

Ultraschnelle Raser im Blitzlichtgewitter

Wie sich Attosekunden einfangen lassen

Ein Milliardstel einer Milliardstel Sekunde – so lange dauern Lichtpulse, die Ferenc Krausz und sein Team am Max-Planck-Institut für Quantenoptik erzeugen. Diese Laserblitze geben Aufschluss über Eigenschaften von Elektronen und Atomen. > *Von Thorsten Naeser*

Albert Einstein brachte die Relativität der Zeit auf den Punkt: „Wenn man zwei Stunden lang mit einem Mädchen zusammen sitzt, meint man es wäre eine Minute. Sitzt man jedoch eine Minute auf einem heißen Ofen, meint man, es wären zwei Stunden. Das ist Relativität“, erklärte der große Physiker und Nobelpreisträger.



Über Spiegel und Linsen wird ein Laserstrahl gelenkt, um aus ihm schließlich Attosekundenblitze zu gewinnen. *Foto: Thorsten Naeser*

Auch eine Sekunde kann eine Ewigkeit dauern. Zumindest dann, wenn man sie mit den Zeit-Dimensionen vergleicht, mit denen sich Ferenc Krausz und seine Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching beschäftigen. Krausz und sein Team betreiben Attosekundenphysik. Sie erforschen die schnellsten Vorgänge, die bis heute in der Natur bekannt sind. Eine Attosekunde dauert ein Milliardstel einer Milliardstel Sekunde, eine Zahl mit 17 Nullstellen hinter dem Komma. Im Vergleich zu einer Sekun-

de verhält sich eine Attosekunde so lange wie eine Sekunde zum Alter des Universums, das rund 13,7 Milliarden Jahre alt ist.

Bei ihrer Arbeit tauchen die Wissenschaftler um Krausz in den Kosmos der Quanten ein. In dieser fremdartigen Welt verlieren die klassischen Gesetze, wie sie Isaac Newton vor mehr als 400 Jahren aufstellte, ihre Gültigkeit. Positionen und Bewegungen von Elementarteilchen können nicht mehr gleichzeitig exakt bestimmt werden. Manchmal sind die Partikel auf geisterhafte Weise miteinander verbunden und haben entweder Wellen- oder Teilcheneigenschaften.

„Wir interessieren uns vor allem für das Verhalten von Elektronen in atomaren Strukturen, aber auch für Moleküle und Festkörpersysteme“, erklärt Ferenc Krausz in seinem Büro in Garching. Atome bestehen aus Atomkern und Elektronen. Trifft nun Licht auf die Atome, dann erhalten diese zusätzliche Energie und vollführen einen Sprung innerhalb der Atome. Manchmal endet dieser Sprung auf benachbarten Atomen in einem Molekül, oder gar im freien Raum. Die Sprünge gehen rasend schnell, oft innerhalb weniger zehn bis hundert Attosekunden.

Die Arbeit der Wissenschaftler ist technisch extrem aufwändig, denn Quanten geben ihre Geheimnisse nicht so leicht preis. Das wird schnell deutlich, wenn man einen Blick in die Labore der Attosekundenphysiker wirft. Auf schweren Tischen in abgedunkelten Hallen bändigen die Wissenschaftler das Laserlicht mit unzähligen Prismen und Spiegeln. Sie leiten es auf labyrinthischen Bahnen auf Proben, die entweder aus Gasen oder aus Festkörpern bestehen.



„Wir können hier Lichtblitze erzeugen, die nur wenige zehn Attosekunden lang dauern“, erklärt Krausz. Diese Lichtblitze schießen auf Proben, die sich in silbrig glänzenden Vakuumkammern aus Stahl befinden. Das Prinzip ist bei allen Versuchen ähnlich: Zwei Lichtblitze werden ausgesandt. Der erste Attosekundenpuls regt die Elektronen in den Atomen an, sodass sie sich in Bewegung setzen. Der zweite Laserpuls beobachtet dann die Reaktion der Teilchen. „So fotografieren wir quasi die Elektronen während ihrer Bewegung in oder zwischen den Atomen“, sagt Krausz. „Je kürzer wir die Verschlusszeit, also die Lichtpulse, wählen, desto schärfer werden die Bilder über die Bewegung dieser ultraschnell rasenden Elementarteilchen.“ Mit ihrer weltweit führenden Lasertechnologie haben die Forscher im letz-



Matthias Uiberacker, ein wissenschaftlicher Mitarbeiter von Ferenc Krausz blickt in eine Vakuumkammer, in der Attosekundenpulse auf eine Probe geschossen werden. Foto: Naeser

ten Jahr erstmals in Echtzeit beobachtet, wie sich angeregte Elektronen in einem Festkörper fortbewegen. Dazu haben sie mit Attosekundenblitzen aus einem Kristallgitter von Wolframatomen so genannte Rumpfelektronen und Leitungsbandelektronen herausgeschlagen. Rumpfelektronen sitzen viel näher am Atomkern als Leitungsbandelektronen. Unter dem Einfluss des Laserlichts benötigen sie deswegen auch eine längere Zeit, um aus dem Festkörper auszutreten.

Die Zeit, die die Rumpfelektronen länger benötigten als die Leitungsbandelektronen, um an die Oberfläche zu gelangen, bestimmten die Forscher über einen zweiten Laserpuls, den sie mit dem ersten Lichtblitz koppelten. „So konnten wir messen, dass die Rumpfelektronen etwa 110 Attosekunden länger als die Leitungsbandelektronen

benötigen, um an die Oberfläche zu gelangen“, erläutert Reinhard Kienberger, Leiter einer Nachwuchsgruppe am MPQ und Kooperationspartner von Ferenc Krausz.

Mit solchen Experimenten betreibt das Team um Krausz Grundlagenforschung extrem nahe an den Geschehnissen der unmittelbaren Gegenwart. „Gerade Elektronen spielen bei allen chemischen und biologischen Vorgängen eine zentrale Rolle“, erläutert Krausz. „Sie bestimmen zum Beispiel die Struktur und dadurch die Funktion von Biomolekülen.“ Im Erbgut ist diese Tatsache entscheidend bei genetischen Veränderungen.

Das Verständnis und die Kontrolle von Elektronenbewegungen in immer kleineren Strukturen ist aber auch der Schlüssel zur Entwicklung leistungsfähigerer Computer und elektronischer

Geräte. Direkte Einblicke in inneratomare Vorgänge könnten zukünftig auch dabei helfen, einen handlichen Röntgenlaser zu entwickeln. „Die Geräte wären dann in der Lage, molekulare Strukturen auf atomarer Ebene sichtbar zu machen, sowie die Frühdiagnose von Krebs und deren Therapie zu ermöglichen“, sagt Krausz.

Schon heute sind Laser, die von den Garching Attosekundenphysikern entwickelt wurden, zur Früherkennung von Augenerkrankungen im Einsatz. Auch hier beruht die Technik auf dem Einsatz von extrem kurzen Lichtpulsen, die tief in ein Gewebe eindringen und feinste Strukturen sichtbar machen. Im Rahmen des Exzellenzclusters Munich Centre for Advanced Photonics (MAP) arbeiten die Physiker mit Ärzten zusammen, um Röntgenlaser auch für die Medizin nutzbar zu machen. ◇