巨共振光电离后氙原子中俄歇电子动力学的时间域测量

Mahmudul Hasan,[1,*] Jingsong Gao,[1,*] Hao Liang,[2,*] Yiming Yuan,[1] Zach Eisenhutt,[1] Ming-Shian Tsai,[3] Ming-Chang Chen,[3] Hans Jakob W¨orner,[4] Artem Rudenko,[1] 和 Meng Han[1,†]

[1] *James R. Macdonald Laboratory, Department of Physics,Kansas State University, Manhattan, Kansas,* 66506, *USA*[2] *Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg,* 69117, *Germany*

[3] *Institute of Photonics Technologies, National Tsing Hua University, Hsinchu 300044, Taiwan*

[4] *Laboratory of Physical Chemistry, ETH Zürich,Vladimir-Prelog-Weg 2, 8093 Zürich, Switzerland*（日期：2025年12月24日）

arXiv:2512.19965v1 [physics.atom-ph] 23 Dec 2025

俄歇–迈特纳（AM）衰变的时间分辨测量 [《自然》419, 803（2002年）] 标志着阿秒科学发展历程中的一个里程碑。迄今为止，时域实验得到的 AM 衰变过程时间常数，与传统能量域测量推导出的数值一致。限制这些研究时间分辨率的主要因素之一，是用于探测由内壳层光吸收触发的电子动力学的激光脉冲，其载波包络相位（CEP）未锁定。在本研究中，我们结合载波包络相位稳定的少周期镱激光脉冲，利用中心能量为 130 eV 的阿秒软X射线（atto-SXR）脉冲，对氙和氪进行了时间分辨内壳层电子能谱测量。我们观察到，氙的 $N_{4,5}OO$ 俄歇电子呈现清晰的条纹图样，但相对于 $4d$光电子却出现了出乎意料的 $\sim$ 1.32 fs 时间偏移。此外，氙的条纹化俄歇电子能量积分产额在泵浦-探测时间延迟为 4 fs 时出现明显极小值。这两种观测现象均无法用现有条纹理论解释，也都与能量域测量推断的寿命不一致。氪的 $M_{4,5}NN$ 俄歇电子与 $3d$ 内壳层光电子在能量上部分重叠，且未表现出这些异常特征。本研究为理解巨偶极共振区重原子的内壳层电子动力学提供了新见解，并为对含碘或溴原子的分子系统开展阿秒软X射线光谱学奠定了基础。

阿秒光脉冲的发明及相关方法学，为在单个原子内实现电子运动的时间分辨测量打开了大门 [1]。该领域的一个重要里程碑于 2002 [2], 实现：研究人员首次在时域中研究了以中心能量为 97 eV 的阿秒脉冲电离氪的 M 壳层后发生的俄歇-迈特纳（AM）弛豫动力学。在这项实验中，研究人员采用载波包络相位（CEP）随机的少周期可见光脉冲，探测俄歇电子发射的时序，测得氪的 M 壳层空穴寿命为 7.9 fs，与此前的频域测量结果 [3] 符合良好。此后，中红外高次谐波产生（ HHG ）驱动光源的发展 [4–10] 以及 X 射线自由电子激光（XFEL）设施的进步 [11, 12] ，使得软 X 射线（SXR）波段（ >124 eV）的孤立阿秒脉冲得以产生，从而能够探测内壳层和芯层能级中更快的电子动力学。迄今为止，桌面式阿秒软 X 射线泵浦-探测光谱学主要依赖于探测光学共振的瞬态吸收 [13–17], ，因为与带电粒子测量相比，这种方法具有更高的灵敏度和能量分辨率。然而，电子能谱学通常能更直接地揭示潜在的超快电子动力学，尤其是内壳层弛豫过程；近期利用强阿秒 XFEL 脉冲的研究已展示了这一点 [18, 19]。与此同时，近期的演示由后压缩工业级镱激光器驱动高次谐波产生所生成的阿秒软X射线脉冲，已展现出优异的稳定性和高通量 [20–22], ，为台式装置研究内壳层电子动力学注入了新的动力。

在本快报中，我们报告了对氙原子和氪原子开展的时间分辨内壳层电子能谱实验，主要目的是获得巨偶极共振附近光电离后俄歇介导弛豫动力学的时域图像。俄歇介导衰变是芯层和芯能级电子动力学的典型过程：外价电子填补内层空穴，过剩能量则转移给第二个价电子，使其逸出，如图 1(A) 所示。在时域中，俄歇电子的发射可用指数衰减函数描述，其特征参数为常数 τ_{Auger}，称为寿命，通常为数飞秒至数十飞秒。俄歇介导衰变的寿命既可通过能量域测量 [3]推断，也可利用阿秒条纹技术测量：采用可见光 [2], 、中红外 [23], 或太赫兹（THz）场 [24] ，在电子跃迁至连续态后调制其电子动量。然而，迄今为止，时域研究所能达到的细节程度一直受到所用探测脉冲载波包络相位随机性和/或软X射线脉冲持续时间的限制。此外，

探测光场不仅会使发射电子发生条纹化，还会与离子中的激发芯空穴态相互作用 [25–27]。对于氙和氪的 d壳层电子光电离，由于巨偶极共振 [28],会增强电子-电子关联，使共振峰增强，并将截面共振拓展至较宽的能量范围（氙为 80-150 eV，氪为 100-200 eV），俄歇介导衰变过程尤为值得关注。目前，即使是最先进的原子理论 [29, 30] 也无法对其中复杂的关联电子动力学给出从头算预测。

在本研究中，我们使用阿秒软X射线脉冲启动内壳层动力学，并通过载波包络相位稳定的少周期 Yb 激光脉冲（中心波长为 900 nm）对其进行探测。在零时刻区域，我们观测到来自氙的 $N_{4,5}OO$ 俄歇电子具有明显的能量条纹特征；相对于 $4d$ 光电子，其时间偏移出人意料地达到 $\sim$ 1.32 fs。此外，长扫描时间分辨测量显示，在泵浦-探测延迟为 $\sim$ 4 fs 时，俄歇电子的产额出现极小值。这两种现象均与通过同步辐射 [31–35] 的线宽测量推断出的 6–8 fs 俄歇寿命相矛盾。对于氪，俄歇电子在能谱上与 $3d$ 光电子部分重叠，因此未观察到这些出乎意料特征的明确证据。

我们的实验采用了最近建立的角分辨条纹谱束线，并配备明亮的阿秒软X射线光源 [22]。为进入巨共振区域，我们定制了一个带宽相对较窄的孤立阿秒软X射线脉冲：该脉冲由少周期 Yb 激光驱动，在低压（0.5 bar）氖气中通过高次谐波产生生成，随后经由一片厚度为 200 nm 的银滤光片滤波。图 1(B) 展示了测得的高次谐波谱随驱动激光脉冲载波包络相位的变化，以及滤光片透射曲线。正如图 1(C) 所示，一个覆盖 110 eV 至 150 eV 的高斯形软X射线超连续谱出现在相对载波包络相位为 3.2 π 时，并用于电离氙原子和氪原子。根据光电子条纹轨迹 [22]，该阿秒脉冲的持续时间经表征约为 100 as。我们使用高能量速度映射成像（VMI）谱仪 [36, 37]测量光电子动量分布随时间延迟的变化，该时间延迟介于

阿秒软X射线脉冲和短红外脉冲。更多实验细节见补充材料（SM）。

图 1(D) 和 1(E) 分别展示了仅由阿秒软X射线脉冲电离氙原子和氪原子后，经阿贝尔反演得到的实测电子动量分布。可以观察到一系列同心环。图 1(F) 和 1(G) 给出了相应的能谱，更清晰地标示了各通道的贡献。最外侧、能量约为 100 eV 的环

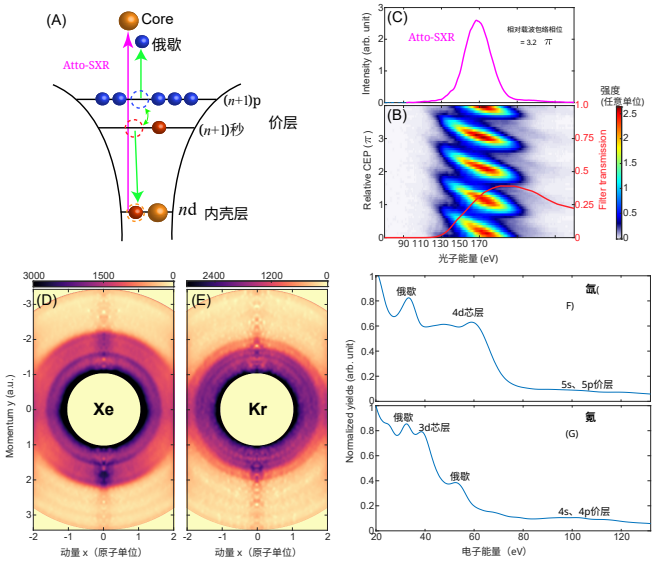

图 1. 桌面式阿秒软X射线脉冲电离氙原子和氪原子的内壳层电子能谱。(A) 光电子（洋红色箭头）和俄歇电子（绿色箭头）发射示意图。**(B)** 经过 200 nm 厚银滤光片后测得的载波包络相位分辨的高次谐波超连续谱，并叠加显示滤光片透射率（红色曲线）。**(C)** 相对载波包络相位为 3.2 π时非常平滑的高斯形高次谐波谱，该谱用于电离实验。**(D, E)** 分别测得的氙原子和氪原子电子动量分布。这些分布是经过阿贝尔反演的中心动量切片，因此垂直轴方向存在一些伪影。**(F,G)** 角度积分范围为 5° 至 30°后得到的相应电子能量分布，其中 0° 定义为垂直轴（即偏振方向）。

对应于来自价轨道的光电子，它们在软X射线区的截面较小；而较强的内侧环则对应于内壳层光电子和俄歇电子。在氙中，$4d$ 光电子的能量中心为 58 eV，其后是能量为 33 eV 的俄歇电子带。这个 33 eV 的俄歇带对应于衰变至 Xe^{2+} 基态（$5p^{-2}$）的通道（更多讨论见图 4）。在氪中，$3d$光电子的能量中心为 40 eV，位于能量分别为 54 eV 和 32 eV 的两个俄歇电子带之间，它们分别对应于 Kr^{2+}的 $4p^{-2}$ 态和卫星$4p^{-3}nl$ 态。这些判定均与此前对氙 [31] 和氪 [38]进行的同步辐射测量结果吻合。

我们的首次时间分辨实验采用阿秒条纹化测量，将载波包络相位稳定的红外脉冲与阿秒软X射线脉冲在时间上重合。电子在不同瞬间发射，可根据它们从红外场获得的不同条纹化动量加以区分。图 2(A) 展示了氙的光电子能谱随两个脉冲之间时间延迟的变化；这两个脉冲沿偏振方向的一侧发射，

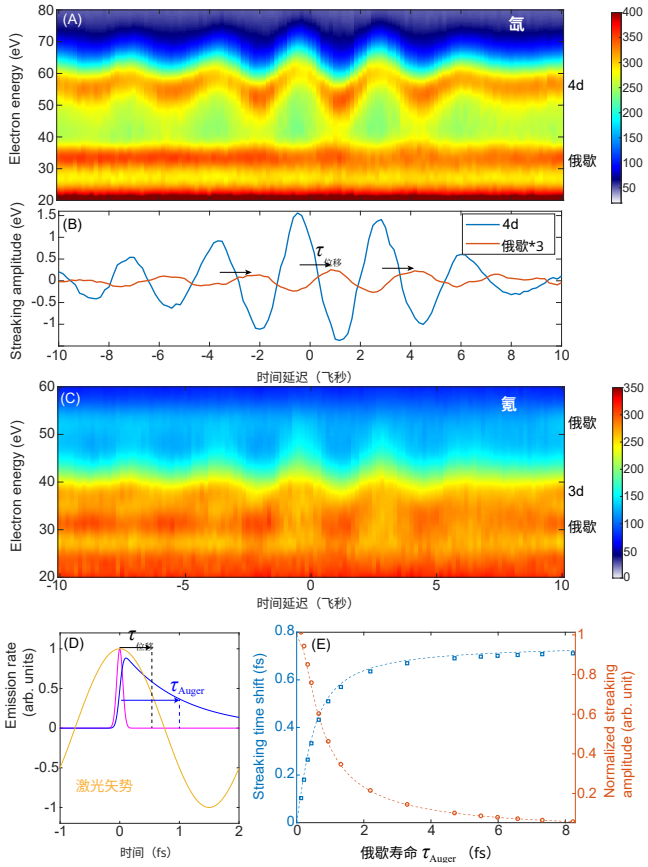

图 2. **氩原子和氪原子的阿秒条纹测量。(A、C)** 分别对氩和氪的测量电子条纹轨迹进行角积分，积分范围为 5° 至 30° 。在 **(A)** 中，我们观察到 $4d$ 光电子和俄歇电子均存在动量条纹效应，时间偏移为 τ_{shift}。为量化这一时间偏移，**(B)** 展示了提取出的条纹振幅，并对俄歇电子的振幅进行了放大显示。**(D)** 示意图展示了光电子（洋红色曲线）和俄歇电子（蓝色曲线）的条纹效应。光电子的产生速率与阿秒软X射线脉冲的强度包络成正比，而俄歇电子的产生则通过与指数衰减函数卷积来建模，以反映俄歇–迈特纳过程的有限寿命。**(E)** 计算得到的俄歇电子条纹时间偏移和条纹振幅随其寿命的变化。虚线表示经典解析结果 [式 **(1)**] ，数据点则为量子模拟结果。预测的最大时间偏移接近 0.75 fs，即四分之一个光学周期。然而，我们的实验数据表明时间偏移约为 1.32 fs，这对现有理论提出了挑战。

。对于 $4d$ 光电子带，可以观察到显著的能量振荡（即条纹化现象）；而俄歇带也呈现出较弱但可辨认的条纹化现象，与 $4d$ 带相比有明显的时间偏移。为量化这一偏移，图 2(B) 展示了两个能带的条纹振幅，并减去其延迟平均值。条纹成像振幅定义为加权能量，即 $\int W(\tau,\ E_k)E_k dE_k / \int W(\tau,\ E_k)dE_k$，其中光电子产额为 $W(\tau,\ E_k)$，对应的时间延迟为 τ，能量为 E_k。俄歇带的条纹成像振幅乘以 3 的放大因子。根据条纹振幅确定的光电子与俄歇电子发射之间的条纹时间偏移 τ_{shift} 约为 1.32 fs，接近红外脉冲的半个光学周期，如图 2(B) 中黑色箭头所示。在补充材料中，我们验证了 $4d$ 与价层光电子的条纹轨迹几乎同步。因此， $4d$电子可作为计时参考（红外矢势），因为残余光电离延迟可以忽略不计。此外，我们还提供了两个视频，展示原始速度映射成像图像和经阿贝尔反演图像的角分辨条纹化。

观察到的俄歇电子显著的 1.32 飞秒时间偏移，无法用条纹化图像来解释；该图像基于同步辐射测量推断出的约 6–8 飞秒寿命 [31–35] 以及近期一次极紫外四波混频测量得到的 6 飞秒寿命 [39]。图 2(D) 示意性地展示了光电子（洋红色曲线）和俄歇电子（蓝色曲线）的条纹成像原理。光电子的发射速率遵循阿秒软X射线脉冲的强度包络，而俄歇电子的发射则建模为与指数衰减函数的卷积，以考虑俄歇介导过程的有限寿命 τ_{Auger} 。从经典角度来看，俄歇电子在时间 t 的发射概率为 $\exp(-t/\tau_{\mathrm{Auger}})\,\Theta(t)/\tau_{\mathrm{Auger}}$ ，此后会受到红外场矢势 $A(t) = A_0\cos[\omega(t-\tau)]$, 的条纹化作用，其中 $\Theta(t)$ 表示 Heaviside阶跃函数。因此，俄歇电子的平均动量偏移为

$$\begin{aligned}\langle \Delta p(\tau)\rangle &= \int_0^\infty A_0\cos[\omega(t-\tau)]\exp(-t/\tau_{\mathrm{Auger}})/\tau_{\mathrm{Auger}}\,\mathrm{d}t \\ &= \frac{A_0}{\sqrt{1+(\omega\tau_{\mathrm{Auger}})^2}}\cos[\omega\tau-\arctan(\omega\tau_{\mathrm{Auger}})].\end{aligned} \tag{1}$$

当俄歇寿命较短时，俄歇电子的条纹成像振幅与光电子大致相同，条纹成像时间延迟约等于俄歇寿命。较长的俄歇寿命会使条纹成像振幅按 $1/\sqrt{1+(\omega\tau_{\mathrm{Auger}})^2}$ 的比例减小，并使相对于矢势的时间偏移增大至 $\arctan(\omega\tau_{\mathrm{Auger}})/\omega$ 。当俄歇寿命超过一个光学周期时，条纹效应会显著减弱，并出现由多周期干涉引起的边带 [2]。值得注意的是，当俄歇介导衰变的时间非常长时，俄歇电子的最大时间偏移趋近于四分之一个光学周期（ $\arctan(\infty) = \pi/2 \approx 0.75$ fs），因为电子实际上几乎不会从激光场获得净能量。

为验证上述分析，我们参照 Smirnova等人 [40], 的开创性工作，对双电离俄歇介导过程进行了模拟。我们采用强场近似，忽略电离后电子与离子之间以及电子之间的相互作用，并采用中心动量近似，将电离偶极和组态相互作用视为与能量无关的常数（更多理论细节见 SM）。计算不同寿命下的双电离谱后（若干代表性的条纹轨迹见 SM），我们采用与实验数据相同的分析流程，提取相应的条纹时间偏移和条纹成像振幅。数值结果如图 2(E) 所示，并与经典模型的预测结果一并呈现。尽管该经典模型不包含边带或周期间干涉，却能准确再现加权中心动量对延迟的依赖关系，与量子模拟结果高度吻合。随着俄歇寿命增加，条纹成像振幅减小，而时间偏移增大，最终饱和在约 0.75 fs。

原则上，可以通过条纹成像振幅或时间偏移推断俄歇寿命。然而，这两种方法得出的结果彼此不一致。测得的光电子与俄歇电子的条纹成像振幅之比为 14.3 ± 0.8, 对应的估计寿命为6.8 ± 0.4 fs，与文献值 [31, 39]较为吻合。相比之下，实验观测到的约 1.32 fs 时间偏移超过了理论预测的最大值，这对当前的理论认识构成了挑战。

我们的第二项测量是一项泵浦-探测实验，其中两束脉冲之间的时间延迟从重叠状态逐渐扫描到充分分离状态。图 3(A,B) 分别展示了氙和氪的时间分辨电子能谱。对于氙，我们观察到，33 eV 处整个俄歇带的积分电子产额在延迟为 4 fs 时达到最小值，如图 3(A) 中的红色箭头所示。相应的原始电子产额以及经过低通频率滤波器处理后的结果见图 3(C)。图 3(D) 展示了氪在相近能量范围内的俄歇带结果。在那里，

快速的产额振荡源自 $3d$光电子能带的泄漏。应用低通滤波器后，俄歇产额变得近乎平坦，这与一般的条纹化图像一致：红外场会调制能量分布，但不会改变总产额。能量积分光电子产额也支持这一总体图像。因此，氙俄歇产额在 4 fs 处的极小值表明，红外脉冲可能开启了额外的、更快的衰变通道，并使其在 0 至 4 fs 的延迟窗口内暂时占据主导地位，超过正常的俄歇介导过程。

在图 4(A,B) 中，我们展示了.....的结合能

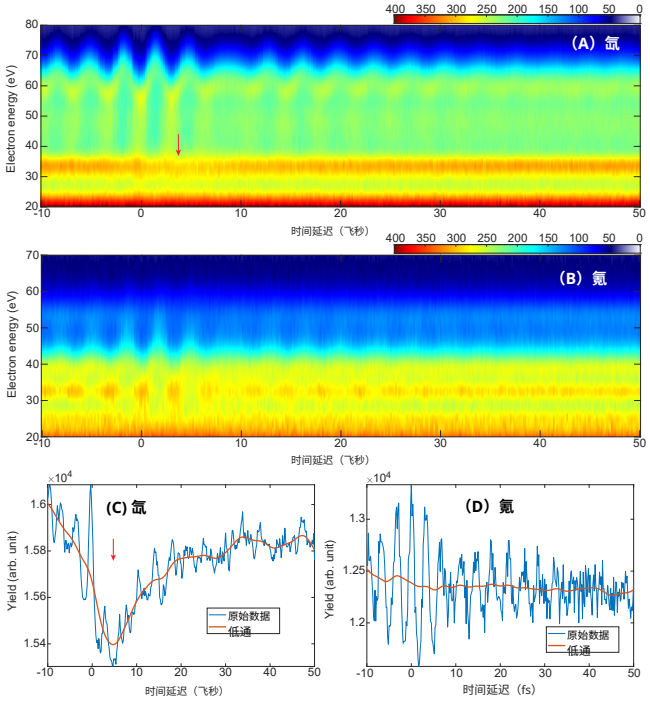

图 3. **长时间范围的泵浦-探测实验数据。(A-B)** 分别为氙和氪原子的实测电子能谱随泵浦-探测时间延迟的变化。**(C-D)** 氪在 29–35 eV 范围内、氙在 29–37 eV 范围内的能量积分俄歇电子产额。橙色曲线表示应用低通滤波器（<0.5 eV）后的结果。在 (A) 和 (C) 中，红色箭头标示了俄歇电子产额极小值对应的延迟位置。

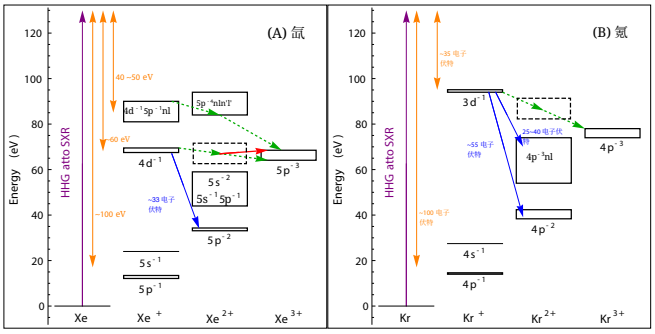

图 4.（A）氙 [41] 和（B）氪 [42]的相关能级与跃迁。虚线框表示一组里德伯卫星态。

单电荷、双电荷和三电荷离子的相关能级与跃迁，而两个态之间的能隙对应于发射电子的动能。对于氙，33 eV 的俄歇带对应于从 $4d^{-1}$ 空穴态跃迁至 Xe^{2+}的基态，即 $5p^{-2}$。 $5p^{-2}$ 与 $5s^{-1}5p^{-1}$ 或 $5s^{-2}$ 之间的能隙大于 10 eV。在我们的实验中，根据光电子的条纹振幅，红外强度经过精确校准为 4×10^{11} W/cm^2 ,

该振幅过低，不足以使 $5p^{-2}$ 态与更高能的$5s^{-1}5p^{-1}$ 或 $5s^{-2}$ 态发生显著耦合。因此，33 eV 处的俄歇产额不太可能降低。另一种情况是，红外场能够隧穿电离 $5p^{-3}nl$ 态中的高里德伯电子；先前研究 [25–27], 发现了这一现象，因此预计这一路径（$4d^{-1} \to 5p^{-3}nl$ 红外 $\longrightarrow 5p^{-3}$）会比我们关注的通道（$4d^{-1} \xrightarrow{33\,\mathrm{eV}} 5p^{-2}$）更占主导。然而，这种情况仍无法解释 4 fs 处的产额极小值，因为 $5p^{-3}nl$ 态的寿命通常长于 6 fs [39]。即使不考虑红外脉冲持续时间造成的卷积效应，如此长的寿命也无法在 4 fs 处产生产额极小值。因此，我们这些引人关注且出乎意料的观测结果亟待未来开展更深入的研究。

总之，我们对氩原子和氪原子进行了阿秒软 X 射线泵浦-探测光谱测量，并在氩的 $N_{4,5}OO$ 俄歇-迈特纳衰变中发现了两个意想不到的特征：相对于 $4d$光电子，条纹化时间偏移很大，为 ∼1.32 fs；并且在延迟 4 fs 时，积分俄歇产额出现了显著极小值。这两项观测结果都远超现有条纹模型的预测，也与能量域测量所得的寿命不一致，这表明目前尚未解析的额外多电子相互作用或强场相互作用影响了巨偶极共振区的衰变动力学。这些结果揭示了重原子内壳层电子动力学中此前未被认识到的复杂性，并为对含重元素分子系统开展阿秒软 X 射线研究铺平了道路。

我们感谢 C. Aikens、J. Millette 和 S. Chainey 提供技术支持。M. Han 感谢孟胜教授参与讨论。堪萨斯团队获得了美国能源部科学办公室基础能源科学办公室化学科学、地球科学与生物科学部的资助，项目编号为 DE-FG02-86ER13491。M.-C.C. 感谢台湾国家科学及技术委员会提供资助，项目编号为 113-2112-M-007-042-MY3。

* 这些作者对本研究的贡献相同 † meng9@ksu.edu

[1] F. Krausz，诺贝尔讲座：亚原子运动，《现代物理评论》**96**，030502（2024年）。[2] M. Drescher、M. Hentschel、R. Kienberger、M. Uib- eracker、V. Yakovlev、A. Scrinzi、T. Westerwalbesloh、U. Kleineberg、U. Heinzmann 和 F. Krausz，时间分辨原子内壳层光谱，《自然》**419**，803（2002年）。[3] M. Jurvansuu、A. Kivim¨aki 和 S. Aksela， Ar $2p^{-1}$、 Kr $3d^{-1}$、 Xe $3d^{-1}$和 Xe $4d^{-1}$ 态的本征寿命宽度，《物理评论A》**64**，012502（2001年）。

[4] B. Shan 和 Z. Chang，《利用长波长驱动场显著扩展高次谐波截止能量》，《物理评论A》**65**，011804（2001）。[5] T. Popmintchev、M.-C. Chen、D. Popmintchev、P. Arpin、S. Brown、S. Ali˘sauskas、G. Andriukaitis、T. Bal˘ciunas、O. D. M¨ucke、A. Pugzlys、 *et al.*，《中红外飞秒激光器产生的keV X射线区明亮相干高次谐波》，《科学》**336**，1287（2012）。[6] M.-C. Chen、P. Arpin、T. Popmintchev、M. Gerrity、B. Zhang、M. Seaberg、D. Popmintchev、M. Murnane 和 H. Kapteyn，《台式光源产生的跨越水窗的明亮、相干超快软X射线谐波》，《物理评论快报》**105**，173901（2010）。[7] N. Ishii、K. Kaneshima、K. Kitano、T. Kanai、S. Watan- abe 和 J. Itatani，《利用少周期红外脉冲在水窗中产生载波包络相位依赖的高次谐波》，《自然·通讯》**5**，3331（2014）。[8]J. Li、X. Ren、Y. Yin、K. Zhao、A. Chew、Y. Cheng、E. Cunningham、Y. Wang、S. Hu、Y. Wu、 *et al.*，《53阿秒X射线脉冲到达碳K边》，《自然·通讯》**8**，186（2017）。[9] T. Gaumnitz、A. Jain、Y. Pertot、M. Huppert、I. Jor- dan、F. Ardana-Lamas 和 H. J. W¨orner，《被动CEP稳定的中红外驱动场产生的43阿秒软X射线脉冲的条纹化》，《光学快报》**25**，27506（2017）。[10] Y. Fu、K. Nishimura、R. Shao、A. Suda、K. Midorikawa、P. Lan 和 E. J. Takahashi，《用于单次软X射线光谱学的高效超快水窗谐波产生》，《通讯物理》**3**，92（2020）。[11] J. Duris、S. Li、T. Driver、E. G. Champenois、J. P. MacArthur、A. A. Lutman、Z. Zhang、P. Rosenberger、J. W. Aldrich、R. Coffee、 *et al.*，《自由电子激光器产生的吉瓦峰值功率可调谐孤立阿秒X射线脉冲》，《自然·光子学》**14**，30（2020）。[12] Z. Guo、T. Driver、S. Beauvarlet、D. Cesar、J. Duris、P. L. Franz、O. Alexander、D. Bohler、C. Bostedt、V. Aver- bukh、 *et al.*，《利用X射线自由电子激光器进行阿秒泵浦-探测光谱学的实验演示》，《自然·光子学》**18**，691（2024）。[13] Y. Pertot、C. Schmidt、M. Matthews、A. Chauvet、M. Huppert、V. Svoboda、A. Von Conta、A. Tehlar、D. Baykusheva、J.-P. Wolf、 *et al.*，《利用水窗高次谐波光源进行时间分辨X射线吸收光谱学》，《科学》**355**，264（2017）。[14] A. R. Attar、A. Bhattacherjee、C. Pemmaraju、K. Schnorr、K. D. Closser、D. Prendergast 和 S. R. Leone，《电环化开环反应的飞秒X射线光谱学》，《科学》**356**，54（2017）。[15] K. S. Zinchenko、F. Ardana-Lamas、I. Seidu、S. P. Neville、J. van der Veen、V. U. Lanfaloni、M. S. Schuurman 和 H. J. W¨orner，《在碳K边探测到的亚7飞秒锥形交叉动力学》，《科学》**371**，489（2021）。[16] Z. Yin、Y.-P. Chang、T. Bal˘ci¯unas、Y. Shakya、A. Djorovi´c、G. Gaulier、G. Fazio、R. Santra、L. Inhester、J.-P. Wolf、 *et al.*，《X射线光谱学探测尿素溶液中的飞秒质子转移》，《自然》**619**，749（2023）。[17] N. Saito、N. Douguet、H. Sannohe、N. Ishii、T. Kanai、Y. Wu、A. Chew、S. Han、B. I. Schneider、J. Olsen、L. Ar- genti、Z. Chang 和 J. Itatani，《软X射线区中n_2O芯激发态的阿秒电子动力学》

区，《Physical Review Research》3，043222（2021）。[18] T. Driver、M. Mountney、J. Wang、L. Ortmann、A. Al-Haddad、N. Berrah、C. Bostedt、E. G. Champenois、L. F. DiMauro、J. Duris、 *et al.*，《X射线分子电离中的阿秒延迟》，《自然》632，762（2024）。[19] S. Li、T. Driver、P. Rosenberger、E. G. Champenois、J. Duris、A. Al-Haddad、V. Averbukh、J. C. Barnard、N. Berrah、C. Bostedt、 *et al.*，《俄歇-迈特纳衰变中的阿秒相干电子运动》，《科学》375，285（2022）。[20] M.-S. Tsai、A.-Y. Liang、C.-L. Tsai、P.-W. Lai、M.- W. Lin 和 M.-C. Chen，《通过级联聚焦与压缩实现高能单周期脉冲的非线性压缩》，《科学进展》8，eabo1945（2022）。[21] Y.-E. Chien、M. Fern´andez-Gal´an、M.-S. Tsai、A.-Y. Liang、E. Conejero-Jarque、J. Serrano、J. S. Rom´an、C. Hern´andez-Garc´ıa 和 M.-C. Chen，《丝化辅助的孤立阿秒脉冲产生》，arXiv预印本 arXiv:2412.06339（2024）。[22] J. Gao、M. Hasan、H. Liang、M.-S. Tsai、Y. Yuan、Z. Eisenhutt、C. H. Keitel、C.-D. Lin、Y. Liu、M.-C. Chen、 *et al.*，《明亮的25阿秒光脉冲达到一个原子时间单位》，arXiv预印本 arXiv:2508.14774（2025）。[23] D. C. Haynes、M. Wurzer、A. Schletter、A. Al-Haddad、C. Blaga、C. Bostedt、J. Bozek、H. Bromberger、M. Bucher、A. Camper、 *et al.*，《俄歇电子计时》，《自然·物理》17，512（2021）。[24] B. Sch¨utte、S. Bauch、U. Fr¨uhling、M. Wieland、M. Gen- sch、E. Pl¨onjes、T. Gaumnitz、A. Azima、M. Bonitz 和 M. Drescher，《俄歇电子发射具有啁啾特征的证据》，《物理评论快报》108，253003（2012）。[25] M. Uiberacker、T. Uphues、M. Schultze、A. J. Ver- hoef、V. Yakovlev、M. F Kling、J. Rauschenberger、N. M Kabachnik、H. Schr¨oder、M. Lezius、K. L Kompa、H.-G. Muller、M. Vrakking、S. Hendel、U. Kleineberg、U. Heinzmann、M. Drescher 和 F. Krausz，《原子中电子隧穿的阿秒实时观测》，《自然》446，627（2007）。[26] S. J. Robatjazi, *Ion-electron coincidence studies of femtosecond dynamics triggered by extreme ultraviolet photoionization of atoms and molecules*，博士论文，堪萨斯州立大学，美国堪萨斯州曼哈顿（2021）。[27] P. Zhang、J. Trester、K. Ueda、M. Han、T. Bal˘ci¯unas 和 H. J. W¨orner，《氙电离后双俄歇-迈特纳衰变的时间分辨多电子符合谱学》，《物理评论快报》132，083201（2024）。[28] D. L. Ederer，《氙中 $4d$ 电子的光电离》，《物理评论快报》13，760（1964）。[29] S. Pabst 和 R. Santra，《强场多体物理与氙高次谐波谱中的巨大增强》，《物理评论快报》111，233005（2013）。[30] Y.-J. Chen、S. Pabst、A. Karamatskou 和 R. Santra，《构成氙巨偶极共振基础的集体共振态的理论表征》，《物理评论A》91, 032503（2015）。[31] T. Carroll、J. Bozek、E. Kukk、V. Myrseth、L. Sæthre、T. Thomas 和 K. Wiesner，氙N_4，$_5OO$ 俄歇谱——一种有用的校准源，Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 125, 127（2002）。[32] G. King、M. Tronc、F. Read 和 R. Bradford，利用高分辨率电子碰撞研究氩的L_2,3边、氪的M_4,5边和氙的N_4,5边附近的结构，Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics 10, 2479（1977）。[33] A. Kivim¨aki、A. N. De Brito、S. Aksela、H. Aksela、O.-P. Sairanen、A. Ausmees、S. Osborne、L. Dantas 和 S. Svensson，氪$M_5N_{2,3}N_2$,3和氙$N_5N_{2,3}N_2$,3共振俄歇谱中的亚自然线宽，《物理评论快报》71, 4307（1993）。[34] S. Masui、E. Shigemasa、A. Yagishita 和 I. Sellin，氙4d能级宽度的新测量，Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 28, 4529（1995）。[35] O.-P. Sairanen、A. Kivim¨aki、E. N˜ommiste、H. Aksela 和 S. Aksela，稀有气体氙、氪和氩内壳层电离阈值区中的高分辨率前边结构，《物理评论A》54, 2834（1996）。[36] N. Kling、D. Paul、A. Gura、G. Laurent、S. De、H. Li、Z. Wang、B. Ahn、C. Kim、T. Kim、 *et al.*，用于高能带电粒子的高分辨率厚透镜速度映射成像光谱仪，Journal of Instrumentation 9（05）, P05005。[37] M. Hasan、P.-H. Tran、J. Gao、V.-H. Hoang、M.-S. Tsai、M.-C. Chen、U. Thumm、C. L. Cocke、C.-D. Lin、A.-T. Le、 *et al.*，近单周期镱激光器中的强场光电子干涉，arXiv预印本 arXiv:2509.01866（2025）。[38] B. Schmidtke、T. Khalil、M. Drescher、N. M¨uller、N. M. Kabachnik 和 U. Heinzmann，氪$M_{4,5}N_1N_{2,3}$ $^1P_1$俄歇衰变：转移自旋极化的测量与俄歇振幅分析，Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 34, 4293（2001）。[39] N. G. Puskar、P. Rupprecht、J. Dvo˘r´ak、Y.-C. Lin、A. E. Greene、R. R. Lucchese、C. W. McCurdy、S. R. Leone 和 D. M. Neumark，利用阿秒非共线四波混频光谱学探测氙中 $4d^{-1}6\ell$ 芯激发态的自电离衰变寿命，The Journal of Chemical Physics 163, 184302（2025）。[40] O. S mirnova、V. S. Yakovlev 和 A. Scrinzi，时间分辨俄歇测量中的量子相干，《物理评论快报》91, 253001（2003）。[41] F. Penent、J. Palaudoux、P. Lablanquie 和 L. Andric，多电子光谱学：氙4d空穴双俄歇衰变，《物理评论快报》95, 083002（2005）。[42] J. Palaudoux、P. Lablanquie、L. Andric、K. Ito、E. Shige-masa、J. H. D. Eland、V. Jonauskas、S. Ku˘cas、R. Karaz-ija 和 F. Penent，多电子光谱学：氪3 82, 043419 2010 d空穴的俄歇衰变，《物理评论A》（），出版商：美国物理学会。