

激光诱导强场电离现象的原位表征

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/34977.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！

激光诱导强场电离现象的原位表征。 导读

精确测量飞秒脉冲在相互作用区域内的强度和持续时间对阿秒科学的研究极为关键。然而，传统的高次谐波产生实验在强场情况下的测量精度极其有限。

以色列本古里安大学的研究团队创新性地提出一种新方案，用于原位测量和控制相互作用焦点区域内飞秒脉冲的强度与持续时间。该方案基于共轭聚焦成像和原位离子测量技术，在氦气和氩气环境中开展独立测量并进行模型拟合。精确一致的结果证明了双电离和势垒抑制电离的重要性，为阿秒实验的精确测量提供了参考。

该成果近日发表在国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》，题为In situ characterization of laser-induced strong field ionization phenomena，以色列本古里安大学的Noam Shlomo为论文第一作者，Eugene Frumker为论文通讯作者。

研究背景

超快激光诱导的强场现象在现代物理学中占据重要地位。在阿秒科学研究中，高次谐波产生的三步模型起始于强场驱动的隧穿电离。在大多数强场驱动实验中，精确测量和控制激光在相互作用区域内的强度分布及脉冲持续时间至关重要。但受激光光束质量、聚焦光学元件像差、超快脉冲空间啁啾和脉冲色散等因素影响，直接测量激光脉冲基本特征来推导峰值强度的方法的误差高达50%。此外，高功率激光系统脉冲强度的时间波动和时空分布变化也增加了测量难度。

为解决上述问题，学界采用了如质谱法等的优化方法，但这些方法通常复杂昂贵，且需要极低的气体密度，与高次谐波产生实验不兼容。对于高气体密度下的测量，依靠高次谐波产生的截止点估算激光峰值强度的方法也存在缺陷，实验中高次谐波产生光谱的截止点难以确定，宏观效应还会扭曲单原子高次谐波产生的截止响应，导致无法准确计算强度和脉冲持续时间。

研究团队提出共轭聚焦成像与原位离子测量技术相结合的新方案，对相互作用焦点区域内的强场飞秒脉冲强度和持续时间进行原位测量与控制，突破了传统测量方法的局限。该研究在氦气和氩气中进行独立测量，并通过拟合强场电离动态模型获得准确结果。研究中明确了双电离和势垒抑制电离在强场电离中的重要意义，并实现了对驱动激光的直接空间分辨表征，解决了相互作用区域的平均化问题，提升了阿秒实验的准确性和可靠性。

创新研究

研究团队提出一种新的原位测量和控制方法，通过在氦气和氙气环境中的独立测量，验证了动态理论模型与实验结果高度契合。该模型综合考虑了单电离、顺序双电离、非顺序双电离、非顺序激发、再碰撞诱导激发及后续电离，以及强场电离的势垒抑制电离现象。实验装置如图1所示，钛宝石放大器产生的激光脉冲聚焦于气体喷射处，离子探测器由接地板和金属网构成。激光使气体电离后，电阻变化产生电流变化，并通过示波器记录电压。研究团队利用LTspice模拟电路瞬态响应，在与实验电压曲线拟合后获取了初始电阻、电离脉冲到达时间等关键参数，实现了对离子信号的有效检测与分析。

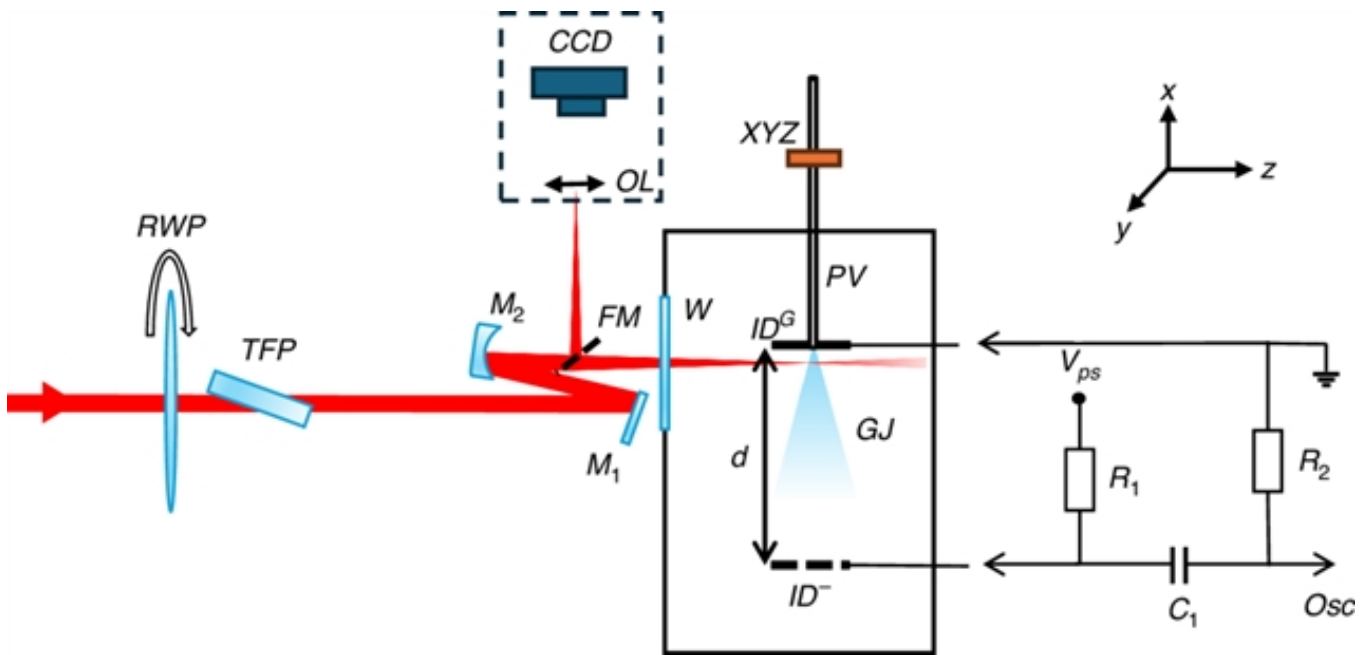


图1. 实验装置示意图

研究团队对不同气体在强场电离中的特性展开重点研究。测量发现，激光束中心区域主要发生隧穿电离，远离中心则逐渐转变为多光子电离。飞秒激光脉冲聚焦时，氦气和氙气的电离动力学过程如图2所示。由于氦气电离能高，双电离可忽略不计，以单电离为主，且在激光脉冲峰值前就有明显电离现象；氙气电离能较低，双电离显著，在激光脉冲强度较低时电离率就较高，且双电离使氙离子的分布比较特殊。

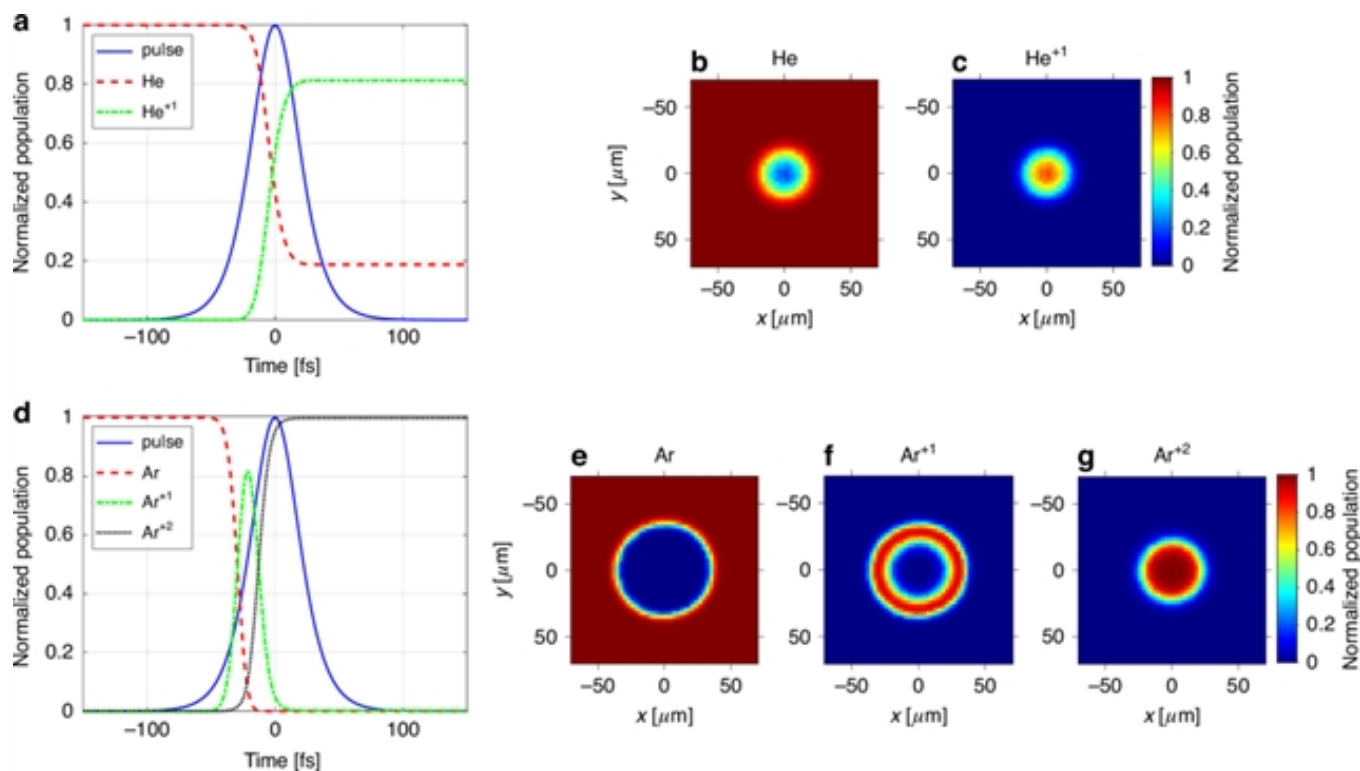


图2. 氦和氩在焦点体积内的空间和时间电离动力学分析

此外，研究团队围绕激光脉冲能量与离子信号的关系、激光脉冲持续时间的确定等方面对理论模型和实验结果进行了分析。如图3所示，团队测量了不同气体压力下氦气和氩气的离子信号随激光脉冲能量的变化，归一化后发现电离曲线与气体密度无关。如图4所示，团队将理论计算的离子产率与实验归一化离子信号拟合，得到激光脉冲半高宽持续时间，其中氦气为 (41.7 ± 0.5) fs，氩气为 (43.3 ± 1.6) fs。

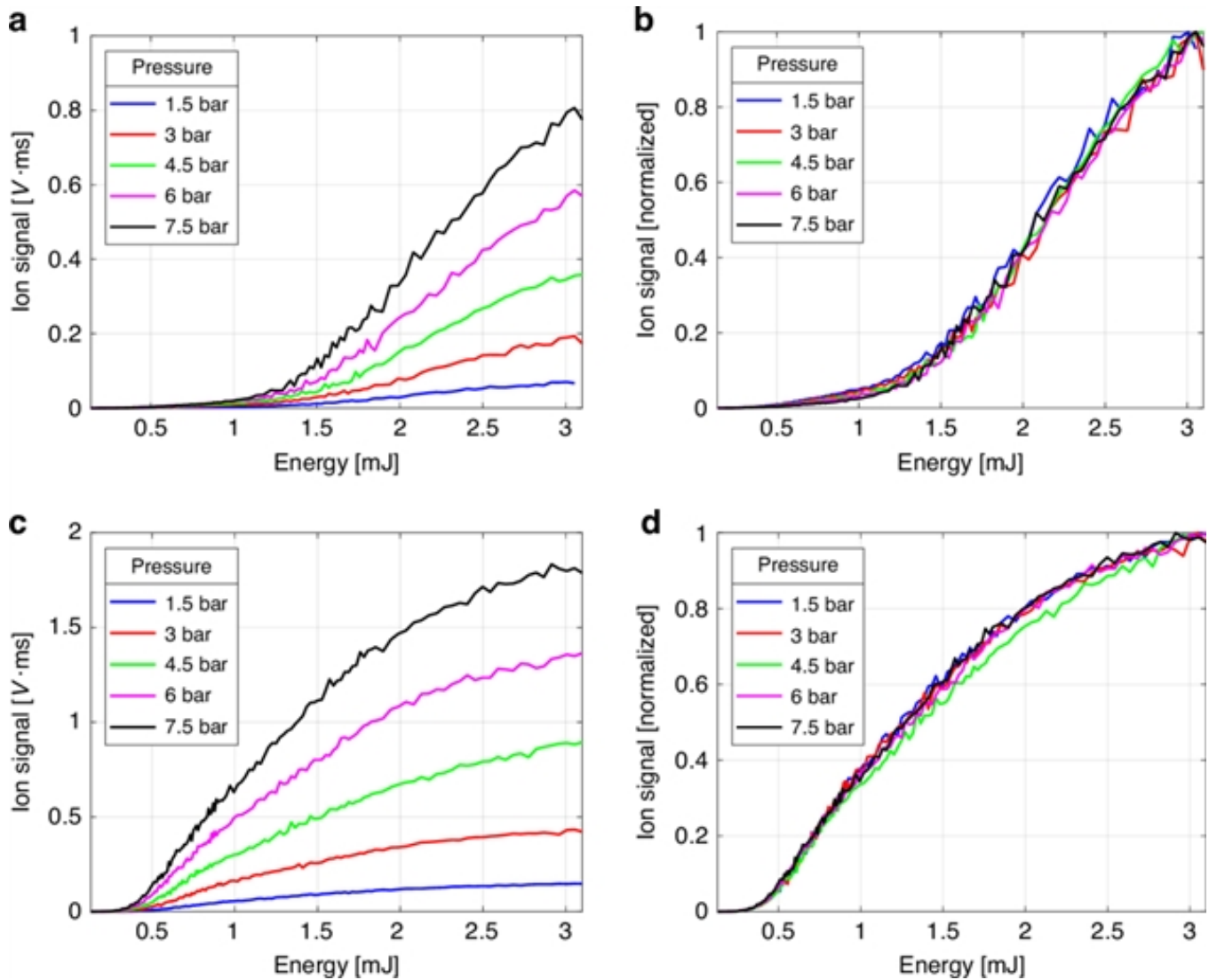


图3. 测量的离子信号与激光脉冲能量

基于上述结果，研究团队验证发现：在不同气体的电离过程中，氦气由于电离能高，在测量的强度范围内主要是单电子电离；而氙气的双电离现象显著，顺序双电离起主要作用，非顺序双电离次之，同时势垒抑制电离也发挥了重要作用。通过对这些电离过程的分析，进一步验证了强场电离模型中考虑多种电离现象的重要性。

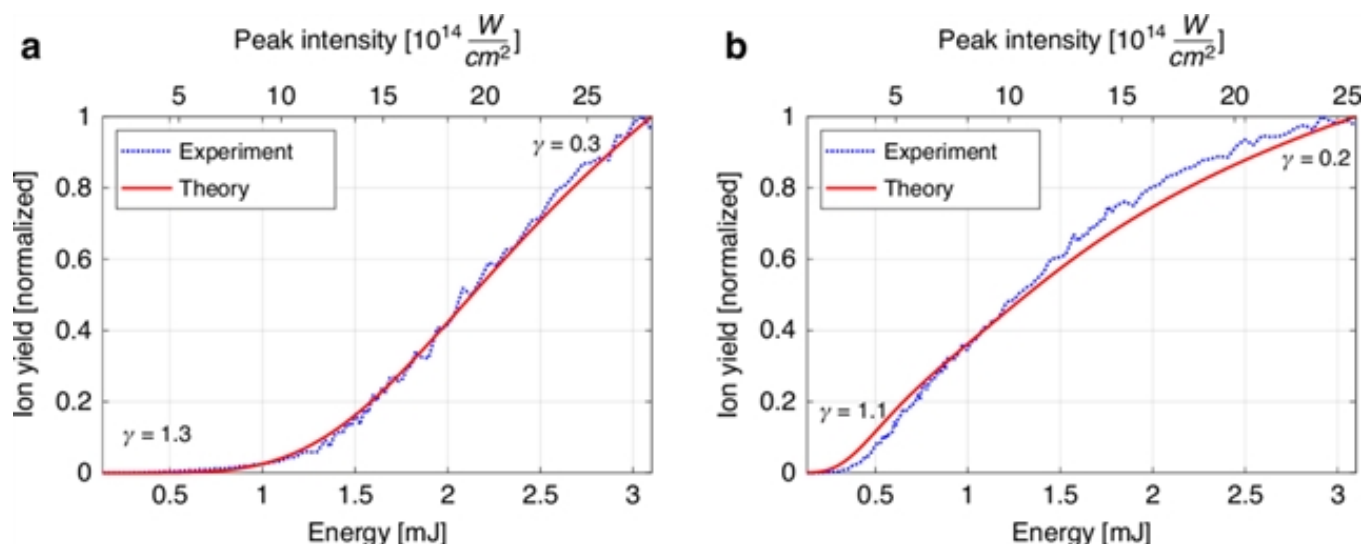


图4. 强场电离模型拟合氩气和氖气7.5 bar下的测量电离曲线

未来展望

本文聚焦于阿秒科学中强场飞秒脉冲参数测量的关键问题，提出结合共轭聚焦成像与原位离子测量技术的创新方案。通过在氩气和氖气中的实验，利用精心构建的强场电离动态模型拟合数据，成功实现对相互作用焦点区域脉冲强度和持续时间的原位测量与分析。研究发现归一化电离曲线与气体密度无关，精确测定了激光脉冲的持续时间，明确了不同气体电离过程中各类电离现象的作用机制。

未来研究可进一步优化强场电离模型，使其能够涵盖更复杂的物理过程，如近单周期飞秒激光脉冲的情况，并充分考虑时空耦合的影响，从而提升对极端条件下强场电离现象的解释和预测能力。本研究成果有望广泛应用于成像轨道和追踪分子动力学等阿秒科学实验中。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01808-y>

作者：Eugene Frumker 来源：《光：科学与应用》

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