
测量并控制多电子原子超快电离后电子-离子的纠缠度

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41270.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！

测量并控制多电子原子超快电离后电子-离子的纠缠度。 导读

阿秒激光脉冲驱动多电子原子的电离，提供了从时间演化角度理解和操控量子纠缠的载体。上海交通大学和东京大学团队通过数值模拟多电子原子的含时薛定谔方程，研究了两束超短紫外脉冲驱动下氙原子的共振增强多光子电离，实现了电子-离子纠缠度的精确控制。研究人员利用第一束光共振激发氙原子，再利用另一束光电离处于激发态的氙原子。计算发现，随着两束激光脉冲的时间延迟不同，光电子的动量分布发生改变。研究人员还开发出通过光电子角分布定量测量纠缠程度的新方法。该成果为解决超快过程中纠缠现象的实验测量难题提供了切实可行的方案，对量子科技发展具有重要推动意义。

相关研究成果以Coherent control of electron-ion entanglement in multiphoton ionization为题发表在《Light: Science Applications》上。

量子纠缠是量子力学区别于经典物理的重要特征之一，也是量子计算、精密测量和信息安全等前沿技术的根基。作为自然界最迷人的物理现象之一，纠缠不仅揭示了粒子间超越时空的关联，更在基础研究和科技应用中持续催生新的突破。

随着超快激光技术的迅猛发展，科学家已能够在飞秒至阿秒尺度上捕捉电子的动态行为，高次谐波光谱、阿秒条纹相机、光电子全息等先进手段相继出现，将测量精度推向前所未有的水平。然而，尽管实验技术不断进步，对纠缠本身在超快过程中的产生、演化与调控机制，仍缺乏系统而直接的观测方法。如何在极端时间尺度下对纠缠进行定量测量与主动操控，成为超快科学与量子物理交叉领域的一项关键挑战。

双脉冲相干控制新方案

近日，上海交通大学何峰教授、李洋副研究员课题组和东京大学Ishikawa教授课题组通过数值模拟研究，设计了一种双色激光脉冲泵浦-探测方案。他们首先利用第一束激光将氙原子激发至特定能级，再利用第二束光脉冲将其电离。通过精确调节两束脉冲之间的延迟，研究人员能够控制不同电离路径之间的量子干涉，从而主动操控出射光电子与离子的纠缠程度。

图1. 双色脉冲调控氦原子多光子电离示意图

多电子模拟揭示真实动力学

以往，基于单电子模型的理论模拟，无法准确描述电子-离子之间的量子纠缠。研究团队采用先进的多电子数值模拟方法，包括多组态含时Hartree-Fock方法和含时R-矩阵方法，计算了光电子与离子纠缠度对两束激光时间延迟的依赖关系。多电子计算清晰地展示了电子-离子纠缠度随着两束脉冲延迟呈现周期性变化，这是传统单电子模型完全无法捕捉的量子现象。

从角分布中定量提取纠缠信息

计算结果表明，随着两束激光时间延迟的改变，出射光电子的角向分布会发生明显的改变。在此基础上，团队创新性地提出一种分析方法，通过测量光电子角分布随延迟的变化，并从这些角分布中提取光电子分布各向异性参数，据此成功反演并量化了光电子的量子态纯度——这是表征电子-离子纠缠程度的关键指标。该方法巧妙地解决了传统测量中缺乏相位信息的难题，为实验上定量测量纠缠提供了实用工具，大大降低了量子纠缠表征的技术门槛。

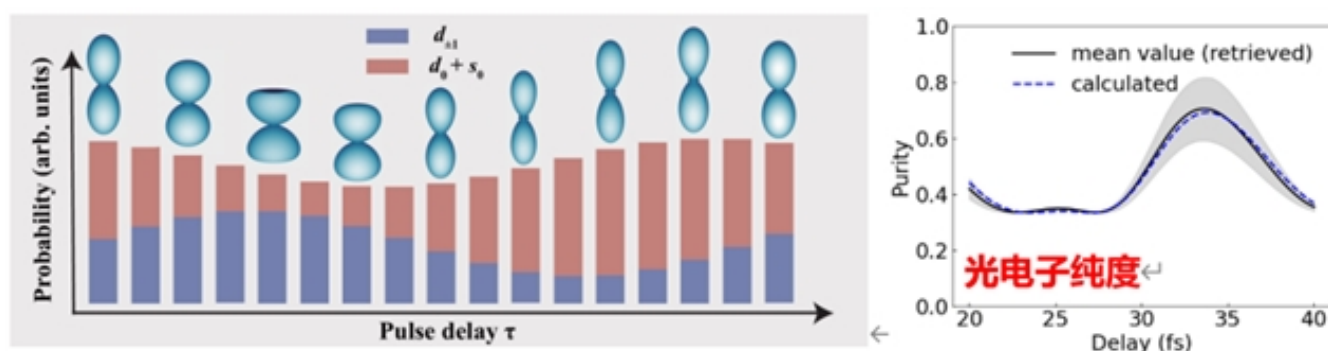


图2. 光电子角分布及重构出的光电子纯度随双色脉冲延时的变化

应用前景广泛

这项工作发展出的操控与测量方法，为在原子、分子乃至固体材料中研究复杂的量子关联动力学提供了参考。未来，这一技术有望应用于量子信息处理、超快光谱学等多个前沿领域。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02151-y>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

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