AM KÄLTEPOL DES UNIVERSUMS: QUANTENMECHANIK ZUM ANSCHAUEN

ULRICH SCHOLLWÖCK

„Die Hypothese des Reduktionismus mag unter Philosophen immer noch ein kontroverses Thema sein; aber ich denke, dass sie von der großen Mehrheit aktiver Wissenschaftler ohne Frage akzeptiert wird." Ist diese Aussage von Phil Anderson, Nobelpreisträger und einer der führenden Physiker des zwanzigsten Jahrhunderts, einer dieser arroganten Sätze, mit denen Physiker recht unsubtil andeuten, wo in etwa sie sich in der Hierarchie der Forschungsfelder anordnen? Im Wissenschaftskolleg konnte man in diesem Jahr eine Karikatur sehen, die für eine gewisse Aufregung gesorgt hat: sie stellte eine intellektuelle Nahrungskette dar, in der Chemie nichts anderes als angewandte Physik, Biologie nichts anderes als angewandte Chemie ist, und so fort, bis man dann ganz unten ankommt, irgendwo unter Historikern. Der Physiker dieser Karikatur ignoriert jedoch großzügig, dass er ohne Mathematik letztlich taubstumm wäre. Dass Phil Anderson sich wesentlich mehr bei seinem Satz gedacht hat, kann man aber bereits dem Titel seiner grundlegenden Arbeit von 1972 entnehmen, der das Zitat entnommen ist: „Mehr ist anders".

Es ist vielleicht hilfreich, sich bewusst zu machen, dass die Schlachten um den Reduktionismus nicht nur zwischen der Physik und anderen Wissenschaften, sondern auch innerhalb der Physik selbst geschlagen werden. Im Herzen der Physik findet sich die Teilchenphysik, die die fundamentalen Gesetze der Physik aufdeckt, die dann letztlich bereits alles, was in angewandteren und komplexeren Feldern der Physik wie der Biophysik oder der Festkörperphysik passiert, implizieren. Auch wenn ich versucht habe, hier neutral zu formulieren, stellt sich dieser Zusammenhang den Praktikern der Physik manchmal durchaus anders da: an der Spitze haben wir den faustischen Teilchenphysiker bei seiner unablässigen Suche nach dem, was die Welt im Innersten zusammenhält, wie ihn Rembrandt darstellt (Abb. 1). Aber wir können uns vorstellen, Dr. Faust auch in einer der berühmten Bettlerradierungen von Rembrandt zu sehen, wo er einige Brosamen der Erkenntnis von sei-

---

Abendkolloquium gehalten am 21. April 2010 am Wissenschaftskolleg zu Berlin.

nem Tisch an weniger privilegierte Physiker weitergibt, die diese christliche Wohltat dankbar entgegennehmen (Abb. 2). Sie befassen sich, offensichtlich wenig einträglich, mit Gebieten, die Teilchenphysiker gerne als „Materialwissenschaften“ oder „Engineering“ bezeichnen. Um den Subtext dieser Bezeichnungen zweifelsfrei zu machen, sei Murray Gell-Mann zitiert, ein weiterer Nobelpreisträger für Physik und Entdecker der Quarks, der diese Gebiete summarisch als „squalid state physics“ (Schmutzphysik) bezeichnet hat. Phil Anderson ist einer von diesen Schmutzphysikern …

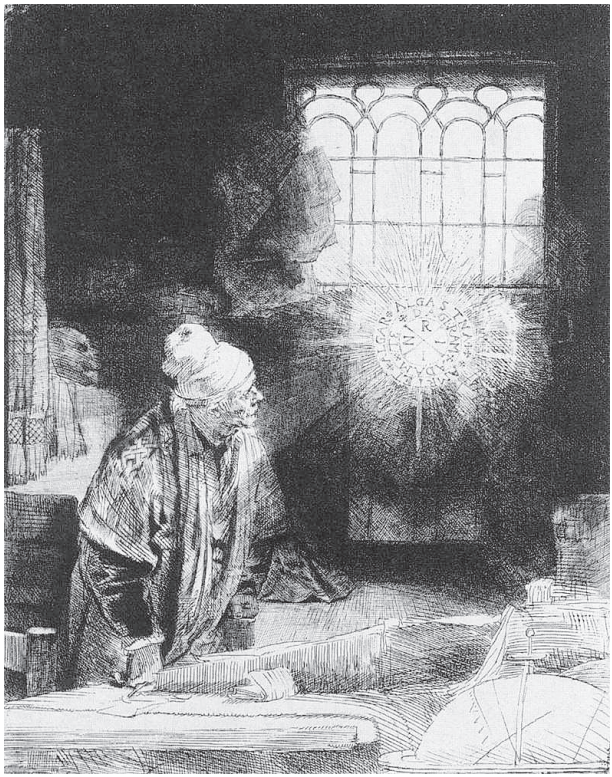

Abb. 1: Rembrandt, Faust.

Aber was genau meint er mit den Worten „mehr ist anders“? Nichts anderes als das Folgende: Die überwältigende Mehrheit der Physiker (wenn nicht alle; ich persönlich bin noch keiner Ausnahme begegnet) glauben in der Tat, dass das Verhalten komplexerer physikalischer Systeme, wie etwa das eines Computerchips, auf die fundamentalen Gesetze zurückgeführt werden kann. In diesem Sinne sind wir, wie Anderson sagt, alle Reduktionisten; wir benötigen die Forschung der Teilchenphysik. Aber zumindest in der Festkörperphysik, Biophysik und statistischen Physik sind wir ebenso überzeugt, dass das Verhalten dieser komplexen physikalischen Systeme darüber hinaus im Wesentlichen durch *emergente* Eigenschaften charakterisiert wird.

Abb. 2: Rembrandt, Bettlerradierung.

Hier möchte ich, vermutlich aber in Übereinstimmung mit anderen Verwendungsformen des Begriffs, eine Eigenschaft emergent nennen, die man einem Ensemble von (zum Beispiel) Teilchen zuschreiben kann, jedoch nicht einem einzelnen Teilchen. Emergenz erweist sich in der Tat als allgegenwärtiges Merkmal kollektiver Physik und tritt in großer Vielfalt auf. Physikalische Gesetze, die auf der Ebene des einzelnen Teilchens sehr einfach sind, können im Kollektiv zu äußerst komplexen Gebilden führen, wie etwa einer Katze. Aber ihre „Katzenhaftigkeit" kann nicht zerlegt werden: „Wenn Sie versuchen, eine Katze auseinander zu nehmen, um herauszufinden, wie sie funktioniert, bekommen Sie es zuerst mit einer nicht funktionierenden Katze zu tun", so ein Zitat von Douglas Adams, das ich den Biologen im Wissenschaftskolleg verdanke. Aber Emergenz führt nicht nur zu komplexerem, sondern auch zu einfacherem Verhalten; darauf möchte ich mich im Folgenden konzentrieren.

Stellen wir uns einen Kasten vor, der mit einem Gas gefüllt ist, einem Haufen von Atomen, die sich frei bewegen, an den Wänden und aneinander abprallen; es ist hier völlig zureichend, sie sich als Billardkugeln vorzustellen. Für jede dieser Billardkugeln gelten die Newtonschen Gesetze der klassischen Mechanik; hier sei nur das zweite angeführt: Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung; die beiden anderen befassen sich mit Trägheit und der Gleichheit von Aktion und Reaktion. Entscheidend ist, dass in keinem dieser Gesetze, die eine vollständige Beschreibung der Bewegung der Gasteilchen geben, eine Größe „Temperatur" vorkommt. In der Tat, würde ich gefragt, welche Temperatur ein bestimmtes Teilchen hat, müsste ich antworten, es habe keine. Es handelt sich um eine ebenso sinnlose Frage wie die nach der Farbe einer Beethovenschen Symphonie. Aber wie wir alle wissen, hat Luft, ein Gas, sehr wohl eine Temperatur. Wo kommt sie ins Spiel?

Nehmen wir an, wir könnten mit Hochgeschwindigkeitskameras die Position und Geschwindigkeit aller Gasteilchen feststellen. Nehmen wir zunächst einen Kasten mit wenigen Teilchen, etwa ein paar hundert oder tausend. Es wird langsame und schnelle Teilchen geben, und wenn wir eine Verteilung der Geschwindigkeiten aufzeichnen, erhalten wir eine wenig glatte Kurve, die sich von Messung zu Messung ändern wird (Abb. 3). Wenn wir jedoch die Zahl der Teilchen drastisch erhöhen, etwa auf 10^{23} Teilchen, das ist ungefähr die Zahl der Gasmoleküle in einem Liter Luft, wird die Kurve der Geschwindigkeitsverteilung vollkommen glatt und reproduzierbar (Abb. 4). Das ist eine einfache Folge aus dem Gesetz der großen Zahl in der Mathematik: die Schwankungen in der Geschwindigkeitsverteilung mitteln sich im Grenzfall sehr vieler, im Idealfall unendlich vieler Teilchen heraus. Würfelt man sechsmal, ist es nicht sehr wahrscheinlich, dass der Anteil der Sechsen $^1/_6$

beträgt (man also genau einmal die Sechs erhält); würfelt man 6 Millionen mal, wird der Anteil der Sechsen sehr nahe bei $^1/_6$ liegen. Damit verdienen Spielbanken sehr zuverlässig Geld.

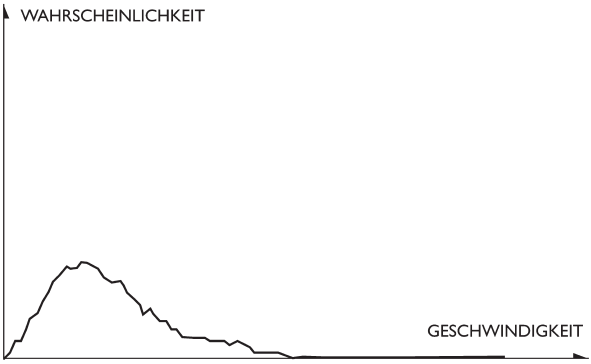

Abb. 3: Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Geschwindigkeiten einer geringen Anzahl von Gasteilchen in einem Kasten.

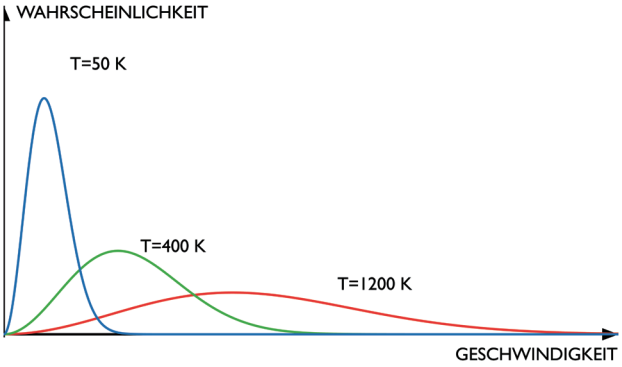

Abb. 4: Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Geschwindigkeiten einer sehr großen Anzahl von Gasteilchen in einem Kasten bei verschiedenen Temperaturen.

Die Geschwindigkeitsverteilungen werden immer wieder ähnliche Formen annehmen, wenn wir sie an verschiedenen Kästen voll Gas messen, und man kann zeigen, dass alle unterschiedlichen Kurven durch eine einzige Zahl parametrisiert werden können, die wir *Temperatur* nennen. Die genaue Formel für die Verteilungen ist im Wesentlichen eine Exponentialfunktion, die die Temperatur enthält, aber worauf es eigentlich ankommt ist, dass Temperatur eine Größe ist, die eine statistische Verteilung von Geschwindigkeiten (genauer, Bewegungsenergien) charakterisiert und dass Temperatur zwar in einer genauen Beziehung zur mittleren Geschwindigkeit steht (höhere Temperatur bedeutet höhere mittlere Geschwindigkeit), es aber immer langsamere und schnellere Teilchen im Ensemble gibt. Je höher die Temperatur ist, desto breiter werden die Geschwindigkeiten verteilt sein.

Das alles riecht dennoch nach einer propagandistisch sorgfältig vertuschten Niederlage, nämlich unserer Unfähigkeit, in der Praxis die volle Information zu erhalten, die Bewegung jedes einzelnen Teilchens. Das ist zu kurz gedacht: Jeder weiß aus dem Alltag, dass Wärmeenergie von „heiß" nach „kalt" fließt. Sind uns die Temperaturen zweier Objekte bekannt, können wir ohne weiteres die wichtige Frage beantworten, in welche Richtung die Wärme fließt. Aus einer endlos langen Liste aller Teilchengeschwindigkeiten wäre das nicht ersichtlich. Temperatur ist ein emergentes Konzept, mathematisch streng, bedeutungsvoll und nützlich, wenn wir über Physik sprechen. Statistische Physik, Festkörperphysik und so weiter sind daher nicht nur angewandte Teilchenphysik, und genauso wenig Chemie nur angewandte Physik: Auf jeder Ebene benötigt man neue Konzepte und Kreativität bei ihrer Identifizierung, um gehaltvolle und nützliche Aussagen machen zu können.

Nicht nur Temperatur ist ein Alltagskonzept emergenter Natur. Relaxation oder Gleichgewichtseinstellung ist ein weiteres Alltagsphänomen, das eng mit der Existenz einer Richtung in der Zeit zusammenhängt: Geben wir einen Tropfen Tinte in ein Glas Wasser, so wird sich der Tintentropfen im Wasser verteilen und niemals mehr als Tropfen „zurückkommen". Überraschenderweise enthalten die fundamentalen Gesetze der Physik keine Zeitrichtung, die doch im Unterschied von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft eine unserer grundlegendsten Erfahrungen ist: „Zögernd kommt die Zukunft hergezogen, pfeilschnell ist das Jetzt entflogen, ewig still steht die Vergangenheit." (Schiller). Etwas profaner, jeder von uns kann unterscheiden, ob uns ein Film vorwärts oder rückwärts abgespielt wird.

Stellen wir uns wiederum unseren Kasten vor, jetzt aber mit einer beweglichen Trennwand versehen, durch die er in zwei Hälften geteilt wird, aber wieder verbunden werden kann (Abb. 5). Auf der rechten Seite soll sich ein Vakuum (keine Teilchen) befinden, auf

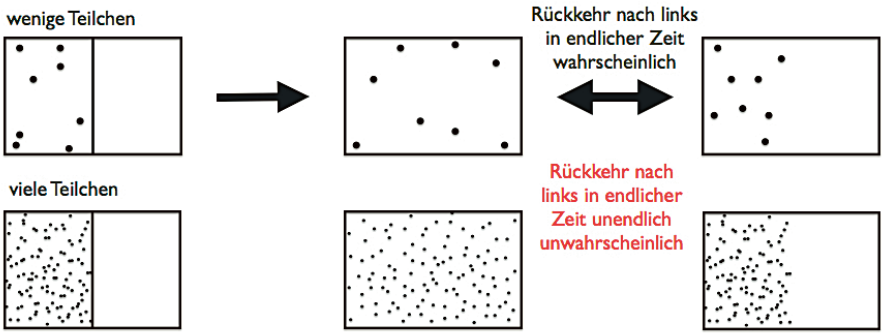

Abb. 5: Erlaubt man Gasteilchen, sich in einem Kasten auszubreiten, so wird es mit zunehmender Teilchenzahl unendlich unwahrscheinlich, dass sie in endlicher Zeit in eine Kastenhälfte zurückkehren.

der linken Seite acht Teilchen. Ziehen wir die Trennwand heraus, so werden sich die Teilchen frei zwischen den beiden Hälften bewegen. Wegen der kleinen Teilchenzahl ist es aber sehr wahrscheinlich, dass recht bald zeitweise wieder alle Teilchen auf der linken Seite sein werden. In diesem Augenblick schieben wir die Trennwand wieder herein. Spielen wir nun den Film der sich hin- und herbewegenden Teilchen vorwärts und rückwärts ab, werden wir den Unterschied nicht feststellen können; von der Herstellung eines Gleichgewichts können wir sinnvollerweise nicht sprechen.

Gehen wir nun wieder zum Fall sehr vieler (10^{23}) Teilchen über, allesamt auf der linken Seite. Nach Entfernung der Trennwand wird das Gas in den ganzen Kasten expandieren, aber die Wahrscheinlichkeit, dass alle Teilchen in einer endlichen Zeit wieder in die linke Hälfte zurückkehren, ist nun unendlich klein. Die Zeitskala ist im Vergleich zum ersten Fall um einen Faktor mit etwa 10^{23} Ziffern länger! Im Vergleich dazu ist das Alter des Universums nur ein Lidschlag. Mit einer Wahrscheinlichkeit, die überwältigend nahe an 100 % liegt, expandiert das Gas in den ganzen Kasten, und findet damit seinen neuen Gleichgewichtszustand. Ein Film, der das Umgekehrte zeigt, würde von uns sofort als Fälschung identifiziert, wie ein Film, in dem ein zerbrochenes Weinglas aus seinen Splittern wieder ersteht. Dass sich ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt, dass Relaxation auftritt, ist nur als emergentes Phänomen für viele Teilchen zu verstehen.

Emergenz begegnet uns also in vielen grundlegenden physikalischen Konzepten, wie der Temperatur, der Richtung des Zeitpfeils, oder der Relaxation; diese Liste ließe sich mühelos fortsetzen. Bis jetzt haben wir uns aber nur in der Welt der Billardbälle, der klassischen Physik, bewegt. Da die grundlegende Theorie der Physik die Quantentheorie ist, ist es natürlich, nach Emergenz in der Quantenphysik zu fragen. Die Beobachtung emergenter Quantenphänomene wird dadurch erschwert, dass bei einer wachsenden Teilchenzahl das Verhalten des makroskopischen Systems zunehmend klassisch wird. Wir haben also eine Mischung von zwei Arten der Emergenz, der Emergenz der klassischen Welt aus der Quantenwelt, und der Emergenz von Vielteilchenkonzepten, wie wir sie soeben diskutiert haben.

Die Emergenz der klassischen Welt ist facettenreich und ein Thema von eigenem Rang. So soll der Hinweis genügen, dass Quantenphysik durch „Wellenfunktionen" charakterisiert wird, und die besonderen Eigenschaften der Quantenwelt immer das Resultat von Überlagerungen von Wellen sind, die unterschiedliche Atome, verschiedene Materiezustände und anderes beschreiben. Man könnte an die Schallwellen denken, die die verschiedenen Orchesterinstrumente erzeugen, und die zusammen den Klang einer Symphonie ergeben. Störungen der einzelnen Schallwellen werden die Symphonie zerstören, und das ganze Unterfangen wird umso fragiler, je mehr Instrumente (Teilchen) ein kohärentes Ensemble bilden müssen, da mehr und mehr Fehler auftreten werden. Musikalisch gesprochen, würde eine Kakophonie der klassischen Welt entsprechen, ein Konzert der Berliner Philharmoniker der Quantenwelt. Wir suchen also nach einem Quantenphänomen, das auch im Grenzfall sehr vieler Teilchen (Instrumente) kohärent (eine Symphonie) bleibt. Da hohe Temperaturen stärkeren Abweichungen vom Mittel entsprechen, steht zu erwarten, dass uns unsere Suche zu sehr niedrigen Temperaturen führen wird.

Das reinste Quantenphänomen, das sich bis zu makroskopischen Dimensionen verfolgen lässt, die normalerweise ganz der klassischen Physik zugehören, ist die *Bose-Einstein-Kondensation*, die in der klassischen Physik keine Entsprechung findet. Betrachten wir unser Gas aus Billardkugeln, so sind die einzelnen Kugeln ohne Bezug auf die anderen, außer sie stoßen gerade zusammen. In der Quantenphysik hingegen besteht ein solcher Bezug zu jedem Zeitpunkt; gemäß der Quantenphysik zerfallen alle Teilchen in der Natur in zwei Kategorien, Bosonen und Fermionen, die sich sehr unterschiedlich verhalten, bringt man sie zusammen.

Stellen wir uns einen sehr kleinen Kasten vor; aus der Quantenphysik folgt, dass sich alle Teilchen in einem solchen Kasten in wohldefinierten Zuständen mit wohldefinierten

Energien befinden, die wir in vollkommener Analogie zu den genau festgelegten Frequenzen (Schwingungen) einer Violinensaite sehen können. Fermionen sind Einzelgänger: In jedem dieser Zustände kann sich genau ein Teilchen befinden. Bosonen hingegen sind Herdentiere: Es gibt keine Beschränkung, wie viele Teilchen in einem dieser Zustände sein können, und wo sich schon viele befinden, werden sich bevorzugt neue einfinden.

1924 sagten der indische Physiker Satyendra Nath Bose und Albert Einstein voraus, dass bei sehr niedrigen Temperaturen etwas Spektakuläres passieren sollte. Da Temperatur ein Maß der mittleren Bewegungsenergie im System ist, werden sich die Bosonen bei sehr niedriger Temperatur in die energetisch niedrig liegenden Zustände begeben; das würden aber auch klassische Teilchen tun (Billardbälle). Der Unterschied, der mit dem Herdentrieb der Bosonen zusammenhängt, ist jedoch, dass die Bosonen unterhalb einer bestimmten Temperatur keine andere Möglichkeit haben, als in ihrer Mehrzahl den absolut tiefliegendsten Zustand zu besetzen. Dieses Phänomen nennt man Bose-Einstein-Kondensation. Das klingt zunächst vielleicht nicht sehr eindrucksvoll, bedeutet aber, dass sich eine makroskopische Zahl von Teilchen in exakt dem gleichen Quantenzustand befinden und im Gleichschritt marschieren, aufgrund eines rein statistischen Effekts, nicht aufgrund einer Kraft, die sie in Reih und Glied bringt. Das resultierende makroskopische Quantenobjekt nennt man Bose-Einstein-Kondensat (aus dem Englischen abgekürzt BEC).

Ein anderer Blickwinkel erlaubt uns, die Temperatur abzuschätzen, bei der das Kondensat entsteht. Betrachten wir ein Gas bosonischer Atome, das wir abkühlen. Bei hohen Temperaturen sind unsere Atome wie Billardbälle mit einem mittleren Abstand d, der von der Dichte des Gases abhängt. Bei niedrigeren Temperaturen werden Quanteneffekte sichtbar. Man kann im Rahmen der Dualität von Welle und Teilchen in der Quantenphysik zeigen, dass das mit einem Teilchen assoziierte Wellenpaket von der Größe λ_{dB}, der sogenannten de Broglie-Wellenlänge, ist, die mit der inversen Quadratwurzel der Temperatur, d. h. mit Absenkung der Temperatur anwächst. Wenn die Wellenpakete bei hinreichend tiefen Temperaturen schließlich von der Größe d sind, fangen sie an zu überlappen, und eine gigantische Materiewelle entsteht, die Bosonen sind im Gleichschritt. Die Temperatur, bei der das passiert, definiert die kritische Temperatur; kühlen wir weiter ab, sind schließlich alle Atome im Kondensat. In einem typischen ultrakalten Atomgas beträgt der mittlere Teilchenabstand etwa 400 Nanometer. Daraus lässt sich eine kritische Temperatur von etwa 300 Nanokelvin berechnen, 300 Milliardstel eines Grads. Wie kalt ist das?

Wir reden von den tiefsten Temperaturen im Universum! Machen wir ein paar Vergleiche (Abb. 6). Physiker benutzen die Einheit Kelvin. 1 Kelvin entspricht 1 Grad Celsius, mit

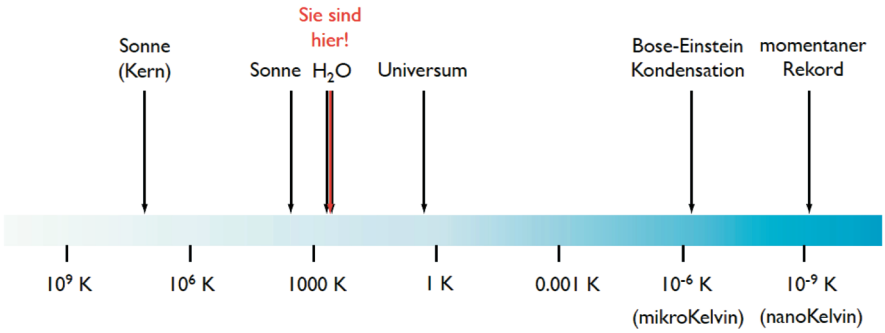

Abb. 6: Einige Temperaturen aus Alltag und Labor in logarithmischer Darstellung.

dem Unterschied, dass nicht vom Gefrierpunkt des Wassers aus gerechnet wird, sondern vom absoluten Temperaturnullpunkt, der bei –273,15 Grad Celsius liegt. Somit gefriert Wasser bei 273,15 Kelvin und verdampft bei 373,15 Kelvin; Zimmertemperaturen liegen bei etwas unter 300 Kelvin. Die Oberfläche der Sonne ist 5800 Kelvin heiß, ihr innerster Kern 15 Millionen Kelvin. Auf der kalten Seite ist die Hintergrundtemperatur des Universums, 2,7 Kelvin, recht erfrischend; diese Temperatur geht auf die Mikrowellenhintergrundstrahlung zurück, die das Universum als Abglanz des Urknalls durchdringt. Im Labor kann man leicht mit flüssigem Helium Temperaturen von einigen Kelvin erzeugen. Danach wird es schwierig: wir müssen um sechs weitere Größenordnungen abkühlen, um die Bose-Einstein-Kondensation zu erzielen! Der Weg nach unten ist mit mehreren Nobelpreisen gepflastert; der gegenwärtige Rekord liegt bei 0,06 Nanokelvin, die am MIT in Boston erreicht wurden.

Wie können wir einzelne Atome kühlen? Bei sehr niedrigen Temperaturen sind sie so langsam, dass sie an Oberflächen kleben bleiben, so dass ein kontaktfreies Verfahren benötigt wird. 1975 hatten Schawlow und Hänsch die überraschende Einsicht, dass man mit Licht kühlen kann (Abb. 7) – überraschend, weil Licht aufheizt, wie man etwa feststellen kann, wenn man sich aus dem Schatten in die Sonne begibt: Licht transportiert Energie, und wenn man das Licht absorbiert, dann absorbiert man auch die Energie.

Licht transportiert aber nicht nur Energie, sondern auch Impuls, den wir auch absorbieren, aber nicht wahrnehmen, weil unsere Körpermasse so groß ist. Ein kleines Atom spürt ihn umso mehr!

Atome absorbieren nicht beliebiges Licht, sondern nur Photonen, deren Frequenz (Energie) der Energiedifferenz zwischen zwei internen Zuständen des Atoms entspricht (z. B. seinem Grundzustand (energetisch niedrigstem Zustand) und einem angeregten Zustand). Ist dies der Fall, so wird das Photon absorbiert: seine Energie versetzt das Atom in den angeregten Zustand, der Impuls wird auf das Atom übertragen wie von einer Billardkugel zur anderen.

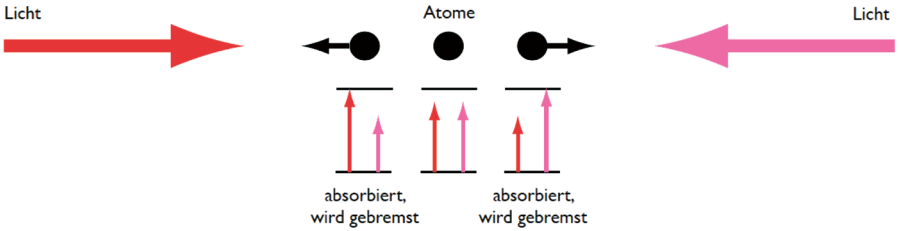

Abb. 7: Kühlen mit Licht. Atome können Licht (Energie und Impuls) nur absorbieren, wenn die Lichtfrequenz zu den inneren Energieabständen des Atoms passt. Durch Ausnutzung des Dopplereffekts kann erreicht werden, dass Atome Licht nur dann absorbieren, wenn es aus einer ihrer Bewegung entgegengesetzten Richtung kommt, und dadurch abgebremst werden.

Sollte es uns gelingen, den Impulsübertrag immer genauso zu vermitteln, dass das Atom abgebremst wird, würden wir das Atom abkühlen, da eine systematische Verringerung der Geschwindigkeit einer Verringerung der Temperatur des Ensembles entspricht. Um das zu erreichen, muss das Licht jedoch immer aus der der Bewegung des Atoms entgegengesetzten Richtung kommen. Da sich die Atome in beliebige Richtungen bewegen, müssen wir sowohl Beschleunigung als auch Abbremsung erwarten, und der gewünschte Effekt scheint sehr schwer erreichbar. Der Trick besteht nun darin, den Doppler-Effekt auszunutzen, den wir alle von einem schnellen Zug kennen: Solange er sich auf uns zu bewegt, ist die Tonfrequenz erhöht (das Fahrgeräusch klingt höher), wenn er sich dann von uns weg bewegt, ist die Tonfrequenz erniedrigt.

Betrachten wir zur Vereinfachung eine eindimensionale Bewegung des Atoms (also nur nach links bzw. rechts). Wir lassen Licht von beiden Seiten auf das Atom einfallen, aber mit einer Frequenz bzw. Energie, die nicht hoch genug ist, um in Resonanz mit dem Atom zu

sein und absorbiert zu werden. Aber aufgrund des Doppler-Effekts wird ein Atom, das sich nach rechts bewegt, das Licht, das von rechts kommt, bei einer höheren Frequenz sehen, die die Resonanzbedingung erfüllt. Das Licht kann daher absorbiert werden, und das Atom, das sich nach rechts bewegt, wird abgebremst. Das Licht, das von links kommt, wird bei einer (noch) niedrigeren Frequenz gesehen und spielt daher keine Rolle. Umgekehrt absorbiert ein Atom, das sich nach links bewegt, das von links kommende Licht und wird ebenfalls abgebremst. Die Geschwindigkeit nimmt bei jeder Absorption um ein paar cm/sec ab und erfasst alle Atome.

Um die Atome wirklich langsam werden zu lassen, muss eine derartige Absorption mehrfach erfolgen. Allerdings kann ein Atom, wenn es in seinem angeregten Zustand ist, kein weiteres Lichtteilchen absorbieren. Glücklicherweise verbleiben Atome nur eine zufällige, aber endliche Zeit in ihrem angeregten Zustand; danach begeben sie sich wieder in ihren Grundzustand, unter Aussendung eines Lichtteilchens in eine zufällige Richtung. Der damit verbundene Rückstoß beschleunigt die Atome wieder; da aber die Abbremsung immer in die gleiche Richtung weist, während die Beschleunigung in eine zufällige Richtung geht, setzt sich die Abbremsung durch, wobei die verbleibende zufällige Bewegung eine untere Schranke für die erreichbaren niedrigsten Geschwindigkeiten setzt. Man kann errechnen, dass diese Temperaturen dem Bereich von 100 Mikrokelvin entsprechen, was noch nicht ganz für die Bose-Einstein-Kondensation ausreicht. Aus der Beziehung zwischen Temperatur und mittlerer Geschwindigkeit können wir jedoch berechnen, dass die Atome, die sich bei Zimmertemperatur mit einer typischen Geschwindigkeit von 400 m/sec bewegen – schneller als ein Düsenflugzeug – nun ungefähr bei gemütlichen 5 cm/sec angekommen sind.

Die experimentellen Apparaturen, die man zur Umsetzung dieser ebenso einfachen wie genialen Idee benötigt, sind durchaus aufwendig, ein komplexes Zusammenspiel von Lasern und Magnetfeldern, die man nicht nur zur Kühlung, sondern auch zum Einsperren der Atome verwendet, denn auch bei ihren sehr niedrigen Geschwindigkeiten würden sich die Atome in beliebige Richtungen entfernen und müssen daher in einer Falle gefangen werden. In solchen magnetooptischen Fallen, die im Zentrum der Apparatur etliche Millimeter groß sind, kann man dann mit bloßem Auge Wolken von vielleicht 100 Millionen Atomen sehen. Schaltet man die Falle ab, so fliegen sie mit wenigen cm/sec auseinander, wie ein Sternschauer bei einem Silvesterfeuerwerk. Schnappschüsse von solch einem Auseinanderfliegen erlauben abzuschätzen, wie viele Atome sich mit welcher Geschwindigkeit bewegen, die schnellen ganz außen, die langsamen ganz innen.

Mit weiteren technologischen Durchbrüchen in der Laserkühlung von Atomen, die ich hier nicht besprechen möchte, gelang es schließlich 1995, die BEC-Temperatur zu erreichen, zuerst in Boulder, Colorado, durch Cornell, Wieman und Mitarbeiter, dann am MIT in Boston durch Ketterle und Mitarbeiter. In den ersten Experimenten wurden Übergangstemperaturen von einigen hundert Nanokelvin erreicht und sogar noch viel niedrigere Temperaturen von einigen Nanokelvin und darunter, die kältesten Temperaturen, die wir gegenwärtig kennen. Die Zahl der beteiligten Atome ist typischerweise von der Größenordnung 1 Million, was ausreicht, um die Emergenz statistischer Phänomene zu sehen.

Wie wurde die Bildung des Bose-Einstein-Kondensats beobachtet? Es sitzt in einer kleinen Falle und es ist nicht möglich, direkt zu sagen, welche Atome sich im niedrigsten, dem Bose-Kondensat-Zustand befinden und welche in einem energetisch höheren Zustand. Hier hilft ein Trick. Der Zustand niedrigster Energie, in dem die Bosonen kondensieren, hat Impuls bzw. Geschwindigkeit null, alle anderen Zustände haben endliche Geschwindigkeit. Schalten wir also die Falle ab, werden die Atome im niedrigsten Zustand verharren, die anderen sich ausbreiten. Abbildungen nach einer kurzen Zeit zeigen uns damit den Anteil der Atome im niedrigsten Zustand. Stellt man die Zahl der Atome auf einer bestimmten Position in der zweidimensionalen Abbildung bei jeweils unterschiedlichen Temperaturen oberhalb, bei oder unterhalb der kritischen Temperatur von ein paar hundert Nanokelvin dar, so entstehen die in den letzten Jahren schon fast ikonisch gewordenen Bilder von der herausstechenden Bose-Einstein-Spitze (Abb. 8).

Obwohl diese Experimente in exzellenter Übereinstimmung mit jahrzehntealten theoretischen Voraussagen sind, wäre es ein noch schlagenderer Beweis für die Existenz des Kondensats, wenn Eigenschaften beobachtet würden, die zeigen, dass es sich in der Tat um einen makroskopischen Quantenzustand, eine (nach atomaren Maßstäben) gigantische Welle handelt.

Ein typischer Welleneffekt, den man aus der Badewanne kennt, ist die Interferenz von Wellen. In der Tat kann man bei der Kollision zweier Kondensate ein sehr klares konstruktives und destruktives Interferenzbild sehen (Abb. 9). Eine genauere Analyse der Abbildung zeigt, dass die Längenskala der Interferenz nur ein wenig kleiner als 0,1 Millimeter ist, der Dicke eines menschlichen Haars, das wir problemlos mit bloßem Auge sehen können. In „normaler“ Quantenphysik sind die typischen Größenordnungen Nanometer oder kleiner, wir haben also einen Sprung um etwa sechs Größenordnungen geschafft und Quantenmechanik zum Anschauen erhalten.

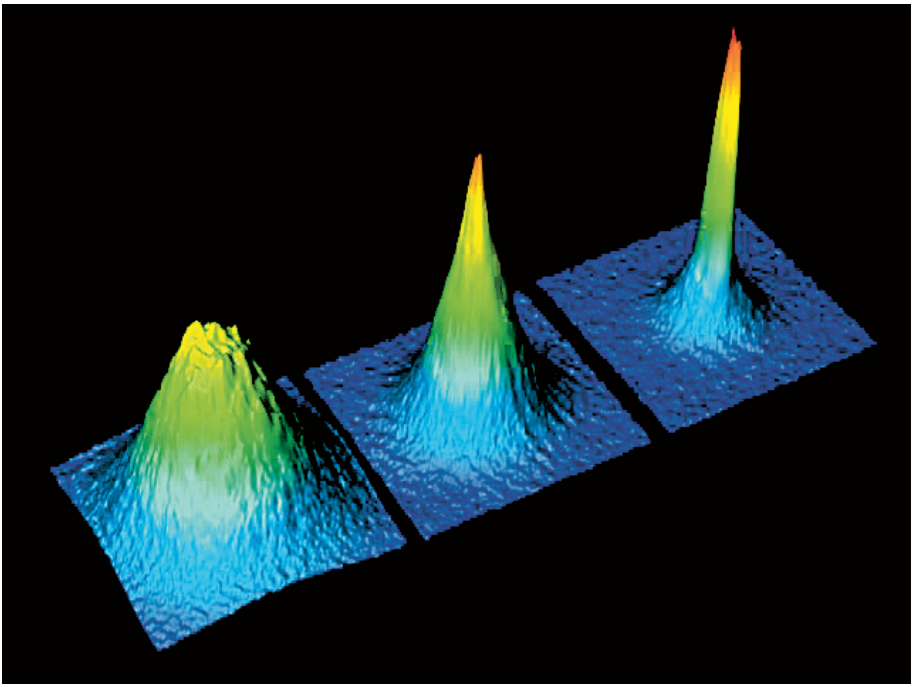

Abb. 8: Geschwindigkeits- bzw. Impulsverteilung der ultrakalten Atomgase (von links) oberhalb, bei und unterhalb der kritischen Temperatur. Die scharfe Spitze signalisiert die Anwesenheit des Bose-Einstein-Kondensats (T. Esslinger, ETH Zürich, http://www.quantumoptics.ethz.ch).

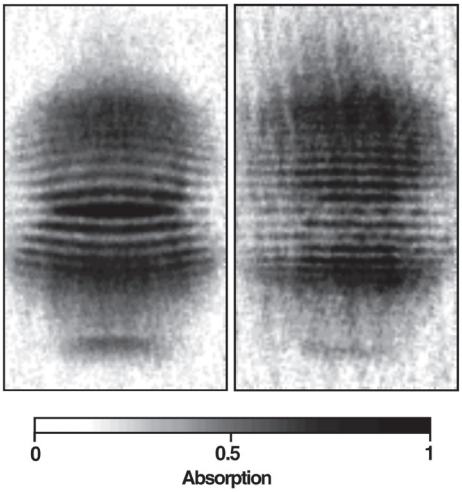

Abb. 9: Interferenzmuster zweier sich durchdringender Bose-Einstein-Kondensate als Nachweis der wellenartigen Natur der makroskopischen Materiewelle. Die Interferenzstreifen sind nur wenig dünner als ein menschliches Haar, das man noch mit bloßem Auge sehen kann (M. R. Andrews, C. G. Townsend, H.-J. Miesner, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle. „Observation of interference between two Bose condensates." *Science* 275 (1997): 637–641.).

Ein vielleicht noch überraschenderer Effekt wird erzielt, wenn man ein Kondensat in einer Falle rotiert – zunächst bedeutet das einfach, dass sich die Atome in Bewegung setzen. In der Quantenphysik hängt die Bewegung aber direkt mit der räumlichen Änderung der Phase der Welle zusammen, also wie rasch Berge und Täler in der großen Kondensatwelle aufeinander folgen. Es gibt aber ein mathematisches Theorem, das zeigt, dass die Rotation mit der Beziehung zwischen Bewegung und Phase nicht in Einklang zu bringen ist, außer es gibt ein Loch im Kondensat (einen Wirbel). Das ist jedoch genau, was passiert: Um rotieren zu können, erzeugt das Kondensat Löcher, um so mehr, je schneller die Rotation ist; die Löcher ordnen sich zu einem Dreiecksgitter an, wie es schon vor mehr als fünfzig Jahren von Abrikosov in einer Nobelpreisarbeit vorausgesagt wurde (Abb. 10).

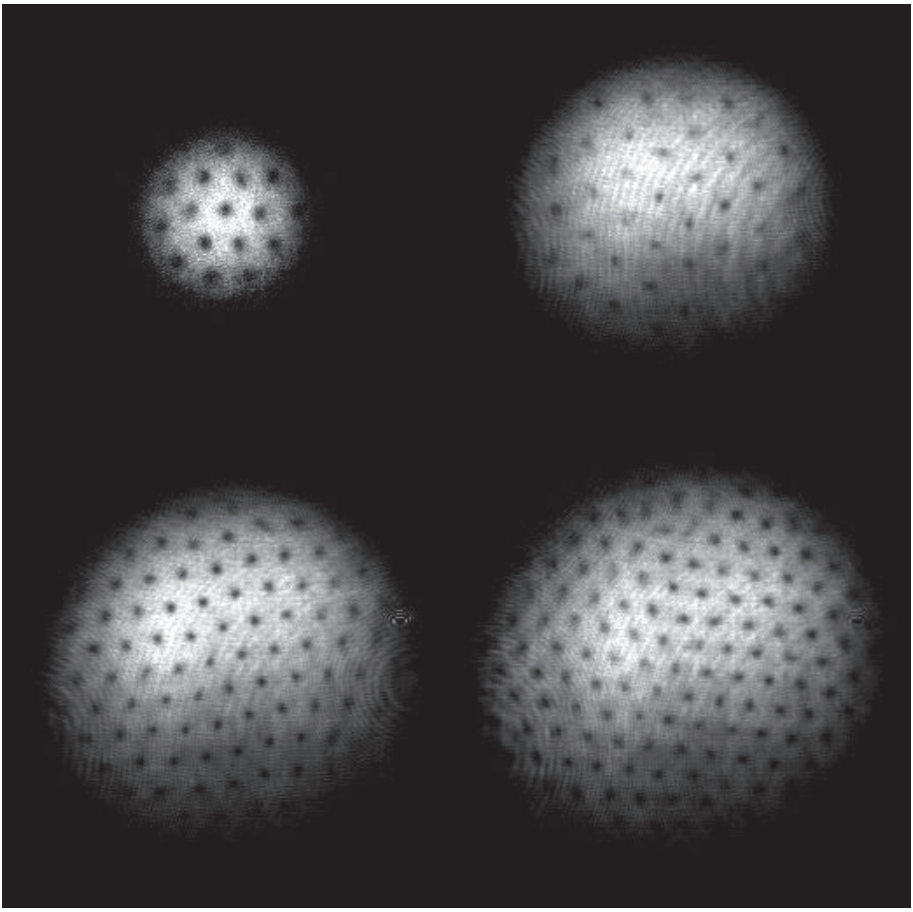

Abb. 10: Dreiecksgitter aus Löchern (Wirbeln) in einem rotierenden Bose-Einstein-Kondensat (J. R. Abo-Shaeer, C. Raman, J. M. Vogels, and W. Ketterle. „Observation of Vortex Lattices in Bose-Einstein Condensates." *Science* 292, (2001): 476–479.).

Das alles mag faszinierend, vielleicht sogar ästhetisch ansprechend sein, aber hat diese Physik am Kältepol des Universums irgendeinen Bezug zur realen Welt? In der Tat ist dies in recht unerwarteter Weise der Fall.

Machen wir einen scheinbar großen Sprung weg von ultrakalten Atomen in die Welt der Festkörper. Diese sind deshalb für Physiker unter anderem deswegen so interessant, weil sie die Grundlage zahlloser Anwendungen bilden, zum Beispiel der gesamten modernen Informationstechnologie, und gleichzeitig einen enormen Reichtum an physikalischen Phänomenen aufweisen. Etwa die Hälfte aller Physiker auf der Welt arbeiten in diesem Gebiet.

Wir würden zum Beispiel gerne die elektronischen und magnetischen Eigenschaften von Magnetit verstehen, dem berühmten Magnetstein der alten Griechen. Dafür haben Physiker ein Rezept: Man muss die Schrödinger-Gleichung $H\psi = E\psi$ lösen, um die Wellenfunktion ψ zu erhalten, die eine vollständige Beschreibung des Systems darstellt. Alle unangenehmen Details des Rezepts sind im Ausdruck H versteckt, der zwar sehr kompliziert aussieht, aber letztlich nur die Summe aller im System steckenden Energien ist. Man könnte auch sagen, er ist eine Liste aller Dinge, die Elektronen tun; sie bewegen sich, haben daher Bewegungsenergie; sie sind gleich geladen und stoßen sich daher ab, was ihnen Wechselwirkungsenergie gibt, und sie spüren den Einfluss des Kristallgitters, in dem sie sich bewegen. Diese drei Beiträge decken bereits einen enormen Bereich der Physik ab, von Metallen über Halbleiter hin zu Magneten. Leider kann niemand diese Gleichung für allgemeine Vielteilchenprobleme exakt lösen – obwohl sie im Prinzip alle Antworten enthält, können wir sie nicht aus ihr hervorlocken. In den letzten achtzig Jahren haben Physiker zahlreiche Näherungsverfahren entwickelt, die oft funktionieren und unglaubliche Fortschritte in der Beschreibung von Festkörpern und Geräten erlaubt haben, wie zum Beispiel Mobiltelefonen und Computern. Manchmal versagen diese Näherungsverfahren jedoch völlig – was tun?

Ein dann gewählter Zugang ist oft die Entwicklung physikalischer Modelle. Modelle sind vereinfachte Beschreibungen, so einfach wie möglich, aber nicht einfacher, in den Worten von Einstein. Was wir suchen, sind Karikaturen der Welt, die bei aller Verzerrung noch die Antworten auf die Fragen enthalten, die uns interessieren und sich in der Regel nicht mit den kleinsten Details befassen.

Unsere Karikatur eines Festkörpers stellt sich wie folgt dar: Wir benötigen ein Kristallgitter, eine sich periodisch wiederholende Struktur. Dies nähern wir durch eine Anord-

nung an, bei der Elektronen nur an bestimmten Plätzen in periodischem Abstand sitzen können, die wir Gitterplätze nennen.

Aufgrund ihrer kinetischen Energie bewegen sich die Elektronen frei durch das Gitter, in unserer Näherung hüpfen sie von einem Gitterplatz zu einem anderen. Es ist nicht sehr wahrscheinlich, dass sie sehr weit hüpfen: Wir beschränken uns daher auf Hüpfprozesse zwischen benachbarten Gitterplätzen. Das ist unsere Karikatur der Bewegungsenergie.

Gleichzeitig stoßen sich die Elektronen elektrostatisch ab. Die Kraft fällt mit dem Quadrat des Abstands ab, ist daher für weiter voneinander entfernte Elektronen vernachlässigbar. Für unsere Karikatur gehen wir so weit wie möglich und vernachlässigen die Abstoßung für alle Elektronen, außer sie sitzen auf dem gleichen Gitterplatz – das ist die gröbste denkbare Näherung.

Das resultierende Modell, das auf den britischen Physiker Hubbard und das Jahr 1964 zurückgeht, ist das minimale Modell, das noch Bewegung und Wechselwirkung enthält, weshalb es seit mehr als vier Jahrzehnten ein Hauptthema der Festkörperphysik ist. Leider können auch die Eigenschaften dieses sehr einfachen Modells von ein paar Spezialfällen abgesehen nicht exakt berechnet werden. Wir verfügen lediglich über mehr oder weniger überzeugende Näherungen. Darüber hinaus würden wir gerne verstehen, wie gut es wirklich die „reale Welt“ beschreibt; viele Physiker glauben beispielsweise, dass dieses Modell die Hochtemperatur-Supraleitung erklären sollte, ein spektakuläres Phänomen, das nach 25 Jahren immer noch auf seine Erklärung wartet.

Naturgemäß denken wir an große Computer, um diese Probleme zu lösen, aber die große Hürde besteht darin, dass unsere Computer der klassischen Physik gehorchen (sie sind nichts anderes als gigantische Ansammlungen von An-/Ausschaltern) und damit unendlich weniger komplex sind als wahre Quantensysteme, in denen auch Überlagerungen von „an“ und „aus“ erlaubt sind, was einem klassischen Schalter nicht möglich ist; Computer sind daher nicht ohne weiteres in der Lage, nichttriviale Quantensysteme zu simulieren. 1982 hat Richard Feynman daher vorgeschlagen, stattdessen Quantensysteme, die man sehr gut kontrollieren kann, zu verwenden, um andere, die man nicht beherrscht, zu simulieren; die kontrollierten Quantensysteme wären dann eine Art Quantensimulator oder Analog-Quantencomputer. Das ist leichter gesagt als getan – vielleicht sind ultrakalte Atomgase die ersten Vielteilchensysteme, mit denen man diesen Vorschlag umsetzen kann.

Ein eleganter Vorschlag, ultrakalte Atomgase als Quantensimulatoren zu nutzen, wurde 1998 in Innsbruck von Peter Zoller und Mitarbeitern unterbreitet, die die Ausnutzung optischer Gitter vorschlugen (Abb. 11): Mittels sich in entgegengesetzter Richtung ausbrei-

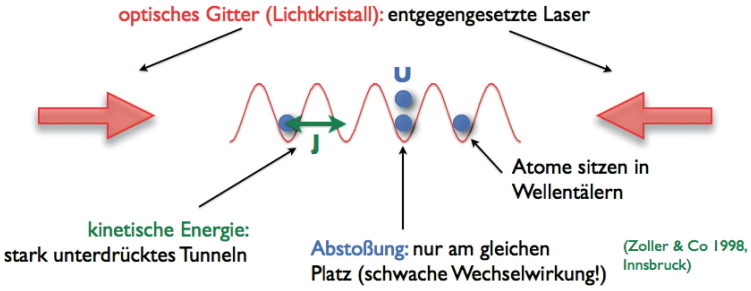

Abb. 11: Aufbau eines Minimalmodells eines Festkörpers durch ultrakalte Atome in einem optischen Gitter. Die Atome simulieren dabei Elektronen (D. Jaksch, C. Bruder, J. I. Cirac, C. W. Gardiner, and P. Zoller. „Cold bosonic atoms in optical lattices." *Phys. Rev. Lett.* 81, 1975 (1999).).

tender Laserstrahlen kann man eine stehende Lichtwelle erzeugen, die als ein Lichtkristall dient, bei dem die Atome an wohlbestimmten Gitterplätzen sitzen. Sitzen sie an verschiedenen Gitterplätzen, nehmen sie einander nicht wahr; sitzen sie am gleichen Gitterplatz, so stoßen sie einander ab, mit einer Wechselwirkungsenergie *U*. Zugleich können sie quantenmechanisch durch die vom Lichtkristall erzeugten Energiebarrieren zu benachbarten Gitterplätzen durchtunneln, wodurch sie eine Bewegungsenergie *J* erhalten. Damit sind sie eine perfekte Inkarnation unserer Karikatur!

Es gibt aber noch eine wunderbare Zugabe: Ultrakalte Atome sind beinahe wechselwirkungsfrei, außer auf extrem kurzen Abständen, so dass der Energiebeitrag der Wechselwirkung nur sehr klein ist. Dies ist perfekt, um Bose-Einstein-Kondensation zu studieren, wo Wechselwirkungen lediglich ein rein statistisches Phänomen maskieren würden, hilft aber nicht, mehr über Festkörper zu erfahren, bei denen Wechselwirkungen stark sind. Der Vorschlag, optische Gitter zu verwenden, löst dieses Problem ganz nebenbei. Der entscheidende Punkt ist, dass die Bewegung der Atome durch sie stark unterdrückt wird, weil sie durch eine hohe Energiebarriere hindurchmüssen, um zum nächsten Platz zu gelangen. Dadurch wird die Bewegungsenergie stark unterdrückt, und obwohl die Wechselwirkung absolut gesehen nicht stärker geworden ist, kann sie nun im alles entscheidenden Vergleich zur Bewegungsenergie sehr stark sein! Letztlich haben wir also ein System mit ansehn-

lichen Wechselwirkungsstärken, die ganz einfach durch eine Verstärkung oder Abschwächung des Lichtkristalls durchgestimmt werden können.

Warum sind Physiker von diesem Quantensimulator begeistert, von der Hoffnung auf Antworten abgesehen? Experimentell handelt es sich um ein sehr attraktives System: Der optische Aufbau ist sehr rein, im Gegensatz zu Festkörpern mit Kristallstörungen und Verunreinigungsatomen. Die Details des Aufbaus können mit hoher Genauigkeit ausgerechnet werden, was im Festkörper sehr schwer ist. Ferner ist er, wie schon gesagt, durchstimmbar: Im Vergleich zu Festkörpern ist es sehr einfach, die Wechselwirkungsparameter über mehrere Größenordnungen zu variieren – man muss lediglich die Laserintensität variieren.

Da die Energieskalen sehr klein sind, laufen quantenmechanische Prozesse sehr langsam ab, weil in der Quantenmechanik Zeitskalen das Inverse der Energieskalen sind: Während sie im Festkörper von der Größenordnung 10^{-13} Sekunden sein können, sind sie nun auf der Größenordnung von Millisekunden. Das ist ziemlich langsam, und bedeutet, dass wir Parameter experimentell auf Zeitskalen ändern können, die nicht nur (noch) langsamer, sondern – was interessanter ist – deutlich kürzer sind. Dadurch erhält man Zugang zu einem großen Reichtum von physikalischen Problemen, zum Beispiel dem „Quenching", bei dem ein Quantensystem abrupt und drastisch aus seinem Gleichgewichtszustand entfernt wird.

Darüber hinaus kann man viele Manipulationen vornehmen, die in einem Festkörper undenkbar sind und zu neuen Materiezuständen führen. Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden; hier setzt uns nur unsere Phantasie die Grenzen.

Kehren wir zu einem (emergenten) Alltagsphänomen zurück, den Phasenübergängen: Wasser gefriert bei Abkühlung, Eis taut bei Erwärmung, und die Wassermoleküle befinden sich jeweils in einem ganz anderen Zustand.

Das grundlegende Experiment, das gezeigt hat, dass ein Quantensimulator sinnvoll sein kann, und das vormals völlig getrennte Gebiete der Physik zusammengebracht hat, wurde 2002 an der Universität München von Immanuel Bloch, Tilmann Esslinger und Mitarbeitern in der Gruppe von Ted Hänsch ausgeführt. Seine Wirkung mag man daran erkennen, dass es die meistzitierte physikalische Veröffentlichung des Jahrzehnts ist.

Es greift die Idee eines Phasenübergangs auf, aber in sehr spezieller Weise. Im Experiment wurde, wie in Innsbruck vorgeschlagen, ein optisches Gitter aufgebaut und mit Bosonen in einem Kondensat-Zustand gefüllt. Danach wurde die effektive Wechselwirkungsstärke langsam von sehr schwach zu sehr stark durch Variation des optischen Gitters

durchgestimmt. Das langsame Durchstimmen stellt sicher, dass die Atome ausgehend vom Kondensat im energetisch niedrigsten Zustand verbleiben. Experimentell wurde die Geschwindigkeitsverteilung (genauer: Impulsverteilung) der Atome bei anwachsender Wechselwirkungsstärke gemessen. Zu Beginn verblieben alle Atome bei Geschwindigkeit null, wie für das Kondensat erwartet. Bei anwachsender Gittertiefe tauchten weitere Maxima in der Geschwindigkeitsverteilung auf, die typisch für ausgedehnte Wellen in einem Gitter sind. Ihre Intensität nimmt zu, bis sie plötzlich recht überraschend verschwinden und nur eine diffuse Geschwindigkeitsverteilung übrig bleibt (Abb. 12). Was ist passiert?

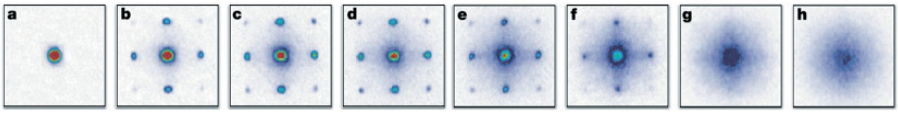

Abb. 12: Geschwindigkeits-(Impuls-)verteilung ultrakalter Atomgase im optischen Gitter bei zunehmender Wechselwirkungsstärke: Der ursprüngliche Kondensatpeak und die sich darauf entwickelnde Struktur wird beim Übergang in den Mott-Isolator durch ein diffuses Bild ersetzt (M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T. W. Hänsch und I. Bloch. „Quantum Phase Transition from a Superfluid to a Mott Insulator in a Gas of Ultracold Atoms." *Nature* 415 (2002): 39–44).

Bei schwacher Wechselwirkung bilden die Teilchen im Wesentlichen weiterhin eine gigantische Materiewelle, die kohärent über das ganze Gitter delokalisiert ist, eine sogenanntes Superfluid. Wird die Wechselwirkung stärker (das Gitter ausgeprägter), können wir uns vorstellen, dass die Atome stärker lokalisiert werden, weil die Hüpfvorgänge unterdrückt werden. Stellen wir uns die experimentell relevante Situation vor, dass sich im Mittel ein Atom pro Gitterplatz befindet. Setzen wir genau ein Atom auf jeden Gitterplatz, so würde Delokalisierung bedeuten, ein Atom auf den benachbarten Platz zu setzen, auf dem sich dann zwei Atome befänden. Aufgrund ihrer abstoßenden Wechselwirkung kostet das jedoch einen hohen energetischen Preis. Wechselwirkung friert daher die Atome, von kleinen Fluktuationen abgesehen, ein, das System wandelt sich in einen sogenannten Mott-Isolator (benannt nach Sir Neville Mott), und durchläuft dabei einen Quantenphasenübergang, „Quanten", weil der Übergang nicht durch eine Temperaturänderung ausgelöst wird; wir sind effektiv am Temperaturnullpunkt. Ein kontrollierter Quantenphasenüber-

gang in einem wechselwirkenden System war 2002 ein definitives Novum, sowie der erste Nachweis, dass ultrakalte Atome dazu dienen könnten, komplexe kollektive Quantenphänomene zu simulieren und ein vollständig neues Gebiet der Physik zu eröffnen.

Die Quantennatur des Vielteilchensystems wird aber in der folgenden Variante des Experiments noch offensichtlicher: Ausgehend von einem schwach wechselwirkenden superfluiden Zustand wird die Wechselwirkung wieder stark gemacht, aber nun quasi instantan. Das ist einfach, da die typische quantenmechanische Zeitskala im Bereich von Millisekunden liegt; die Laserintensität kann in Mikrosekunden variiert werden.

Wie reagiert das System? Betrachten wir wieder die Geschwindigkeitsverteilung, so verschwinden zunächst die für das Superfluid im Gitter typischen Spitzen, und das für den Mott-Isolator charakteristische diffuse Bild erscheint, wie man es bei einer starken Wechselwirkung naiv erwarten würde. Aber dann taucht das alte Muster wieder auf! (Abb. 13) Diese Abfolge von Zusammenbruch und Wiedererstehung kann man etwa fünfmal hintereinander beobachten und als Film darstellen, um einen Faktor 100 verlangsamt. Es ist eigentlich unglaublich, ein so langsames Quantenphänomen zu haben, dass man seinen Herzschlag unter einer Verlangsamung von lediglich zwei Größenordnungen mit dem bloßen Auge beobachten kann.

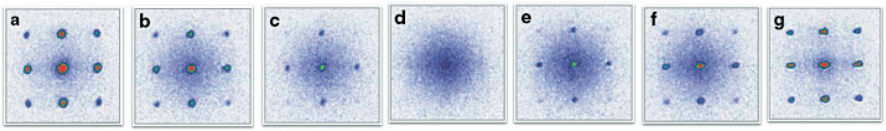

Abb. 13: Zeitliche Entwicklung einer Wellenfunktion: Bei plötzlicher Erhöhung der Wechselwirkungsstärke geraten die Komponenten der quantenmechanischen Wellenfunktion außer Phase (Bild d), um nach einer gewissen Zeit für einen Moment wieder in Phase zu gehen (Bild g): Die ursprüngliche Wellenfunktion ist nach einem Kollaps wieder aufgelebt (M. Greiner, O. Mandel, T. W. Hänsch und I. Bloch. „Collapse and revival of the matter wavefield of a Bose-Einstein condensate." *Nature* 419 (2002): 51–54.).

Die Erklärung für dieses Phänomen ist letztlich recht einfach. Die quantale Wellenfunktion kann man sich als Überlagerung einer großen Zahl von Wellen vorstellen, so wie die Schallwelle eines Symphonieorchesters sich aus der Überlagerung der Schallwellen der individuellen Instrumente zusammensetzt. Die Quantenmechanik lehrt uns, dass nach

dem plötzlichen Ändern der Systemparameter diese Wellen nun mit unterschiedlichen Frequenzen zu oszillieren beginnen und damit aus dem Takt geraten: Ein dekohärentes Signal (der Zusammenbruch) erscheint. In diesem Experiment geraten sie aber in einer ganz speziellen Weise außer Takt, so dass sie nach einer gewissen Zeit für einen kurzen Moment wieder alle im Takt sind (die Wiedererstehung). Man stelle sich zwei Musiker vor, die in einem permanenten da capo die gleiche Melodie spielen; spielt einer doppelt so schnell wie der andere, treffen sie nach zwei Wiederholungen durch den schnellen und eine durch den langsamen wieder auf der gleichen Note aufeinander!

Zum Abschluss möchte ich einen Blick auf ein sehr aktuelles Forschungsthema werfen, das ich mit meinem Mit-Fellow Jens Eisert in diesem Jahr am Wissenschaftskolleg verfolgt habe. In den letzten Jahren ist es den Experimentatoren gelungen, immer komplexere Lichtkristalle bzw. optische Gitter zu bauen, wie zum Beispiel ein „Übergitter", bei dem sich zwei stehende Wellen unterschiedlicher Wellenlänge überlagern. Das Ergebnis ist eine Struktur von Doppelmulden, die durch Verschieben der zwei Gitter drastisch geändert werden kann. Diese Umformungen erlauben die Präparation von Mustern von Atomen, man kann sie zum Beispiel von der linken Position in einer Doppelmulde auf die rechte verschieben, und experimentell unterscheiden, ob sie links oder rechts sitzen.

Äquilibrationsprozesse (man denke an den Tintentropfen) sind Teil des Alltags, und in der Quantenphysik kann man fragen, wie diese Prozesse auf mikroskopischer Skala ablaufen, was für ein Gleichgewicht sich einstellt, und dergleichen mehr. Ein Vorschlag von Jens Eisert und mir war es, diese Übergitter als Simulatoren zu verwenden, bei denen man sehr spezielle Muster vorbereitet, die nicht im Gleichgewicht sind, und zu beobachten, wie diese Gleichgewichtsbildung stattfindet. Was diese Systeme besonders macht, ist die Anwesenheit einer starken Wechselwirkung sowie die beinahe perfekte Abwesenheit von Reibung (Dissipation), die normalerweise einen starken, aber störenden Mechanismus für Äquilibration darstellt.

2008 haben wir vorgeschlagen, einen Übergitterzustand zu präparieren, bei dem sich genau ein Atom auf jedem zweiten Gitterplatz befindet (Abb. 14). Wir sprechen dabei von Hunderttausenden von Atomen, und wir wollen jede einzelne Position kontrollieren – aber das ist jetzt möglich! Schaltet man nun das zweite Gitter ab, so befinden sich die Atome in einem Nichtgleichgewichtszustand: Sie können sich frei herumbewegen und der Gleichgewichtszustand wäre definitiv einer, bei dem alle Plätze gleich wahrscheinlich besetzt werden (also mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent). Da die Experimentatoren zwischen linken und rechten Gitterplätzen unterscheiden können, können wir Aspekte dieses

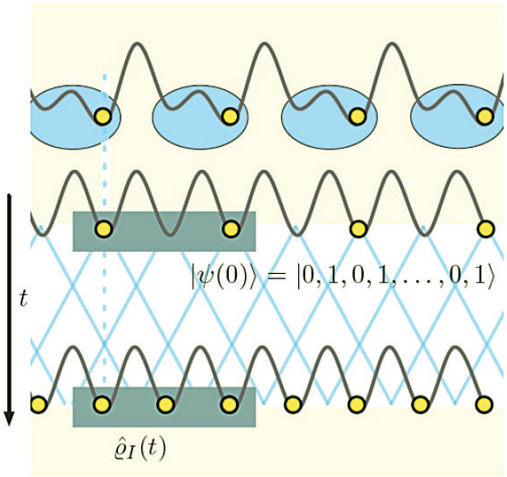

Abb. 14: Vorschlag eines Relaxationsexperiments: Ein atomares Muster mit einem Atom auf jedem zweiten Gitterplatz entwickelt sich in der Zeit, wobei sich das Muster auflöst und quantenmechanische Korrelationen aufbauen (M. Cramer, A. Flesch, I. McCulloch, U. Schollwöck und J. Eisert. „Exploring local quantum many-body relaxation by atoms in optical superlattices." *Phys. Rev. Lett.* 101, 063001 (2008).).

Relaxationsprozesses beobachten. Immanuel Bloch und einer seiner Doktoranden, Stefan Trotzky, haben diesen Vorschlag nun in einem realen Experiment umgesetzt, dem ersten seiner Art.

In Abbildung 15 sieht man die Ergebnisse der ersten Messungen, bei denen etwa 60.000 Atome aus dem speziellen Ausgangszustand bei recht starker Wechselwirkung (etwa dem fünffachen der kinetischen Energie) relaxieren. Alle starten in den rechten Positionen, bewegen sich nach links und oszillieren hin und her, bis sich die Dichte bei 0.5 Atomen pro Gitterplatz einpendelt.

Wir haben diese experimentellen Resultate mit unseren quantenmechanischen Voraussagen verglichen, um den Quantensimulator zu eichen, d. h. zu zeigen, dass er in der Tat die gesuchten physikalischen Phänomene simuliert und Information zuverlässig ausgelesen werden kann. Die unschuldig daherkommende oszillierende Kurve ist dabei sehr schwer berechenbar, und wir haben erst seit 2004 eine Methode, diese Art von Rechnungen durch-

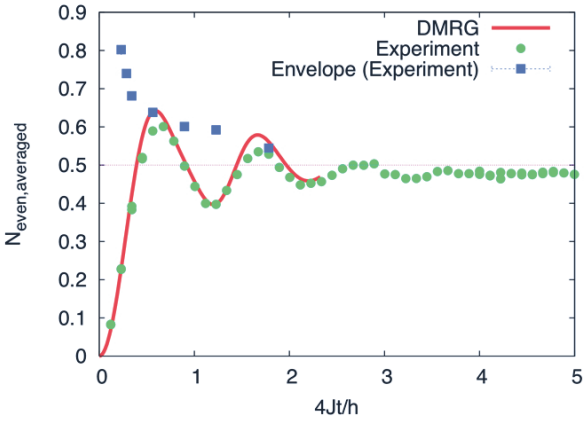

Abb. 15: Sich in Abhängigkeit von der Zeit (x-Achse) in den Gleichgewichtszustand einschwingende Teilchendichte im stark wechselwirkenden Relaxationsexperiment; Theorie („DMRG“) und Experiment stimmen trotz des sehr komplexen quantenmechanischen Prozesses ohne Anpassungsparameter exzellent überein (S. Trotzky, Y.-A. Chen, I. McCulloch, U. Schollwöck, J. Eisert und I. Bloch. “Probing the relaxation towards equilibrium in an isolated strongly correlated 1D Bose gas”, arXiV:1101.2659).

zuführen, die mittlerweile weit über hundert Anwendungen in der Quantenphysik gefunden hat. Man sieht eine nahezu perfekte Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment ohne – und das ist sehr wichtig – „Anpassungsparameter“; das bedeutet, dass wir vollständige Kontrolle über die Nichtgleichgewichtsdynamik und den Relaxationsprozess erlangt haben. Gleichzeitig konnten wir zeigen, dass die einfach aussehende Dynamik hochgradig nicht-trivial ist: Alteingeführte Näherungen, dass das System seine Vergangenheit vergisst oder dass man den Vielteilchenaspekt vernachlässigt, versagen vollständig.

Einige Kollegen waren trotzdem der Ansicht, dass die Relaxation vor allem auf Störungen von außen zurückzuführen sein könnte. Wir haben aber ebenfalls vorausgesagt, dass die Atome während der Relaxation ein kompliziertes Ballett korrelierter Bewegung aufbauen sollten – Abbildung 16 zeigt, dass ein bestimmter Grad an Korrelation zwischen Nachbarn, der sehr stark von der Wechselwirkungsstärke abhängt, auf langen Zeitskalen

überlebt. Das Experiment zeigt nun eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment für diese Korrelationen, die durch Störungen rasch zerstört würden; dies ist ein sehr starker Beweis für die Validität des Experiments und ein erster Einblick in die Korrelationsphysik des Nichtgleichgewichts. Dies sind allerdings nur die ersten Schritte, die man mit einem solchen Simulator unternehmen kann!

So haben wir das Ende eines langen Wegs erreicht: Ultrakalte Atome, die kältesten Objekte des Universums, erlauben die kontrollierte Untersuchung und Visualisierung kollektiver Quantenphänomene. Atome und Lichtkristalle stellen Quantensimulatoren der materiellen Welt (der Festkörper) dar, und geben uns Einblicke in kollektive Quantendynamik, wie den Zusammenbruch und die Wiedererstehung von Quantenwellen. Erste Einsichten in die Details emergenter Quantenphänomene liegen vor. Der Pfad ist steil, aber die Wunder der Emergenz versprechen uns auch in Zukunft zahlreiche spannende Phänomene, die es zu entdecken und zu verstehen gilt.

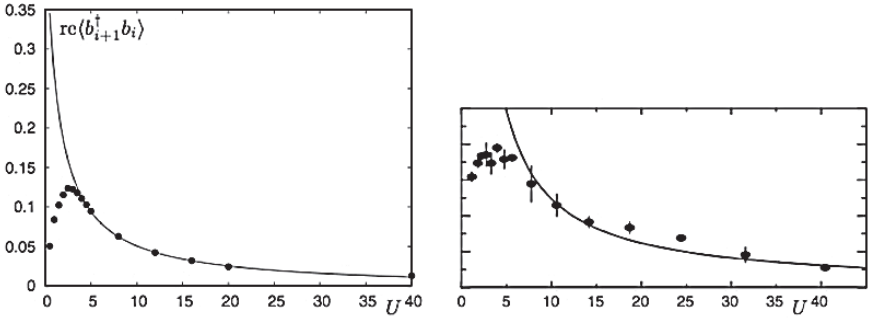

Abb. 16: Theoretische Vorhersage (links) und experimentelle Messung (rechts) für die im Grenzfall langer Zeiten entstehenden Quantenkorrelationen zwischen Teilchen auf benachbarten Plätzen in Abhängigkeit von der Wechselwirkungsstärke U (x-Achse). (A. Flesch, M. Cramer, I. McCulloch, U. Schollwöck und J. Eisert, „Probing local relaxation of cold atoms in optical superlattices." *Physical Review A* 78, 033608 (2008); S. Trotzky, Y.-A. Chen, I. McCulloch, U. Schollwöck, J. Eisert und I. Bloch. "Probing the relaxation towards equilibrium in an isolated strongly correlated 1D Bose gas", arXiV:1101.2659).