

Kurz - Kürzer - Attophysik

Der Beginn eines neuen Zeitalters?

Günter Sturm, ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR
Camerloherstraße 19, 85737 Ismaning
www.ScienceUp.de

Physiker der Uni Bielefeld und der Technischen Universität Wien haben vor kurzem erstmals Bewegungen von Elektronen in einem Atom gemessen. Diese Arbeit ist der Beginn eines neuen Teilgebiets der Physik: Attosekunden-Physik oder Attophysik [1].

Was ist eine wirklich "kurze Zeit"?

Das kommt auf den Vergleich an. Die Minute, die Sie schon in das Lesen dieses Newsletters investiert haben, ist nur etwa ein Milliardstel Ihres gesamten Lebens. Aber in der Attophysik geht es um ganz andere Dimensionen: Eine Attosekunde ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s} = 0,000000000000000001 \text{ s}$) verhält sich zu einer Minute wie eine Minute zum tausendfachen Alter des Universums.

Ein Experimentier-Intervall von nur einigen hundert Attosekunden ist aber notwendig, um besonders schnell ablaufende Vorgänge wie die Bewegung von Elektronen in der Atomhülle zu untersuchen.

Warum war es bisher nicht möglich, in so kurzen Zeiträumen zu messen?

Die grundlegende Untersuchungsmethode vieler physikalischer Experimente ist die Spektroskopie: Das ist die Bestrahlung einer zu untersuchenden Substanz mit (meist) elektromagnetischen Wellen und die Analyse der dadurch wiederum ausgesandten Wellen, die ein Spektrum ergeben. Wellen haben eine bestimmte Wellenlänge, nach der sich die "Auf- und Ab-Bewegung" wiederholt. Bei Wasserwellen ist dies leicht zu beobachten.

Bei Schallwellen geht das nicht mit dem bloßen Auge, aber der Nachweis der Wellennatur von Schall erfolgte trotzdem schon 1866 durch Töpler [2]. Töpler konnte die periodische Veränderung des Luftdrucks in Schallwellen direkt nachweisen. Dazu verwendete er zwei Lichtblitze (elektromagnetische Wellenpakete), die mit einem genau einstellbaren Abstand erzeugt wurden. Der erste Blitz - nennen wir ihn "pump"-Puls - erzeugte eine Schallwelle.

Gleichzeitig triggerte (steuerte) er die Erzeugung eines zweiten Lichtblitzes, den wir "probe"-Puls nennen wollen. Durch Veränderung des Abstands zwischen den beiden Pulsen konnte Töppler die Berge und Täler der Schallwelle Schritt für Schritt abtasten, wobei der probe-Puls die durch die Schallwelle erzeugte Veränderung des Brechungsindex der Luft misst.

Und es ist tatsächlich dieses Experiment, das die experimentellen Prinzipien für die Attosekunden-Spektroskopie weist: Zwei Pulse, deren Abstand variiert wird und die damit "Schritt für Schritt" ein Spektrum ergeben ("pump-probe method"). Das Problem ist jedoch, dass in Attosekunden-Experimenten die Rolle der Schallwelle von einer Lichtwelle eingenommen wird, und deren Wellenlänge ist mit $10 \text{ E-}7$ Metern nur etwa ein Milliardstel der Schall-Wellenlänge. Die Periodendauer einer Lichtwelle beträgt etwa eine Femtosekunde ($1 \text{ fs} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ s} = 0,000000000000001 \text{ s}$). Um also Veränderungen einer Lichtwelle direkt zu messen - und diese Auflösung ist nötig in der Attosekunden-Spektroskopie - braucht man Pulse mit nochmals geringeren Wellenlängen: Röntgen-Pulse (X-ray-Pulse) und Pulsdauern dieser Röntgenpulse im Attosekundenbereich. Andernfalls würden die zu untersuchenden Bewegungen genauso verschmieren wie ein Formel 1 Auto auf der Zielgeraden, das mit einer zu langen Belichtungszeit von z. B. einer Sekunde fotografiert wird. Erst kurze Belichtungszeiten - oder in der Spektroskopie Pulsdauern - ergeben ein scharfes Foto bzw. Spektrum.

Lichtpulse im Femtosekundenbereich konnten schon länger erzeugt werden und ermöglichen die "Femtochemistry" oder Femtosekundenspektroskopie, also die direkte Beobachtung von Molekülbewegungen und chemischen Reaktionen. Die Erzeugung von Röntgenpulsen im Attosekundenbereich ist hingegen erst seit letztem Jahr möglich [3],[4],[5]. Damit können jetzt auch die Bewegungen von Elektronen in Atomen im direkten zeitlichen Verlauf ("time-domain") beobachtet werden. Elektronen bewegen sich aufgrund ihrer geringeren Masse viel schneller als die "ganzen" Atome, die in der Femtosekundenspektroskopie untersucht werden.

Attosekunden-Spektroskopie

Der "Trick" zur Erzeugung von ultrakurzen Röntgenpulsen im Attosekundenbereich ist, zunächst einen intensiven Femtosekunden-Lichtpuls mit einem Laser zu erzeugen und diesen auf Gasatome zu leiten. Die Wechselwirkung zwischen diesem Lichtpuls und dem Gasatom erzeugt einen Attosekunden-Röntgenpuls, da die Gasatome durch den Lichtpuls zur Emission von Röntgenstrahlung (höhere harmonische des eingestrahlt Lichts) angeregt werden. Mit weiteren experimentellen Tricks kann ein - einzelner - Röntgenpuls erzeugt werden.

Im unter [1] vorgestellten Experiment wurde nun zum ersten Mal die zeitliche Entwicklung der Verteilung einer Elektronenwolke eines Atoms nach einer Anregung durch einen Röntgen-

puls untersucht. Der Röntgenpuls hat also hier die Rolle des pump-Pulses. Aus technischen Gründen kann der probe-Puls nicht auch ein Röntgenpuls sein. Die Rolle des probe-Pulses wird hier von dem Lichtpuls eingenommen. Gemessen wurde die Lebensdauer eines "Elektronen-Lochs" in einer inneren "Schale" eines Krypton-Atoms.

Die Arbeitsgruppe von Markus Drescher an der Uni Bielefeld hat die ultrakurzen Röntgenpulse in Zusammenarbeit mit dem Team von Ferenc Krausz an der TU Wien erzeugt.

Zur Anfangsfrage: Ist dies der Beginn eines neuen Zeitalters?

Nun, sicherlich sind diese Experimente nicht so bedeutend wie die Einführung der Quantentheorie oder der Relativitätstheorie, so dass der Begriff "neues Zeitalter der Physik" vielleicht etwas übertrieben ist. Meiner Meinung nach handelt es sich um ein neues - experimentelles - Zeitalter der Physik: Die Attophysik. Und die Autoren dürfen sich durchaus berechnete Hoffnungen auf einen der künftigen Physik-Nobelpreise machen.

Günter Sturm

Literatur:

- [1] "Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy", M. Drescher, M. Hentschel, R. Kienberger, M. Uiberacker, V. Yakolev, A. Scrinzi, Th. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, F. Krausz, Nature 419, 803 - 807 (2002).
- [2] A. Töpler, Ann. Physik und Chemie 128, 126 (1866).
- [3] "Physics at the attosecond frontier", Y. Silberberg, Nature 414, 494 - 495 (2001).
- [4] "Attosecond metrology" M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz, Nature 414, 509 - 513 (2001).
- [5] "Attosecond Spectroscopy Comes of Age", F. Krausz, Opt. Photon. News Vol. 13 No. 5, 62-68 (2002).

© 2002 ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, Alle Rechte vorbehalten. Nichtkommerzieller Nachdruck und Wiedergabe gestattet bei Quellenangabe ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, www.ScienceUp.de.