

Die schnellste Stoppuhr der Welt

Deutsch-österreichischem Forscherteam gelingt erstmals eine Zeitmessung im Bereich weniger hundert Attosekunden, was die Beobachtung ultraschneller Prozesse in Atomen erlaubt.

Die Richtung des elektromagnetischen Feldes von sichtbarem Licht wechselt etwa eine Billion mal pro Sekunde, seine Feldstärke verändert sich schneller als eine Femtosekunde (1 Femtosekunde ist eine Billionstel Sekunde). Durch die präzise Steuerung dieser hyperschnellen Schwingungen in einem kurzen Laserpuls ist es jetzt Forschern des Wiener Instituts für Photonik und des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching in Zusammenarbeit mit Kollegen der Universität Bielefeld erstmals gelungen, einen Messapparat zu entwickeln, den man mit einer ultraschnellen Stoppuhr vergleichen kann. Das neue Gerät misst die Dauer atomarer Vorgänge mit einer Genauigkeit von weniger als 100 Attosekunden (1 Attosekunde ist der milliardste Teil einer Billionstel Sekunde). Ein nur 250 Attosekunden dauernder Röntgenpuls startet dabei den zu beobachtenden atomaren Prozess gleichzeitig mit der ihn messenden (Attosekunden-)Stoppuhr. Mit dem neuen Messverfahren ist es jetzt möglich, extrem schnelle Vorgänge in der Elektronenhülle von Atomen zu beobachten (Nature, 26. Februar 2004).

Mit modernsten Mikroskopen sind Wissenschaftler heute in der Lage, einzelne Atome zu beobachten, wenn sie sich in ihrem Ruhezustand befinden. Bewegen diese sich jedoch, braucht man sehr kurze Lichtpulse, um diese Bewegung aus einer Serie von Schnappschüssen rekonstruieren zu können. Reicht zur scharfen Abbildung eines fliegenden Tennisballes noch eine Belichtungszeit von weniger als einer tausendstel Sekunde, so muss man die Lichtpulse schon billionenfach, also auf wenige Femtosekunden verkürzen, um atomare Bewegungen auch in Molekülen festhalten zu können. Doch in der Elektronenhülle von angeregten Atome sausen die Elektronen noch tausendmal schneller herum. Innerhalb von 10 bis maximal 1000 Attosekunden wechseln sie einem Energiezustand in einen anderen. Dabei können Atome, die ursprünglich in einem Molekül gebunden waren, auseinander fliegen oder ultraviolette bzw. Röntgenstrahlung aussenden. Das Verständnis dieser Vorgänge ist von grundlegender Bedeutung für die Kontrolle chemischer Reaktionen oder die Synthese neuer Materialien, es könnte sogar für die Konstruktion eines handlichen Röntgenlasers eingesetzt werden.

Abb. 1
Im Atominneren erfolgen elektronische Übergänge in der unvorstellbar kurzen Zeit von etwa 100 Attosekunden. Diese kurze Dauer verhält sich zu einer Sekunde, also der Dauer eines Herzschlags, wie eine Minute zum Alter des Universums (20 Milliarden Jahre). In der dargestellten Zeitskala entspricht eine Stufe nach oben einer tausendfachen Dehnung, nach unten einer entsprechenden Verkürzung der Zeit. Die Messung derart kurzlebiger Vorgänge erfordert vollkommen neue Werkzeuge und Messverfahren.

Bild: Max-Planck-Institut für Quantenoptik/TU Wien



Um einen ultraschnellen atomaren Prozess messen zu können, muss man den zu untersuchenden mikroskopischen Prozess und die Stoppuhr zeitgleich starten. Will man das Innere eines Atoms in Bewegung setzen, muss man diesem Energie zuführen. Dazu muss jedoch der Beginn des Prozesses genauer definiert sein, als seine Dauer. Deshalb muss die Energiezufuhr blitzartig – innerhalb von einem Bruchteil einer Femtosekunde - erfolgen. Will man Atome aus ihrer Ruhe bringen, muss die zugeführte Energie die Bindung der Elektronen an den Atomkern überwinden. Das deutsch-österreichische Forscherteam benutzte für diesen Zweck Röntgenblitze mit einer Dauer von 250 Attosekunden, die derzeit kürzesten Pulse der Welt. Diese Attosekundenblitze regen die Elektronenhülle der bestrahlten Atome an. Manche der aus ihren Ruhezustand gebrachten Elektronen erlangen dabei eine so hohe Energie, dass sie sich aus ihrer atomaren Bindung lösen und selbständig machen. Dauer und Verlauf dieser Elektronen-Emission gibt wiederum direkte Auskunft, wie diese Anregungs- und Relaxationsprozesse in der Elektronenhülle verlaufen sind.

Für derartige Messungen haben die Wissenschaftler ein neues Verfahren entwickelt. Dabei greifen die Forscher auf ein altbekanntes Konzept, auf das so genannte Schmierbildverfahren, zurück. Bis vor kurzem verwendete man dieses Verfahren ausschließlich dazu, die Dauer kurzer Lichtblitze zu messen (vgl. Abb. 2).

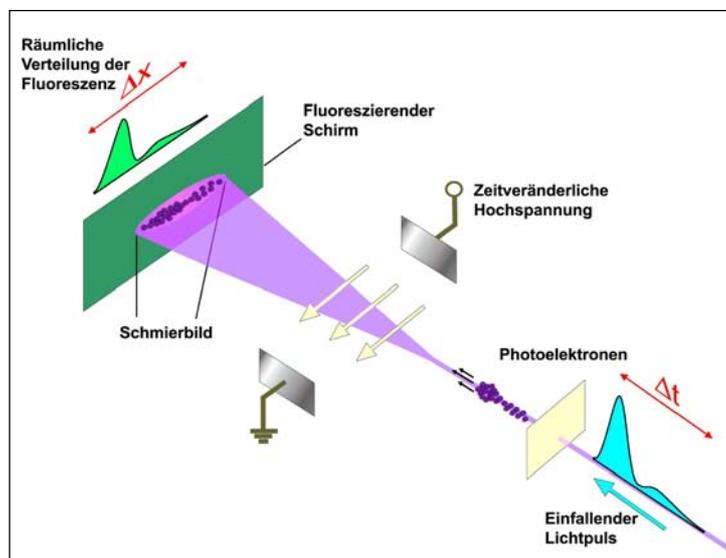


Abb. 2:

Herkömmliche Schmierbildkamera. Ein Lichtblitz schlägt während seiner Dauer Elektronen aus einer Metallplatte heraus, die anschließend mit einem statischen elektrischen Feld zu einem fluoreszierenden Schirm beschleunigt werden. Bevor sie am Schirm einschlagen, werden sie seitlich mit einem anderen Feld, dessen Stärke mit der Zeit linear zunimmt, abgelenkt. Die zeitveränderliche Ablenkung „verschmiert“ den Auftreffpunkt der Elektronen am Schirm. Die räumliche Breite dieses „Schmierbildes“ ist direkt proportional zur zeitlichen Länge der Elektronenemission, d.h. zur Dauer des Lichtblitzes. Je schneller sich das ablenkende Feld ändert, um so kürzere Blitze kann man erfassen. Modernste Schmierbildkameras (*streak cameras*) erreichen eine Auflösung im Bereich von 100 Femtosekunden.

Bild: Max-Planck-Institut für Quantenoptik/TU Wien

Die Innovation des neuen Verfahrens besteht nun darin, dass man hier die Elektronen durch ein millionenfach schneller variierendes Lichtfeld ablenkt, das seine räumliche und zeitliche Wirkung unmittelbar bei der Freisetzung der Elektronen entfaltet (Abb. 3). Dazu wird der Attosekunden-Röntgenblitz bei der Bestrahlung der Atome von einem intensiven, aus wenigen Schwingungen bestehenden Laserlichtpuls begleitet. Auf diese Weise detektiert man die hintereinander emittierten Elektronen wieder getrennt, allerdings diesmal nicht räumlich auf einem Schirm, sondern nebeneinander *auf der Energieskala*. Die Breite und Form der gemessenen Energieverteilung der Elektronen spiegelt die Dauer und den Zeitverlauf der Elektronen-Emission wieder, genauso wie deren räumliche Verteilung im herkömmlichen Schmierbildverfahren. Allerdings erfolgt in diesem Fall die „Ablenkung“ innerhalb einer halben Lichtperiode, was den Weg zu Messungen im Attosekundenbereich öffnet.

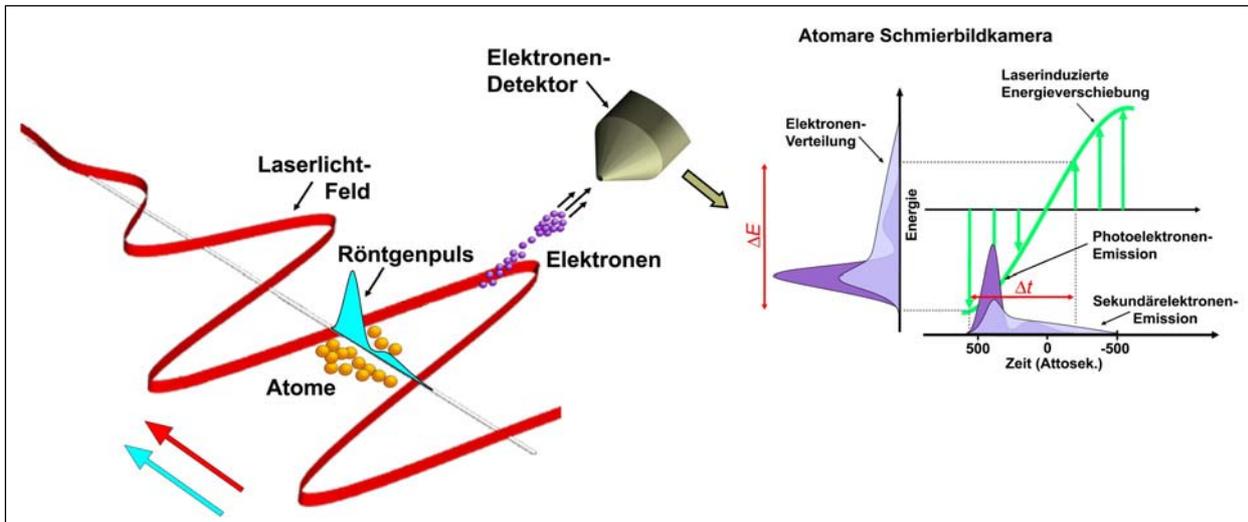


Abb. 3:

Lichtfeldkontrollierte Schmierbildkamera. Die rote und die blaue Kurve repräsentieren den zeitlichen Verlauf des elektrischen Feldes des Laserlichts bzw. die Intensität des Attosekunden-Röntgenblitzes. Letzterer regt die Atome an, so dass sie Elektronen ausstoßen. Jene Elektronen, die entlang der Richtung des elektrischen Feldes des zeitgleich eingestrahlten Laserlichtpulses herausgeschlagen wurden, werden detektiert. Sie erfahren – je nach ihrem Emissionszeitpunkt innerhalb der halben Schwingungsperiode des Laserlichts – eine Änderung ihrer Geschwindigkeit. In dem dargestellten Fall werden die zuerst emittierten Elektronen beschleunigt, während die am Ende des Röntgenblitzes losgelösten Elektronen abgebremst werden.

Bild: Max-Planck-Institut für Quantenoptik/TU Wien

Um das Konzept einer lichtgesteuerten Schmierbildkamera erfolgreich in die Praxis umsetzen zu können, müssen zwei Bedingungen erfüllt werden: i) Man muss die Schwingungen des „ablenkenden“ Lichtfeldes präzise kontrollieren können. ii) Man muss den anregenden Röntgenblitz zu diesen Schwingungen mit einer Präzision im Attosekunden-Bereich synchronisieren. Die dazu erforderlichen, aus wenigen Schwingungen bestehenden intensiven Laserpulse mit kontrollierter Wellenform haben die Forscher bereits vor einem Jahr weltweit als erste erzeugt. Den Forschern aus Garching und Wien gelang es durch die kontrollierte Anregung von gigantischen Schwingungen der Elektronenhülle in Atomen, einzelne Attosekunden-Röntgenpulse zu erzeugen, die von Laserpuls zu Laserpuls reproduzierbar sind. Die Atome strahlen dabei – wie winzige Antennen – einen zum anregenden Lichtfeld perfekt synchronisierten Röntgenblitz aus.

In dem neuesten Experiment dienten der Attosekundenblitz und die ihn erzeugende Lichtwelle, um in einer Gruppe von Atomen die emittierten Elektronen anzuregen bzw. abzulenken, sie also zu beschleunigen bzw. abzubremesen, womit beide genannten Bedingungen erfüllt wurden. Der Emissionsverlauf der vom Röntgenblitz unmittelbar ausgeschlagenen Elektronen, der so genannten Photoelektronen, spiegelt den Verlauf des anregenden Röntgenblitzes wieder, während der Verlauf der Emission der Sekundär- oder Auger-Elektronen direkt Auskunft über die auf die blitzartige Anregung folgenden Relaxationsprozesse in der Elektronenhülle gibt. Bei der Messung der Emissionszeit der Photoelektronen mit dem neuen Schmierbildverfahren konnte das Forscherteam eine Röntgenblitzdauer von 250 Attosekunden ermitteln. Sie haben damit die bis dato kürzesten Pulse erzeugt und damit zugleich die bisher kürzeste Zeitspanne gemessen. Das neue Verfahren ermöglicht es, den zeitlichen Verlauf von Vorgängen innerhalb der Elektronenhülle von Atomen mit einer Auflösung von circa 100 Attosekunden direkt zu messen.

Damit ist die Möglichkeit, die Bewegung von Elektronen tief im Inneren der Atome und Moleküle zu beobachten, in greifbare Nähe gerückt. Erstmals besteht jetzt die Chance, experimentelle Antworten zu liefern, wie man eine wirksame, kollektive Röntgenemission aus Atomen erzeugen kann (Röntgenlaser) oder wie chemische Bindungen entstehen und wieder aufgelöst werden können.

Referenzen:

A. Baltuska, Th. Udem, M. Uiberacker, M. Hentschel, E. Goulielmakis, Ch. Gohle, R. Holzwarth, V. S. Yakovlev, A. Scrinzi, T. W. Hänsch, F. Krausz, Attosecond control of electronic processes by intense light fields. *Nature* **421**, 611 (2003).

R. Kienberger, E. Goulielmakis, M. Uiberacker, A. Baltuska, V. Yakovlev, F. Bammer, A. Scrinzi, Th. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz, Atomic transient recorder. *Nature* **427**, 26 February 2004.

Das Projekt wurde unterstützt durch den Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (Österreich), die Deutsche Forschungsgemeinschaft, die Volkswagen-Stiftung sowie das Human Potential Programme der Europäischen Union.

Weitere Informationen erhalten Sie von:**Prof. F. Krausz**

Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Hans-Kopfermann-Strasse 1
D-85748 Garching, Germany
Tel. +49 89 32905-602
Fax +49 89 32905-314
ferenc.krausz@mpq.mpg.de
<http://www.mpq.mpg.de>

Institut für Photonik
Technische Universität Wien
Gusshausstr. 27/387, A-1040 Wien, Austria
Tel. + 43 1 58801 38711
Fax + 43 1 58801 38799
krausz@tuwien.ac.at
<http://www.tuwien.ac.at/photonik>