

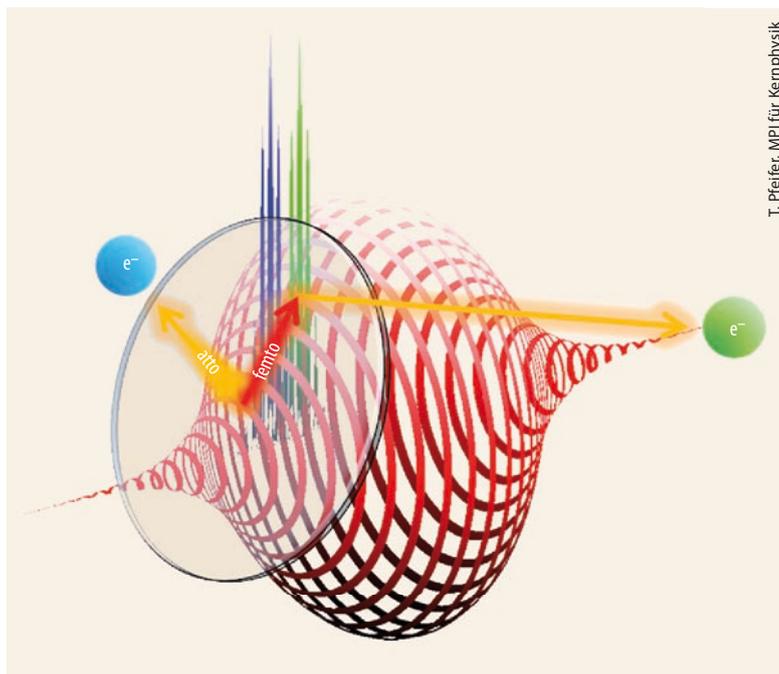
■ Laseruhr mit Attotakt

Attosekundenzeitauflösung erlaubt einen Einblick in die korrelierte Bewegung kleinster geladener Teilchen bei der Ionisation im starken Laserfeld.

Wenn sich chemische Bindungen bilden oder aufbrechen, bewegen sich die Elektronen in den beteiligten Atomen und Molekülen auf extrem kurzen Zeitskalen von typischerweise einigen hundert Attosekunden ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$). Diese Tatsache liegt hauptsächlich in der geringen Masse dieser Elementarteilchen begründet. Mittlerweile hat sich ein großes internationales Forschungsfeld gebildet, das mit immer neuen Messmethoden versucht, Zeitauflösungen im Attosekundenbereich zu erreichen [1].

Ein ehrgeiziger Wunsch der Experimentatoren ist es, die „ultraschnelle“ Dynamik von Elektronen direkt zu beobachten, insbesondere die korrelierte Bewegung zweier (oder mehrerer) Elektronen, denn zumeist befinden sich in Molekülen zwei Elektronen in den Bindungsorbitalen.¹⁾ Solche Prozesse spielen beispielsweise eine Rolle beim hochpräzisen, nichtthermischen Schneiden und Schweißen mit Lasern. Für ein besseres Verständnis sind jedoch experimentelle Ergebnisse vonnöten, denn die Theorie dieser quantenverschränkten Mehrteilchenprozesse stößt bei den derzeit verfügbaren Computerleistungen analytisch wie numerisch an massive Grenzen.

Ursula Keller mit ihrem Forschungsteam an der ETH Zürich ist zusammen mit Reinhard Dörner von der Universität Frankfurt nun ein entscheidender Schritt gelungen [2]. Sie beschreiben und wenden eine ultraschnelle und ultrapräzise Uhr an, ganz in der Tradition alter Schweizerischer Uhrmacherkunst. Das „Uhrwerk“ beruht allerdings in diesem Fall nicht auf mechanischen Bauteilen wie Schwungradfedern und Zahnrädern, sondern auf der elektrischen Kraft der oszillierenden Lichtwelle eines intensiven Laserpulses und dessen Polarisation. Die „Zeiger“ drehen sich dabei natürlich sehr viel schneller als die Sekundenzeiger gängiger Uhren.



T. Pfeifer, MPI für Kernphysik

Eine „Laseruhr“ kann die korrelierte Bewegung zweier Elektronen bei der Ionisation messen: Der langsame Femto-Zeiger, der dem Betrag des gemessenen Impulses der Elektronen entspricht, folgt im Wesentlichen dem „langsamen“ An-

stieg der Pulseinhüllenden. Der schnellere Atto-Zeiger wird durch die Winkelinformation gebildet, die sich mit der Rotation des elektrischen Feldvektors des Laserlichts auf einer Zeitskala von sieben Attosekunden pro Grad bewegt.

Kellers Gruppe hat bereits vor kurzem eine ähnliche Laseruhr vorgestellt, um den Zeitpunkt der Ionisation eines einzelnen Atoms zu messen [3].²⁾ Andere Forschungsgruppen entwickelten hierzu auch weitere Methoden [4]. Mit der nun vorgestellten „Laseruhr“, die ebenfalls auf eine frühere Idee zurückgeht [5], ist es erstmals möglich, die Ionisationsereignisse zweier Elektronen im Laserfeld, insbesondere deren zeitliche Verzögerung zueinander, zu bestimmen. Dieser Prozess ist unter dem Namen sequentielle Doppelionisation schon längere Zeit bekannt [5–7], ließ sich allerdings noch nie zuvor mit dieser Präzision zeitaufgelöst beobachten.

Das Laseruhr-Experiment lief hierzu folgendermaßen ab: Ein elliptisch polarisierter Laserpuls mit einer Dauer von zunächst etwa 30 fs wurde auf ein gasförmiges Target von Ar-Atomen fokussiert, mit einer Intensität von $4,5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$. Das entspricht dem gesamten Son-

nenlicht, das die Erde erreicht, auf die Fläche eines Toastbrots fokussiert. Aufgrund der hohen Spitzenintensität des zeitlich gaußförmigen Lichtpulses „rupfen“ quantenmechanische Tunnelprozesse die Elektronen bereits an der ansteigenden Flanke des Laserpulses vom Atom ab. Die Laseruhr basiert auf einer mittlerweile etablierten Theorie der Bewegung von Elektronen in starken Laserfeldern („strong-field approximation“). Demnach bewegen sie sich nach der Ionisation allein durch die beschleunigende Wirkung des Laserfelds und lassen sich durch klassische Newtonsche Mechanik (eben wie in einer mechanischen Uhr) beschreiben.²⁾ Die Messung von Betrag und Winkel der Elektronenimpulse relativ zur großen Hauptachse des elliptisch polarisierten Laserfeldes ermöglicht es dann, die beiden Ionisationszeitpunkte zu rekonstruieren.

Das Kernstück des Experiments bildet ein moderner Koinzidenz-

1) Die „Unschärferelation“ (also nach Fourier eigentlich das Produkt aus zeitlicher Auflösung und Bandbreite der spektralen Emission) erlaubt die Messung kürzester Zeiten, wenn die Emission der Elektronen mit einer großen Energiebandbreite einher geht, was in diesem und ähnlichen Experimenten immer der Fall ist.

2) Allerdings wird derzeit diskutiert, wann genau ein Elektron in einem langreichweitigen Coulomb-Feld und unter Einwirkung eines starken Laserfelds ionisiert ist und sich „frei“ im Laserfeld bewegt.

detektor aus der Gruppe von Reinhard Dörner, auch Reaktionsmikroskop oder COLTRIMS genannt [8], welcher gewissermaßen als Zifferblatt der Laseruhr dient, mit dem sich die elektronischen Impulse und Emissionswinkel, und damit deren Emissionszeiten ablesen lassen. Dem langsamen Femto-Zeiger entspricht hier der Betrag des gemessenen Impulses der Elektronen, der sich im Wesentlichen nach dem „langsamen“ Anstieg der Pulseinhüllenden richtet. Der schnellere Atto-Zeiger wird durch die Winkelinformation gebildet, die sich mit der Rotation des elektrischen Feldvektors des Laserlichts auf einer Zeitskala von sieben Attosekunden pro Grad bewegt. Da diese schnelle Zeigerbewegung allerdings, ähnlich wie bei der konventionellen Uhr, periodisch zu einem vollen Umlauf des Laserfeldes ist, gelingt es nur durch Kombination der langsamen Absolutimpuls- und Winkelinformation, die unterschiedlichen Ionisationszeiten der Elektronen eindeutig zu messen.

Ursula Keller und ihr Team rechnen ein einfaches Modell der sequentiellen Ionisation durch, innerhalb dessen die gemessenen Zeitdifferenzen teilweise stark von den theoretischen Erwartungen abweichen. Während der Ionisati-

onszeitpunkt des ersten Elektrons nahezu exakt mit der Theorie übereinstimmt, zeigen sich starke Abweichungen für die Emissionszeit des zweiten. Dieses wird deutlich früher beobachtet als vorhergesagt, und zwar sowohl für längere (30 fs) als auch für kürzere (7 fs) Laserpulse. Da die Theorie auf der Annahme nicht-korrelierter Elektronendynamik beruht, liefern diese neuen Messungen also detaillierte zeitaufgelöste Daten zur Relevanz von elektronischer Korrelation bei der Doppelsonisation von Atomen.

In einem anderen schnellen Prozess ist diese elektronische Korrelation schon länger bekannt und auch experimentell untersucht [9]. Dort setzt Tunnelionisation zunächst ein Elektron frei, das ein Laserfeld dann zurück ins Ion schleudert, wo es durch Stoßionisation weitere Elektronen freisetzen kann (Rekollisionsionisation) [10]. In den neuen Messungen von Kellers Gruppe unterdrückt die elliptische Polarisation des Laserfeldes diesen Prozess. Somit muss hier ein anderer Mechanismus für die Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment verantwortlich sein. Die Laseruhrmessung quantifiziert also ein neues Korrelationsphänomen im physikalisch interessanten Regime der sequenziellen Doppel-

ionisation und könnte damit in der Zukunft, mithilfe weiterer theoretischer Unterstützung, entscheidend zum Verständnis der wissenschaftlich und technisch wichtigen Ionisationsdynamik von Materie in Laserfeldern beitragen.

**Thomas Pfeifer und
Robert Moshhammer**

Dr. Thomas Pfeifer, INTERATTO, Max-Planck-Forschungsgruppe „Attosecond Spectroscopy and Quantum Control“, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg,
Priv.-Doz. Dr. Robert Moshhammer, Max-Planck-Institut für Kernphysik

- [1] *F. Krausz und M. Ivanov*, Rev. Mod. Phys. **81**, 163 (2009); *T. Pfeifer et al.*, Chem. Phys. Lett. **463**, 11 (2008).
- [2] *A. N. Pfeiffer et al.*, Nature Phys. **7**, 428 (2011)
- [3] *P. Eckle et al.*, Nature Phys. **4**, 565 (2008)
- [4] *M. Schultze et al.*, Science **328**, 1658 (2010); *K. Klunder et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 143002 (2011)
- [5] *C. M. Maharjan et al.*, Phys. Rev. A **72**, 041403 (2005)
- [6] *A. L'Huillier et al.*, Phys. Rev. Lett. **48**, 1814 (1982)
- [7] *D. N. Fittinghoff et al.*, Phys. Rev. Lett. **69**, 2642 (1992)
- [8] *J. Ullrich et al.*, Rep. Progr. Phys. **66**, 1463 (2003)
- [9] *R. Moshhammer et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 447 (2000); *T. Weber et al.*, Nature **405**, 658 (2000)
- [10] *P. B. Corkum*, Phys. Rev. Lett. **71**, 1994 (1993)



Neugierig?

Sachbücher von

WILEY-VCH

www.wiley-vch.de/sachbuch

514720907_bu