

## 再碰撞物理学

2011年3月出版的 *Physics Today* 上刊登了 Paul B. Corkum 教授的一篇介绍再碰撞物理学文章。Paul B. Corkum 教授来自加拿大渥太华大学和国家研究委员会的阿秒激光科学中心。他对“再碰撞物理学”的研究对象、发展历史和未来展望做了深入浅出的描述和总结。本文以这篇文章为基础，对再碰撞物理学做一个简单的介绍。

从1906年卢瑟福用 $\alpha$ 粒子(氦原子核)轰击云母,从而发现原子的核式结构的著名实验开始,碰撞就成为了探索物质结构的主要方案。一个世纪以来,从原子核物理到粒子物理的各种实验都主要采用这种方法,尤其是近代加速器上各种新的基本粒子的发现,都得益于物质粒子被加速后的碰撞而产生。

在卢瑟福实验整整50年后,人类发明了激光器。从那以后,激光被发现可以通过与物质相互作用来探测,甚至操控物质粒子。光学实验的精确性,使得它在某些粒子物理问题的研究上比传统碰撞方法更有优势。

在再碰撞物理学诞生之前,光学方法和碰撞方法被认为是各自独立的发展,互不关联。但是再碰撞物理学的诞生使二者走到了一起。再碰撞物理过程是指利用激光将原子或分子中的一个电子电离,然后在激光场驱动下回头并与之前失去该电子的离子发生碰撞的物理过程。传统的碰撞物理依赖于加速器将电子等粒子加速,通过调整加速器内磁场来制造碰撞。再碰撞物理学采用激光来电离原子(或分子),再通过电离出的电子回头碰撞并融合来研究该原子(或分子)的结构。

产生再碰撞物理过程需要很强的激光( $10^{13} \text{ W/cm}^2$ ),因此是强场激光物理研究的领域。一个相干的红外强激光可以让价电子的波函数产生部分电离,称为“隧穿电离”。此时电子的波函数被分为两部分:一部分是与原来的原子核组成的束缚态的波函数;另一部分是隧穿电离波包。电子再碰撞的过程,可以描述为该隧穿电离波包和束缚态的波函数的重新组合。整个再碰撞过程存在两次相干性的传递:一次是部分电离过程使得束缚态波函数的相位传递给隧穿电离波包;另一次是融合使该相位再通过电子传递给辐射出的紫外光场。通过再碰撞过程产生的信息可以用来研究原子、分子甚至固体的结构。

图1为基于再碰撞物理过程,尤其是隧穿电离波包的扫描隧道显微镜(STM)技术,它可用来探测原子或分子的结构。

除STM技术以外,再碰撞物理过程还可以用来制作电子干涉仪。即利用隧穿电离波包和束缚态波函数之间的相干性产生干涉条纹(见图2)。随着再碰撞过程的发生,该干涉条纹会产生振荡,产生一个振荡的偶极子并向外辐射紫外光。这个物理过程制造了一个电子干涉仪,即把隧穿电离过程看成一个电子波函数分束的过程,强激光场的反转使隧穿电离波包和束缚态波函数产生一个相位延迟,再碰撞过程使得隧穿电离波包和束缚态波函数发生干涉,成为一个电子干

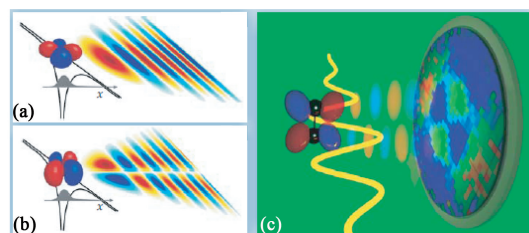


图1 基于再碰撞的扫描隧道显微镜原理 (a)沿  $x$  轴偏振的强激光使其成  $45^\circ$  的氧分子在  $x$  方向产生一个隧穿电离波包(黑线为激光传播方向),红色和蓝色条纹代表隧穿电离波包的波峰和波谷(见《物理》网刊彩图,下同);(b)当氧分子与激光呈  $0^\circ$  或  $90^\circ$  时,与  $45^\circ$  相比,隧穿电离波包的极大值点会成为极小值点;(c)当氧分子固定时,让探测器与  $x$  方向垂直,调整激光束的方向可以使隧穿电离波包在探测器上呈不同的像,从而获得氧分子价电子波函数的图像

涉仪。该相位的延迟由强激光的波长、传播方向、反转时间等参数决定,因此是一个可操控的电子干涉过程。

利用重碰过程还可以实现对分子轨道的层析成像。要在实验上得到这样的成像,我们首先需要探测单分子谐波谱。对于中等浓度的对称结构分子气体,其相位匹配输出强度对应于单分子的反应,因此我们得到的宏观信号直接显示单分子或原子的物理过程。另外需要控制探测分子的取向,这一点,我们可以利用激光技术实现分子系综相对于激光偏振方向的任意取向。由此,就可以对任意方向的分子轴实验测量相应的高次谐波谱,从而实现对分子的结构成像。

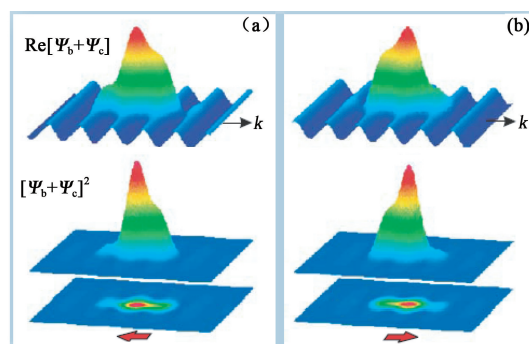


图2 (a)上方的图为束缚态波函数  $\Psi_b$  和隧穿电离波包  $\Psi_c$  的总波函数,下方为总波函数的模方,即电子的概率密度。红色箭头代表偶极子的方向;(b)在隧穿电离波包传播半个周期之后,偶极子反向。随着隧穿电离波包连续地传播,该偶极子产生连续振荡,并向外辐射紫外线

再碰撞物理学目前正处于起步阶段。由于再碰撞过程需要的是电子的部分隧穿电离,因此很适合直接应用现有的超快强场激光技术。

再碰撞物理学与之前的超快激光物理有着两个显著的不同点,一个是它可以在广泛的时间尺度下加以研究,而光化学等超快过程只限于飞秒量级.第二个不同点是再碰撞是隧穿电离的电子和失去它的原子变成的离子二者碰撞,因此可以用该电子来探测该离子的运动状态.这样能弥补用激光探测离子方法时存在的一些盲点.

再碰撞物理学目前的不足之处在于强激光本身的限制,即它只能研究时间和空间尺度小于激光周期和波长的尺度,即隧穿电离时间小于一个激光周期,隧穿电子反转前的传播长度也小于一个激光波长.再碰撞物理学更像是阿秒科学的一个开端研究方向.

再碰撞物理学一个可预见的前沿是增加激光的光强,这有很长的路要走.更高的光强可以导致一个电子在隧穿电离过程中吸收更多光子,从而增加隧穿电子的能量,即减小隧穿波包的波长来增加探测分辨率.如果光强增加到足够激发核反应,则可通过再碰撞研究实时核动力学.

再碰撞物理学另一个可预见的前沿是固体物理中的应用,即从固体中直接隧穿电离出电子,并与固体再碰撞.这个研究方向和目前隧穿电子只和气体中单独原子或分子的再碰撞研究不同,成为一个崭新的方向.总之,再碰撞物理学在阿秒激光时代将具有非常好的研究前景.

(中国科学院物理研究所 王如泉 摘译自

*Physics Today*, 2011, (3):36)