

Fermionen und Bosonen

Anlässlich der Verleihung des Physik-Nobelpreises an Wolfgang Ketterle

Günter Sturm, ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR,
Camerloherstr. 19, D-85737 Ismaning
www.ScienceUp.de

Der Physik-Nobelpreis wurde dieses Jahr für die Herstellung eines sogenannten "Bose-Einstein-Kondensats" (BEC) an Eric Cornell und Carl Wiemann sowie an den am MIT (Massachusetts Institute of Technology) tätigen deutschen Physiker Wolfgang Ketterle vergeben.

Das BEC ist ein neuer Materiezustand, der aus vielen Atomen im "Gleichklang" (Kohärenz) besteht. Die einzelnen Atome geben dabei ihre Eigenständigkeit auf und bilden ein "Super-Atom", das durch eine einzige Wellenfunktion beschrieben werden kann. Alle Atome haben dieselben Eigenschaften und insbesondere - im Rahmen der Heisenbergschen Unschärferelation - identische Orte und Geschwindigkeiten. Sie besetzen gemeinsam das tiefstmögliche Energieniveau. Da sich die quantenmechanische Wellenfunktion über das gesamte Kondensat von einem Millimeter Länge erstreckt, wird sie "mit bloßem Auge" sichtbar (eigentlich ist nur der Schatten eines BECs im Laserlicht sichtbar). Überlagert man zwei BECs, so kommt es zu einem Interferenz-Phänomen ähnlich der Beugung individueller Atome an einem Spalt. Hier interferieren aber nicht einzelne Atome, sondern die beiden Atomwolken als Ganzes.

Ähnliche **makroskopische Quantenphänomene** kannte man bereits vorher in der Physik: Zu nennen sind hier die Supraleitung von Metallen und die Superfluidität von Helium. Das Bildung eines Superatoms aus individuellen Atomen erinnert an die Kondensation individueller Wassermoleküle im Dampf zu Flüssigkeitströpfchen, daher der Name "Kondensation".

Cornell und Wiemann erzeugten 1995 bei sehr tiefen Temperaturen (20 nanoKelvin, also nur 0,00000002 Grad über dem absoluten Nullpunkt) das erste BEC aus etwa 2000 Rubidiumatomen. Ketterle fand wenige Monate später über hundert mal größere BECs aus Natriumatomen.

Eine interessante Analogie zum BEC zeigt ein (Licht-)Laser: Der Laserstrahl enthält kohärente Lichtpartikel (Photonen), welche sich "Welle an Welle", also im gleichen Phasenzustand, bewegen. Die Herstellung eines BECs weist nun den Weg zu "**Atomlasern**": Ein BEC wird durch einen Magnetkäfig an einem Ort gehalten. "Bohrt" man ein Loch in diesen Käfig, so entsteht ein zwei mm langer kohärenter Materiestrahl. Derzeit ist es aber noch nicht möglich, kontinuierlich arbeitende Materielaser herzustellen. Praktische Anwendungen dafür gäbe es u. a. in der Nanotechnologie, bei Quantencomputern und bei Präzisionsmessungen.

Laut einem vor kurzem veröffentlichten Artikel der Fachzeitschrift Nature (Bd. 413, S.498, 2001) hat die Gruppe von Theodor Hänsch (MPI für Quantenoptik, Garching bei München) die Apparatur für die Bose-Einstein-Kondensation auf einem Microchip integriert. Goldleiter auf der Oberfläche erzeugen hierbei eine Magnetfalle, die eine Wolke von Rubidium-Atomen knapp über der Oberfläche festhält. Diese Experimente könnten zahlreiche Anwendungen von BECs in der Mikroelektronik eröffnen.

Wir wollen uns im Folgenden auf die physikalischen Grundlagen eines BECs konzentrieren:

Der indische Physiker Bose führte 1924 theoretische Berechnungen über Photonen durch. Seine Ergebnisse schickte er an Albert Einstein, der die Theorie auf Teilchen mit speziellen Eigenschaften (später **Bosonen** genannt) ausweitete. Nach der Vorhersage Einsteins und Boses gehen diese Teilchen plötzlich alle in den gleichen niedrigst möglichen Energiezustand über, wenn sie extrem stark abgekühlt werden.

Was sind nun aber diese nach Bose benannten Bosonen? Dieser Begriff bezieht sich auf eine Eigenschaft aller Teilchen, den Spin, den wir hier vorher diskutieren wollen:

Der Spin ist eine intrinsische, charakteristische und unveränderliche Eigenschaft eines Teilchens. Anschaulich kann man sich den Spin als eine Drehung des Teilchens um eine Achse vorstellen. Dadurch entsteht ein Drehimpuls. Diese Analogie sollte aber nicht überbewertet werden. So kann die "Drehachse" eines Teilchens in einem Magnetfeld nur bestimmte - gequantelte - Einstellungen annehmen. Der ebenfalls gequantelte Betrag eines Spins wird durch die Spin-Quantenzahl charakterisiert. Diese kann nur ganz- oder halbzahlige Werte annehmen: 0, 1/2, 1, 3/2, 2,

Was kann man mit diesen Spins anfangen? Es gibt vielfältige Anwendungen in der Physik und Chemie, die wichtigste hiervon ist die NMR (Kernmagnetische Resonanz). Die für die Praxis unseres täglichen Lebens wichtigste Anwendung ist die Kernspin-Tomographie in der Medizin.

Es gibt eine weitere wichtige Eigenschaft des Spins eines Teilchens: **Der Gesamtspin des Teilchens bestimmt, ob es sich um ein Fermion (halbzahliger Spin) oder ein Boson (ganzzahliger Spin handelt)**. Beide Gruppen von Teilchen zeigen ein vollständig unterschiedliches Verhalten bei der Besetzung quantenmechanischer Energieniveaus: Fermionen wie z. B. Elektronen (Spin 1/2) können nicht alle dasselbe Energieniveau besetzen. Bosonen hingegen kennen diese Beschränkung nicht. Eine beliebige Anzahl von ihnen kann einen einzigen Quantenzustand besetzen. Und damit ist es möglich, dass sich diese Teilchen zu einem "makroskopischen" Gebilde wie Bose-Einstein-Kondensaten "vereinigen", wenn dem System praktisch die gesamte Energie entzogen wird.

Der Unterschied zwischen Fermionen und Bosonen wird in der Quantenmechanik mathematisch so beschrieben, dass die **Gesamtwellenfunktion** eines Systems beim Vertauschen der Koordinaten zweier Teilchen (z. B. x_1 und x_2) für Fermionen ihr Vorzeichen wechseln muss, für Bosonen hingegen nicht:

$$\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) = - \Psi(x_2, x_1, \dots, x_n) \quad \text{für Fermionen (1)}$$

$$\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) = + \Psi(x_2, x_1, \dots, x_n) \quad \text{für Bosonen (2)}$$

(1) ist die mathematische Formulierung des Pauli-Prinzips für Elektronen und bestimmt - zusammen mit energetischen Aspekten - die Verteilung der Elektronen in Atomen und daher auch den Aufbau des Periodensystems der Elemente in der Chemie.

Günter Sturm

© 2001 ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, Alle Rechte vorbehalten. Nichtkommerzieller Nachdruck und Wiedergabe gestattet bei Quellenangabe ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, www.ScienceUp.de.