

## Natur und Wissenschaft

# Kürzer als der Augenblick

Attosekunden-Physik: Röntgenblitze enthüllen atomare Prozesse

Die genaueste Stoppuhr der Welt kann die Dauer von Vorgängen messen, die so kurz sind wie die Umlaufzeit eines Elektrons um den Atomkern – also gerade einmal rund hundert trillionstel Sekunden (Attosekunden). In dieser Zeit gelangt das sichtbare Licht noch nicht mal 100 Nanometer weit, während es in einer Sekunde eine Strecke zurücklegt, die etwa siebenmal um die Erde reicht. Dreh- und Angelpunkt des Systems ist ein rund 250 Attosekunden währender Röntgenblitz, der den zu messenden Prozeß auslöst und das Startsignal liefert. Damit haben Physiker von der Universität Bielefeld und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München sowie von der Technischen Universität Wien den Weg bereitet, die extrem schnellen Vorgänge tief in der Elektronenhülle von Atomen zeitlich aufzulösen.

Will man verfolgen, wie sich die Atome in den Molekülen bewegen und wie chemische Bindungen entstehen oder aufbrechen, benötigt man möglichst kurze Lichtpulse. Selbst die schnellsten molekularen Vorgänge erscheinen wie eingefroren, wenn man die Atome mit Lichtpulsen bestrahlt, die nur einige billionstel Sekunden (Femtosekunden) dauern. Für die Vorgänge in den Atomhüllen sind die kürzesten Femtosekundenpulse indes viel zu lang. Man benötigt schon Pulse von Attosekunden Dauer, will man die Bewegung einzelner Elektronen um den Atomkern verfolgen.

Mit optischen Lasersystemen können allerdings prinzipiell keine Lichtblitze erzeugt werden, die kürzer als eine Femtosekunde sind. Denn die Pulsdauer müßte dann kürzer sein als die Zeit, die das sichtbare Licht für eine Schwingung benötigt. Da ein Puls aber mindestens eine Schwingung enthalten muß, sind Attosekundenpulse deshalb nur mit Röntgenlicht möglich, das viel schneller schwingt und während der Dauer eines Pulses mehrere Oszillationen vollenden kann.

Bereits vor knapp zwei Jahren hatten die Forscher um Markus Drescher von der Universität Bielefeld und Ferenc Krausz von der Universität Wien eine Technik vorgestellt, mit der sie Röntgenblitze von einer halben Femtosekunde Dauer erzeugen können. Dazu werden intensive Pulse eines Femtosekunden-Lasers auf ein Gas aus Neonatomen gerichtet, die den Atomen ihre Elektronen entreißen. Die geladenen Teilchen schwingen daraufhin heftig hin und her. Immer wenn sie mit den Atomkernen zusammenprallen, entstehen neue Lichtpulse, deren Frequenzen Vielfa-

che der Frequenz des ursprünglichen Laserpulses sind. Durch geschickte Überlagerung dieser Harmonischen entstehen die extrem kurzen Röntgenblitze.

Auf diese Weise erzeugte Attosekunden-Blitze haben die Forscher um Drescher und Krausz in ihrer jüngsten Arbeit auf andere Neonatome gerichtet, was gleichzeitig das Startsignal für die Messungen war. Von den Röntgenpulsen getroffen, verloren die Atome sofort einige ihrer Elektronen. Um den zeitlichen Verlauf der Anregung und der Elektronenemission aufschlüsseln zu können – also gewissermaßen den Meßprozeß zu stoppen –, bediente sich die Forschergruppe eines altbekannten Konzepts, mit dem sich die Dauer kurzer Lichtpulse elegant ermitteln läßt.

Beim sogenannten Schmierbildverfahren werden die von dem Laserblitz erzeugten Elektronen von einem zeitlich variierenden elektrischen Feld abgelenkt und in Richtung eines fluoreszierenden Schirms beschleunigt. Das Feld verschmiert den Auftreffpunkt der Elektronen so, daß die Breite des Schmierbildes proportional zur Dauer der Elektronenemission und damit zur Länge des Lichtpulses ist. Dabei gilt: Je schneller das die Elektronen ablenkende elektrische Feld ist, desto kürzere Lichtpulse kann man erfassen.

Die Forscher haben sich diesen Umstand zunutze gemacht und die von einem Röntgenblitz erzeugten Elektronen durch ein schnell oszillierendes Lichtfeld abgelenkt, bevor sie auf einen Schirm trafen. Das Feld entfaltet seine Wirkung, sobald die Elektronen freigesetzt wurden. Außerdem erfolgte die Ablenkung innerhalb einer halben Lichtperiode, was den Weg zu Messungen im Attosekundenbereich öffnete.

Dem herkömmlichen Schmierbildverfahren gleich, spiegelte das Abbild der Elektronenverteilung auf dem Schirm den zeitlichen Verlauf der erzeugten Röntgenblitze wider. Wie Krausz und seine Kollegen in der aktuellen Ausgabe der Zeitschrift „Nature“ (Bd. 427, S. 817) berichten, waren die Röntgenblitze nur 250 Attosekunden lang und damit die bislang kürzesten Röntgenblitze überhaupt. Obendrein war es das bis dato kürzeste gemessene Zeitintervall.

Die Grenze der Meßgenauigkeit ist damit noch nicht erreicht. Im Prinzip ist es möglich, den zeitlichen Verlauf von atomaren Vorgängen mit einer Auflösung von 100 Attosekunden direkt zu messen. Der Blick tief ins Innere von Elektronenhüllen ist nun frei. MANFRED LINDINGER