Itaya R, Shimada K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 103: 043001
- [21] Kang H, Quan W, Wang Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 104: 203001
- [22] Blaga C I, Xu J L, DiChiara A D *et al.* Nature, 2012, 483: 194
- [23] Quan W, Lin Z, Wu M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 103: 093001
- [24] Blaga C I, Catoire F, Colosimo P *et al.* Nat. Phys., 2009, 5: 335
- [25] Guo L, Han S S, Liu X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 013001
- [26] Richter M, Amusia M Y, Bobashev S V *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 102: 163002
- [27] Fukuzawa H, Son S K, Motomura K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 173005
- [28] Pavicic D, Lee K F, Rayner D M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 243001
- [29] Lin Z, Jia X, Wang C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 223001
- [30] Baltuska A, Udem Th, Uiberacker M *et al.* Nature, 2003, 421: 611

致谢 作者感谢与中国科学院上海光学精密机械研究所徐至展院士、程亚研究员小组在超快强激光场原子分子电离研究方面多年来富有成效的合作。

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
——《物理》四十年集萃

2012年《物理》创刊40周年, 为答谢广大读者长期以来的关爱和支持, 《物理》编辑部特推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅两年(2015—2016年)《物理》杂志的订户, 将免费获得《岁月留痕——〈物理〉四十年集萃》一本(该书收录了从1972年到2012年在《物理》各个栏目发表的四十篇文章, 476页精美印刷, 定价68

元, 值得收藏)。

欢迎各位读者订阅《物理》
(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

订阅方式

(1) 邮局汇款

地址:

100190, 北京603信箱
《物理》编辑部收

(2) 银行汇款

开户行:

农行北京科院南路支行
户名:

中国科学院物理研究所

帐号:

11250101040005699

(银行汇款请注明“《物理》编辑部”)

咨询电话: (010)82649266; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

