

((Vorspann))

Vor weniger als hundert Jahren war noch nicht einmal die Existenz der Atome wissenschaftlich gesichert. Heute ist nicht nur ihre Grösse bekannt, mit Mikroskopen können sie sogar sichtbar gemacht werden. Dank der Laserspektroskopie ist es gelungen, die innere Struktur der Atome sehr genau zu bestimmen. Und neuerdings ist es überdies möglich, ihre Geschwindigkeit, Position, Orientierung und Form mit Hilfe von Laserlicht zu kontrollieren.

((Obertitel))

Aktuelle Atomphysik

((Haupttitel))

Bilder von Atomen

((Autor))

*PD Dr. Dieter Suter, Institut für Quantenelektronik
ETH Hönggerberg (HPT E11), CH-8093 Zürich
Tel. ++41-1-633 21 57, Fax: ++41-1-372 09 74
E-mail: Dieter@iqe.phys.ethz.ch*

((Bildunterschriften))

Bild 1: Schematischer Aufbau eines Feld-Ionen-Mikroskops

Bild 2: Schematischer Aufbau eines Raster-Sonden-Mikroskops

Bild 3: In der jüngsten Vergangenheit hat das Raster-Sonden-Mikroskop zusätzlich Aufmerksamkeit auf sich gezogen, weil mit der Spitze auch einzelne Atome auf der Oberfläche zu geometrischen Figuren, beispielsweise zu einem Ring aus 48 Eisenatomen, angeordnet werden können. (Quelle: Donald Eigler, IBM San José)

Bild 4: Thomsons "Pudding mit Rosinen"

Bild 5: Das Atom als Planetensystem

Bild 6: Das Bohr'sche Atommodell

Bild 7: Im quantenmechanischen Bild sind die Elektronen eines Atoms keine Teilchen mehr, die den Kern umkreisen. Vielmehr werden sie jetzt je nach Energie als Wolken unterschiedlicher Form beschrieben. Der energetisch niedrigste Zustand ist kugelförmig, während die höher liegenden Zustände kompliziertere Formen aufweisen.

Bild 8: Drehimpulsübertrag auf das Atom bei Absorption eines Photons

((Text))

Atome direkt sichtbar zu machen, gelang erstmals 1956 mit dem sogenannten Feld-Ionen-Mikroskop (Bild 1). Hinter dem gewichtigen Namen verbirgt sich im wesentlichen eine sehr scharfe Metallnadel, an die man eine positive elektrische Spannung anlegt, so daß von der Spitze sehr hohe elektrische Felder ausgehen. In einem Gas, typischerweise Helium, das unter niedrigem Druck steht, werden die Gasatome in der Nähe der Metallspitze ionisiert, da ihnen durch die enormen Feldkräfte eines ihrer Elektronen entrissen wird. Das nun positiv geladene Ion wird dadurch von der ebenfalls positiv geladenen Metallspitze weg beschleunigt. Schließlich prallt es auf einen Leuchtschirm, wodurch ein Abbild der Spitze entsteht, deren Vergrößerung allein durch das Verhältnis des Radius der Spitze zur Distanz vom Leuchtschirm bestimmt wird. Auf diese Weise erhält man ein, wenn auch ziemlich stark verzerrtes Bild der Spitze mit sehr hoher Auflösung.

Eine der heute am weitesten verbreiteten Apparaturen, mit denen atomare Strukturen der Materie sichtbar gemacht werden können, ist das Elektronenmikroskop. Dieses arbeitet prinzipiell wie Lichtmikroskope, doch wird anstelle von Licht ein Elektronenstrahl für die Abbildung benutzt. Für dessen Fokussierung und Abbildung wird anstelle von Linsen aus Glas ein elektromagnetisches Ablensystem verwendet. Die Elektronenstrahlen verhalten sich dabei wie Wellen mit einer Wellenlänge, die sehr viel kürzer ist als bei sichtbarem Licht. Dadurch nimmt die Auflösung entsprechend zu, so daß auf den Aufnahmen im Gegensatz zum Lichtmikroskop einzelne Atome erkennbar sind.

Vor rund zehn Jahren wurde am Forschungslabor der IBM in Rüschlikon bei Zürich eine neue Art, Atome abzubilden entwickelt (Bilder 2 und 3). Das Raster-Sonden-Mikroskop besteht ebenso wie das Feld-Ionen-Mikroskop im wesentlichen aus einer feinen Spitze, die aber diesmal dazu dient, eine Probe gleichsam abzutasten. Dabei wird die Spitze über die Oberfläche der Probe geführt, wobei der Abstand zwischen der Spitze und der Oberfläche konstant gehalten wird. Indem man die Position der Spitze aufzeichnet, kann man ein Bild der Oberfläche erhalten. Beim ersten derartigen Gerät wurde der Strom, der zwischen Spitze und Oberfläche floß, dazu verwendet, den Abstand konstant zu halten. Inzwischen sind verschiedene andere Methoden entwickelt worden, bei denen beispielsweise die Kraft oder die magnetische bzw. die optische Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe gemessen wird.

Alle diese Methoden stellen Atome als kompakte Objekte dar. Das stimmt zwar gut mit den Ideen von Demokrit (460-380 v. Chr.) überein, der Atome als ewige, unteilbare Grundbestandteilen der Materie postulierte. Andererseits war aber schon im letzten

Jahrhundert bekannt, daß Atome in Wirklichkeit nicht unteilbar sind und auch nicht ewig bestehen. Die im 19. Jahrhundert entdeckte Radioaktivität belegte zum Beispiel eindeutig, daß Atome zerfallen können und damit auch, daß sie aus noch kleineren Teilen zusammengesetzt sind. Obschon bald feststand, daß Atome aus negativ und positiv geladenen Teilchen bestehen, fehlte noch lange ein geschlossenes Bild der inneren Struktur. Unter den verschiedenen vorgeschlagenen Strukturen war diejenige von J.J. Thomson eine der bekanntesten: er schlug 1904 vor, sich das Atom als positiv geladene Kugeln zu denken, in die, wie die Rosinen in einem Kuchen, negativ geladene Elektronen eingebettet sind (Bild 4).

Rutherford konnte jedoch in den Jahren 1911 bis 1913 mit Hilfe von Streuexperimenten zeigen, daß der größte Teil der Masse des Atoms in einem sehr kleinem Gebiet konzentriert ist. Die naheliegende Erklärung, Atome seien wie unser Sonnensystem aufgebaut (Bild 5), stand aber im Widerspruch zu den in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bekannten Naturgesetzen. Gemäß der klassischen Elektrodynamik strahlen nämlich beschleunigte Ladungen elektromagnetische Wellen ab. Die Elektronen müßten daher auf ihren Kreisbahnen Energie verlieren und schließlich in den Atomkern stürzen. Um diesen Widerspruch zu lösen postulierte Bohr 1913 (Bild 6), daß sich die Elektronen ohne Energieverlust auf stationären Bahnen bewegen. Das Atom sollte seiner Vorstellung nach nur beim Übergang eines Elektrons von einer stationären Bahn auf eine andere Energie aufnehmen oder abgeben. Dieser Kunstgriff erwies sich aber schon bald als überflüssig, da die Quantenmechanik von Heisenberg und Schrödinger 1926 alle Erscheinungen auch ohne die Hilfe zusätzlicher Annahmen beschreiben konnte (Bild 7).

Die experimentelle Bestätigung für die Modellvorstellungen lieferte die präzise Analyse des von den Atomen absorbierten und abgestrahlten elektromagnetischen Spektrums. Die von Fraunhofer 1817 bei der Untersuchung des Sonnenspektrums erstmals entdeckten scharfen Absorptionslinien erlauben einen sehr genauen Einblick in die innere Struktur der Atome. Dank der Entwicklung von leistungsfähigen Lasern ist man heute in der Lage, die Voraussagen der Theorie bis auf mehr als zehn Größenordnungen zu überprüfen. Mehr noch, neben der Größe der Atome ist es sogar möglich, über das Licht die Orientierung der Atome im Raum zu bestimmen. Schon die Bauteile der Atome, der Atomkern und die Elektronen, sind nicht einfach Kugeln, sondern besitzen eine ausgezeichnete Richtung aufgrund ihres Drehimpulses. Anschaulich gesprochen, drehen sich die Teilchen um ihre eigene Achse. Die Photonen, aus denen das Licht besteht, tragen ebenfalls einen Drehimpuls, der auf das Atom übergeht, wenn sie von diesem absorbiert werden. Da der Drehimpuls eines Atoms aber nicht beliebige sondern nur diskrete Werte annehmen darf, wird das

Photon nur absorbiert, wenn sein gesamter Drehimpuls aufgenommen werden kann (Bild 8). Ist dies nicht der Fall, so absorbiert das Atom kein Licht - es scheint dann transparent.

Der Laser erlaubt heute aber nicht nur, über atomare Emissions- und Absorptionsspektren einen immer genaueren Einblick in die innere Struktur der Atome. In den vergangenen Jahren haben sich die Forschungsschwerpunkte in der Atomphysik dahin verlagert, Position, Orientierung und Form von Atomen mit Hilfe von Licht zu manipulieren. So erlaubt die gebündelte, intensive und monochromatische Strahlung des Lasers, sehr große Kräfte auf Atome auszuüben, welche das Millionenfache der Erdbeschleunigung (10^6 g) übertreffen können. Diese Kräfte können auch verwendet werden, um Atome bis in unmittelbare Nähe des absoluten Nullpunkts abzukühlen (10^{-14} K). Mit diesen kalten Atomen versucht man z.B. bessere Atomuhren zu bauen. Seit der Entdeckung der Quantenmechanik ist auch bekannt, daß Materie neben ihrem Teilchencharakter auch eine Wellennatur besitzt. Indem man diese Eigenschaften ausnützt, kann man Atome ähnlich wie Licht mit Linsen zu fokussieren, an Spiegeln reflektieren oder an Strahlteilern aufspalten.

((Literatur))

A.G.M.v. Melsen, Atom gestern und heute. Karl Alber, München (1957).

K. Simonyi, Kulturgeschichte der Physik, Verlag Harri Deutsch, Thun (1990).

M. Sigel and J. Mlynek, 'Atom Optics', Physics World 6 (2)/Februar 1993, 36-38 (1993).