

An der Schnittstelle zwischen zwei Welten

Atome, die sich an mehreren Orten gleichzeitig aufhalten, Elektronen, die unüberwindliche Hindernisse „durchtunneln“, oder Paare von Photonen, die ohne direkten Kontakt auf eine Weise miteinander verbunden sind, dass sie sich auch über große Distanzen hinweg wie ein einheitliches System verhalten – in der Quantenwelt ist vieles möglich, was in der Alltagswelt unvorstellbar ist. Aber wo beginnt das Reich der Quanten, und wo endet es? Gelten die Quantengesetze auch für „alltägliche“ Objekte, die man mit dem bloßen Auge erkennen kann? Diese Fragen, die schon die Väter der Quantenphysik – Albert Einstein, Nils Bohr und Erwin Schrödinger – beschäftigten, haben nichts an Aktualität verloren. Mit immer ausgeklügelteren Experimenten versuchen die Physiker, den Gültigkeitsbereich der Quantenphysik zu erweitern, indem sie beispielsweise die Eigenschaften von Quantenobjekten auf makroskopische Objekte wie mechanische Oszillatoren übertragen. Welche Fortschritte inzwischen erzielt worden sind, ist in der vergangenen Woche auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Dresden deutlich geworden.

Atome und mikromechanische Oszillatoren scheinen schon allein wegen des unterschiedlichen Größenverhältnisses wenig Gemeinsamkeiten zu besitzen. Die Physiker verfolgen das ehrgeizige Ziel, zwei scheinbar unvereinbare Welten zusammenzubringen. „Wir wollen Energie und Information von der Quantenwelt auf die Makrowelt übertragen und so möglicherweise ein Quantenverhalten auch bei makroskopischen Objekten hervorrufen“, begründet Philipp Treutlein von der Universität Basel in Dresden seine Experimente. Dem Physiker ist es mit seinen Kollegen gelungen, eine Wolke aus zwanzigtausend extrem kalten Rubidiumatomen an einen schnell schwingenden Mikrometergroßen Federbalken zu koppeln. Solche Oszillatoren sind so empfindlich,

Noch immer wissen die Physiker nicht, wo die Grenze zwischen der Quantenwelt und der Alltagswelt verläuft. Bisher war lediglich klar, dass sich auch große Moleküle wie Quanten verhalten können. In Dresden wurde man jetzt eines Besseren belehrt.

dass sie dazu genutzt werden, einzelne Moleküle nachzuweisen oder Oberflächen zu erkunden sowie einzelne Atome sichtbar zu machen.

Die Rubidiumatome in der Wolke befanden sich im niedrigsten Energiezustand und zeigten ein absolut synchrones quantenmechanisches Verhalten, das viele Sekunden andauerte. Als man die etwa 200 Nanometer lange zigarrenförmige Wolke bis auf einen Mikrometer an den Federbalken herangeführt hatte, begann zwischen den kollektiv schwingenden Atomen der Wolke und den Oberflächenatomen des Balkens eine anziehende Kraft zu wirken. Es entstand eine so starke Kopplung, dass sich die Atomwolke und der Federbalken wie zwei schwingende Pendel mit extrem unterschiedlichen Massen verhielten, die über eine Spiralfeder miteinander verbunden sind.

Dass man Atome und einen Oszillator sogar miteinander koppeln kann, wenn sie einen Meter voneinander entfernt sind, sich somit weit außerhalb der Reichweite jeglicher anziehender Kräfte befinden, haben Treutlein und seine Kollegen in ihrem jüngsten Experiment herausgefunden. Der Oszillator war eine 0,5 mal 0,5 Millimeter große und fünfzig Nanometer dicke Membran, die sie senkrecht in den Strahlengang eines roten Laserstrahls stellten. Da er einen Teil des auftreffenden Lichts reflektierte, bildeten der ein- und der zurücklaufende Strahl eine stehende Lichtwelle mit Wellentälern und -bäuchen. Eine Wolke aus einer Million kalter Rubidiumatome wurde behutsam in den Strahlengang der Welle gebracht, woraufhin sich die Teilchen gleich-

mäßig auf die Täler verteilten, aus denen sie nicht mehr entweichen konnten.

Obwohl die vordersten Atome fast einen Meter entfernt waren, verspürte die Membran dennoch ihre Anwesenheit. Das zeigte sich deutlich, als man den Laserstrahl ausschaltete und die Membran nicht länger in Schwingung versetzte. Der Oszillator kehrte schneller in den Ruhezustand zurück, als es normalerweise der Fall gewesen wäre. „Obwohl die Atome im Vergleich zu der Membran winzig klein sind, können sie doch das Schwingungsverhalten des makroskopischen Objekts beeinflussen“, erklärte Treutlein. Die Kopplung wurde allein durch den Laserstrahl übermittelt. Dieser transportierte Schwingungsenergie vom Oszillator in Richtung Atome, die sich dadurch aufheizten. „Wir mussten die Intensität des Laserstrahls leicht erhöhen, damit die Teilchen durch die zusätzliche Energie nicht aus den Mulden entwichen.“ Als Nächstes wollen die Forscher mit einem weiteren Laserstrahl sicherstellen, dass jeweils nur ein Atom in einem Wellental sitzt. Zusätzlich will man die Membran kühlen und so störende Einflüsse wie die Wärmebewegung möglichst ausschalten. Dann könnte es durchaus sein, dass sich im Schwingungsverhalten der Membran Quanteneffekte zeigen, die von einzelnen Atomen herrühren.

Mit Mikrowellen wollen John Teufel und seine Kollegen vom National Institute of Standards and Technology in Boulder (Colorado) die obere Grenze der Quantenphysik ausloten. Dazu haben sie ein Hybridsystem entwickelt, das aus einem supraleitenden Mikrowellenresonator und einem mikromechanischen Oszil-

lator besteht. Die beiden Systeme sind über einen elektrischen Kondensator so stark miteinander gekoppelt, dass die Schwingung des mechanischen Bauteils die Frequenz der Mikrowellen und umgekehrt beeinflusst, obwohl die mechanischen Schwingungen nur einen Bruchteil der Mikrowellenfrequenz betragen. „Es scheint, als ob die beiden Systeme miteinander kommunizieren“, beschrieb Teufel das ungewöhnliche Verhalten. Wenn der mechanische Resonator pulsiert, verschiebt sich die Resonanzfrequenz der Mikrowellen im Resonator um einige Megahertz. Gleichzeitig verlängert sich die Schwingungsdauer des Oszillators. Als Nächstes wollen die Forscher um Teufel ihren Oszillator so stark abkühlen, dass er in den quantenmechanischen Grundzustand übergeht.

Die Wissenschaftler aus Boulder wollen offenkundig ihren amerikanischen Kollegen von der University of California in Santa Barbara nacheifern. Die Forscher um John Martinis haben erstmals die für Quantenobjekte typische Überlagerung von Zuständen bei einem mikromechanischen Oszillator beobachtet, den man zuvor so weit abgekühlt hatte, dass er absolut in Ruhe war. Das 40 Mikrometer lange und einen Mikrometer dicke Bauteil hatte man mit einer supraleitenden Leiterschleife gekoppelt. Diese hatte die Besonderheit, dass darin der elektrische Strom auch in beide Richtungen gleichzeitig fließen konnte. Diesen quantenphysikalischen Zwitterzustand konnten die Forscher auf den Oszillator übertragen. Der zeigte ein paradoxes Verhalten. Er war gleichzeitig in Ruhe und in Bewegung. Der Schwebezustand hielt allerdings nur an, solange niemand den Schwingungszustand untersuchte. Jede Messung hätte die Überlagerung sofort zerstört und den Oszillator auf einen der beiden Zustände festgelegt. Die Forscher um Martinis haben die Grenze zwischen Quantenwelt und Makrowelt um ein gutes Stück nach oben verschoben. MANFRED LINDINGER