
科学家实现对光电离非偶极电子动力学阿秒时间分辨的测量

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/25703.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

科学家实现对光电离非偶极电子动力学阿秒时间分辨的测量。 华中科技大学物理学院/武汉光电国家研究中心强场超快光学创新研究群体周月明教授、陆培祥教授，与瑞士苏黎世联邦理工学院（ETH）韩猛博士、Hans Jakob Wörner教授等人合作在原子光电离非偶极阿秒动力学研究中取得重要研究成果。

该研究将阿秒光电子干涉方法拓展到光电离的非偶极效应中，提出了非偶极阿秒光电子干涉仪的方法，在阿秒时间尺度揭示了氦原子单光子电离电子的非偶极动力学过程，将阿秒科学的应用从偶极相互作用区延伸到非偶极相互作用区。

北京时间2024年1月10日18时，研究成果在线发表于《自然—光子学》。

图1. 研究成果展示概念图。该工作实现了激光磁场分量驱动的光电子沿着激光传播方向皮米尺度位移以及原子光电离电四极跃迁和电偶极跃迁之间阿秒量级时间延迟的测量。

原子/分子层面的微观结构及其内部电子超快过程决定了物质的宏观属性。因此，对原子分子的电子超快动态过程的研究是认识物质性质和状态变化物理本质的关键。因为电子的运动时间尺度为阿秒量级，研究电子的动力学过程需要阿秒时间分辨的测量方法。2023年的诺贝尔物理学奖颁给了为探测电子动力学过程而在实验上产生阿秒脉冲的三位科学家。基于阿秒激光脉冲及其他超快技术，发展阿秒时间分辨的测量方法并揭示物质的电子动力学过程是阿秒科学的核心内容。过去的二十年，人们发展了多种阿秒时间分辨的测量方法，揭示了原子、分子、团簇、固体，以及液体中的电子动力学过程。但是，这些阿秒电子动力学研究都受限在激光与物质的电偶极效用。对于非偶极效应，由于信号非常微弱，通常被忽略。然而，非偶极效应的研究对于精确测量和相干调控激光与物质相互作用是必不可少的，特别是在手性分子以及磁性材料中，激光与物质的非偶极相互作用往往起到了至关重要的作用。最近几年，原子分子的强场光电离中的非偶极效应，如电四极效应、磁偶极效应等，引起了研究人员广泛的兴趣。但是已有的研究都停留在非偶极效应的静态测量，而对非偶极作用的电子动态过程，目前尚未出现有效的具有时间分辨的测量方法。

在该研究中，周月明教授、韩猛博士等人将光电子干涉方法拓展到光电离的非偶极效应中，提出了非偶极阿秒光电子干涉仪(如图2所示)，在阿秒时间尺度研究了氦原子单光子电离非偶极动力学过程。光电离的非偶极效应会导致沿着激光传播方向不对称分布的光电子动量分布。这种不对称的分布体现在两个方面：一是光电子峰能量依赖于光电子发射方向，沿着激光传播方向和背向激光传播方向发射的光电子峰能量不一样；二是光电子产率沿着和背向激光传播方向的分布体现不对称性(如图2中最上方的图显示)。通常，这两种不对称性都非常微弱，在实验上很难测量到。在该工作中，作者利用极紫外阿秒光电离产生的光电子能量分布作为参考，在实验上精确得到了极紫外+红外激光驱动的光电离角分辨光电子能谱，测量到了不同角度发射的光电子毫电子伏特量级的能量差异(如图3所示)。这种差异来源于红外激光的磁场分量与光电子作用。通过在阿秒时间精度改变极紫外光和红外激光的时间延迟，实验还观察到了光电子峰能量对于光电离时间的依赖，并且从中得到了激光磁场分量驱动的光电子沿着激光传播方向皮米(10-12m)尺度的位移。此研究验证了此前非偶极静态测量实验中观察到的光电子能量依赖于发射角的反直觉现象(由法兰克福大学林康博士等人完成)。

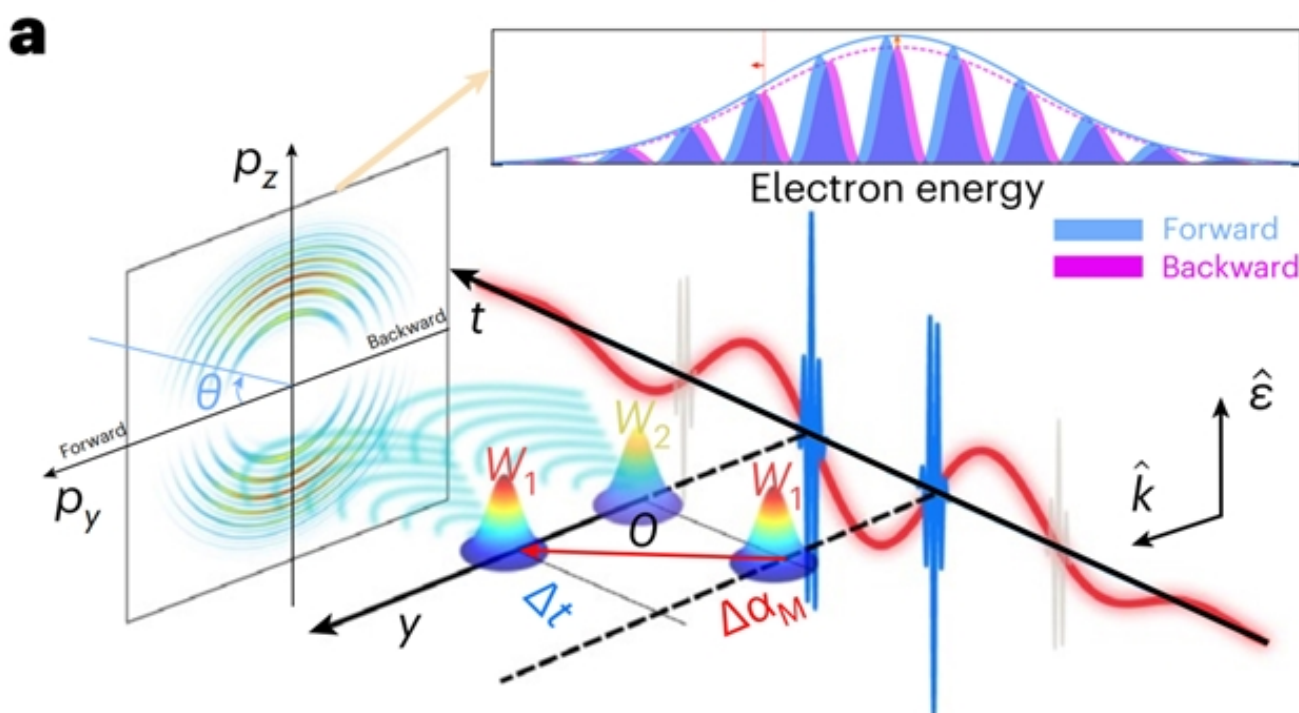


图2. 非偶极阿秒光电子干涉仪示意图。

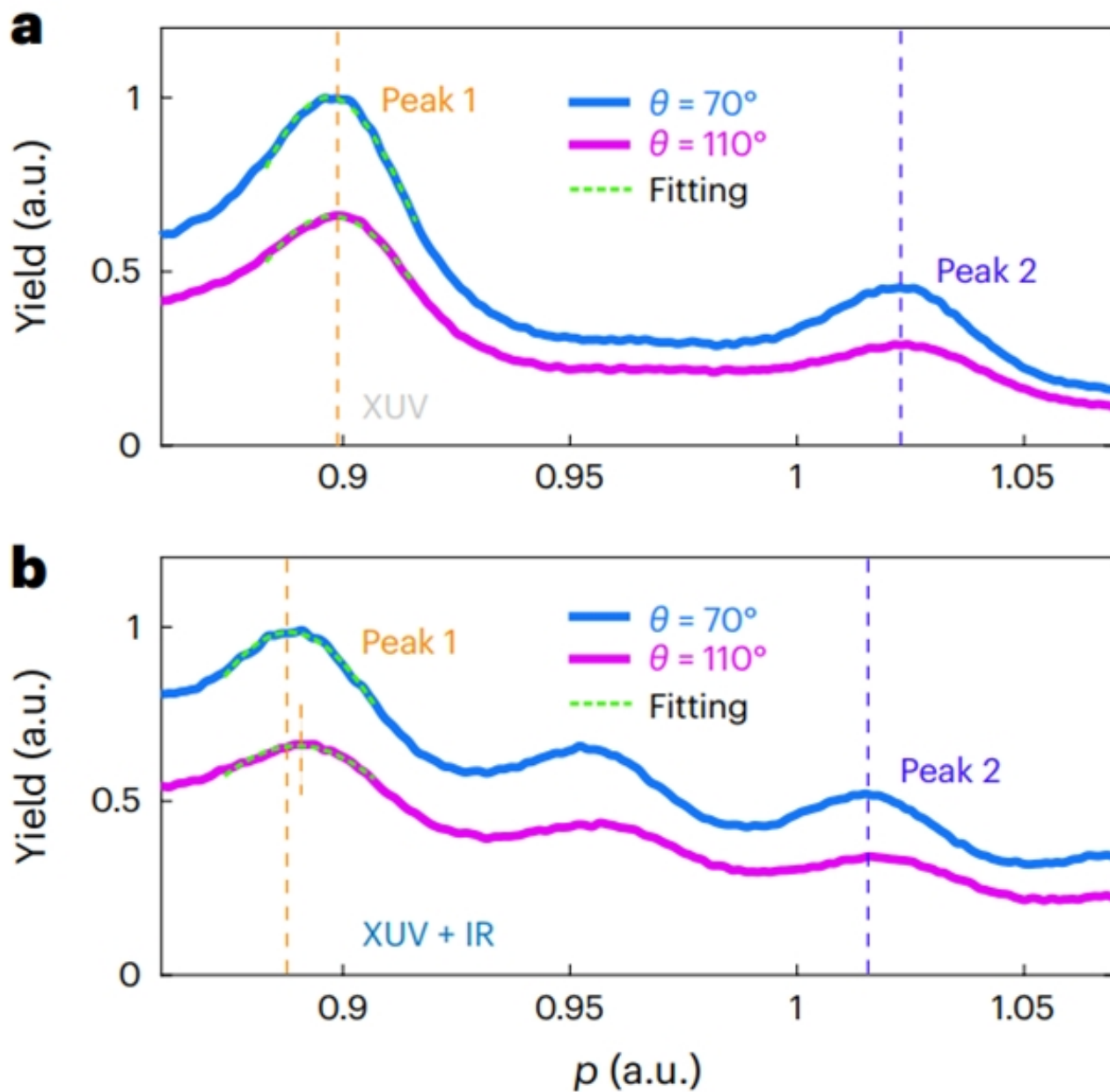


图3. 实验测量到的沿着激光传播方向以及反传播方向的光电子能谱。其中a和b分别代表只有极紫外激光以及极紫外激光加红外激光组合的实验结果。

同时，他们还测量到了光电子产量沿激光传播方向的不对称度分布，如图4a（理论结果）和4b（实验结果）所示。通过分析电离过程中吸收光子的通道，他们发现了光电子产量的不对称度来源于电四极与电偶极跃迁的光电子干涉。这两种跃迁通道之间的干涉会导致光电子产量的不对称度产生类似于光电子产量依赖于极紫外脉冲和红外激光时间延迟的震荡。通过对比光电子产量以及产量的不对称度随时间延迟的震荡，他们测量到氦原子光电离电四极跃迁和电偶极跃迁之间约15阿秒(1阿秒=10⁻¹⁸秒)的电离时间延迟，如图4c和4d所示。

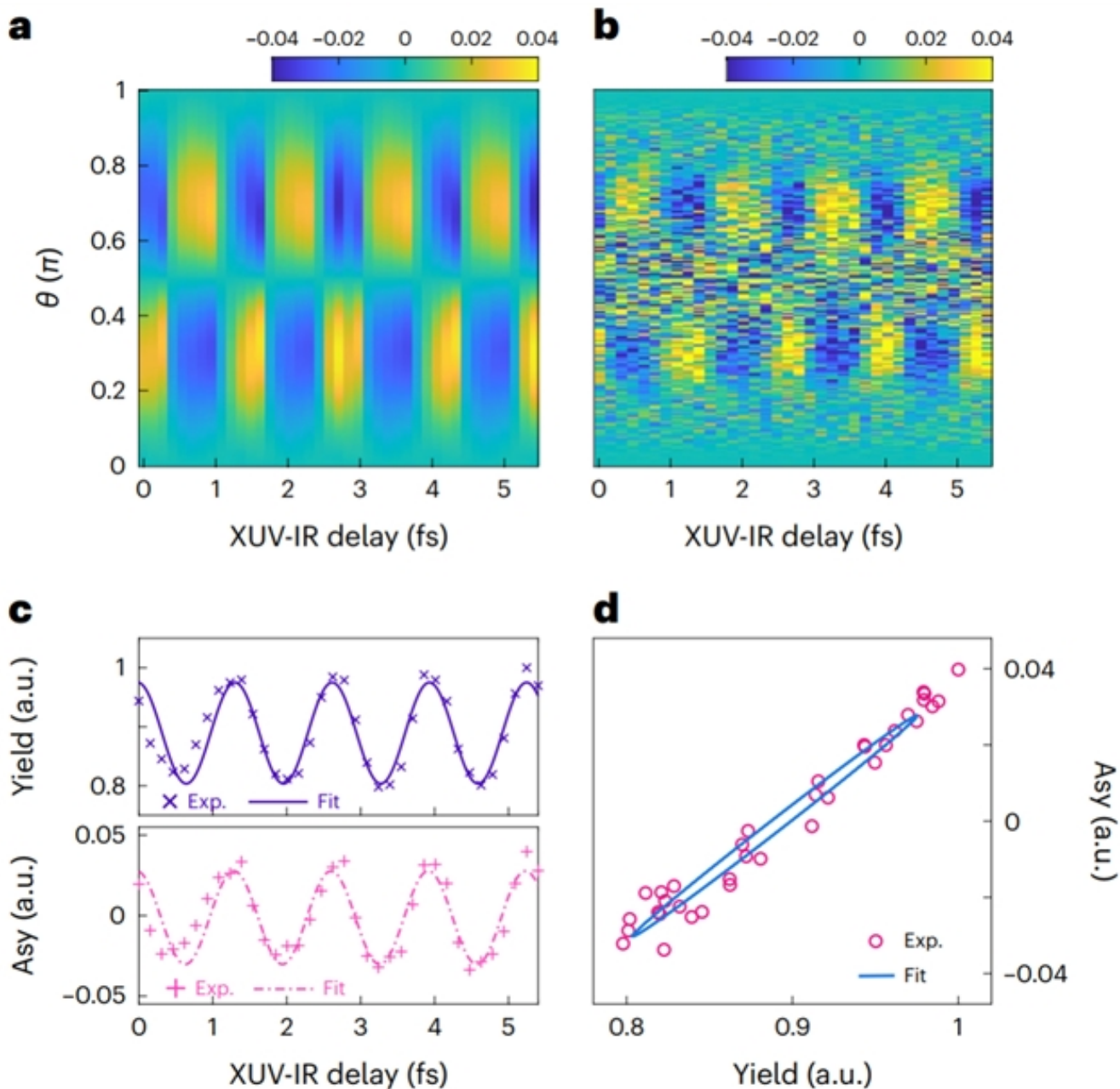


图4. 光电离电四极跃迁与电偶极跃迁干涉导致的光电子产量不对称分布。光电子产率不对称性随着极紫外脉冲和红外激光时间延迟的变化图(a, 理论模拟结果图；b, 实验测量结果图)。c和d展示了电四极跃迁和电偶极跃迁对应的光电离时间延迟。

这项工作为研究光电离非偶极阿秒动力学提供了可靠的具有皮米空间分辨和阿秒时间分辨的实验方法，可以拓展到不同的原子分子，以及不同电离机制下的非偶极效应研究中，为研究光与手性体系以及磁性材料的相互作用提供了新方法。

该工作的第一作者是华中科技大学博士生梁锦台、廖一洁，以及苏黎世联邦理工学院韩猛博士。该工作的主要合作者还有苏黎世联邦理工学院的Hans Jakob W ö rner教授团队成员吉家葆博士生、Leung Chung

Sum博士生、深圳大学的姜维超副教授、日本东北大学的Kiyoshi Ueda教授。该项研究工作得到了科技部国家重点研发计划、基金委创新研究群体和面上项目的资助。

华中科技大学周月明教授最近几年致力于发展阿秒时间分辨测量的新方法、新理论。基于光电子波包干涉，发展了强场隧穿电离的阿秒光电子全息理论，奠定了阿秒光电子全息实现阿秒-亚埃超高时空分辨测量的理论基础，并基于此方法演示了对分子内部电荷迁移、原子分子强场隧穿电离、原子波函数畸变等电子阿秒动力学过程超高时空分辨测量[Phys. Rev. Lett. 116, 173001 (2016); Phys. Rev. Lett. 120, 133204 (2018); Phys. Rev. Lett. 121, 253203 (2018)]。与黎敏教授等人合作，在实验上实现了强场隧穿电离电子波包初始速度的精确测量，揭示了强场隧穿电离的非绝热效应，并实现了隧穿电离电子波包初始位置的测量，精度达到了皮米量级[Phys. Rev. Lett. 122, 183202 (2019); Phys. Rev. Lett. 127, 263202 (2021)]。

韩猛博士现在为堪萨斯州立大学教授, 致力于研究阿秒光脉冲的产生、表征和应用，特别是圆偏振阿秒脉冲，近期研究成果发表于Nature Physics 19, 230-236 (2023); Optica 10, 1044-1052 (2023); Phys. Rev. Lett. 130, 253202 (2023)。（来源：科学网）

相关论文信息：<https://www.nature.com/articles/s41566-023-01349-z>

作者：周月明等 来源：《自然—光子学》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发