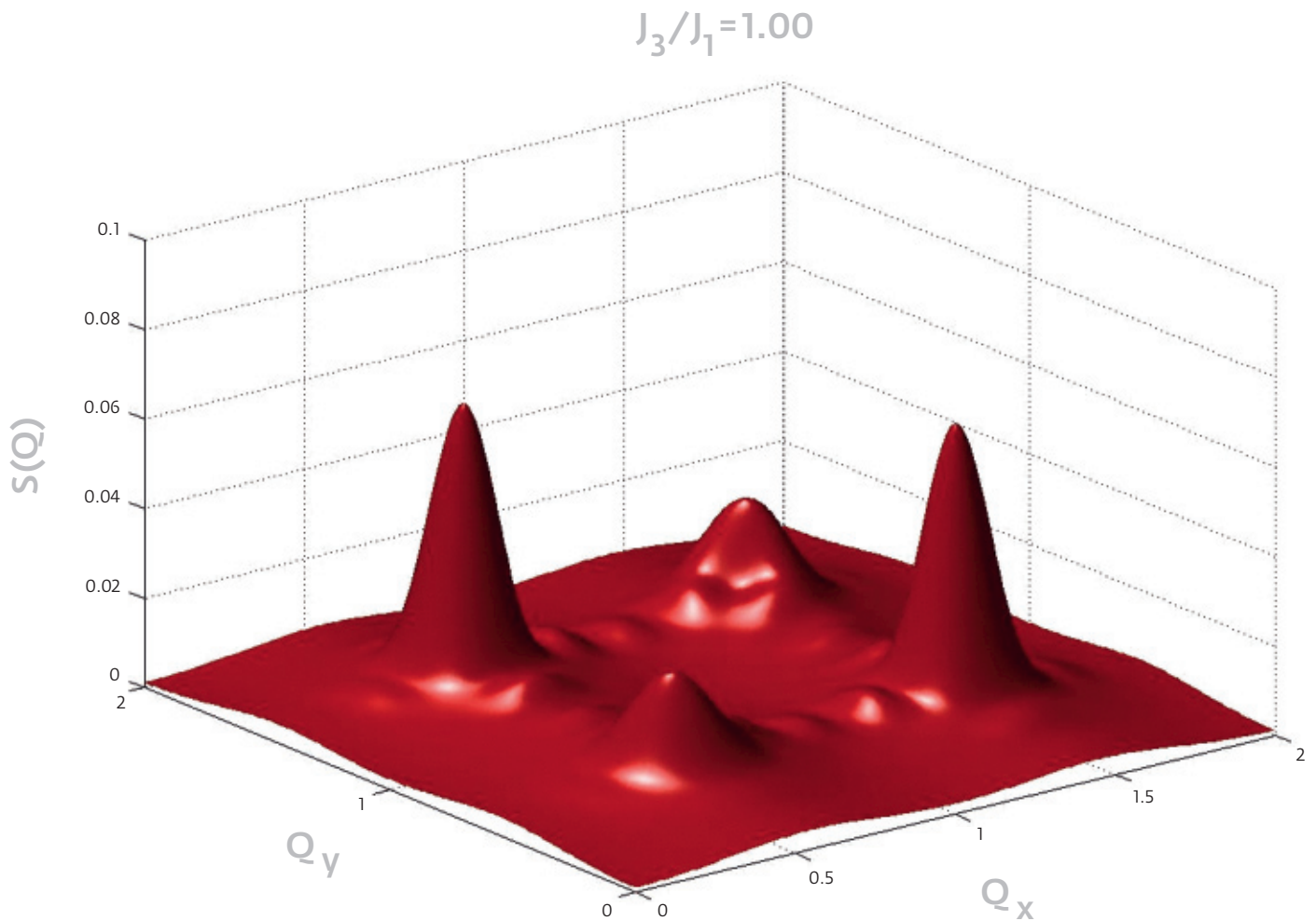


# Die Zähmung der Quantengeister

Viele Aspekte der Quantenphysik sind rätselhaft und geheimnisvoll: Teilchen können gleichzeitig an zwei Orten sein und Eigenschaften vereinen, die sich gegenseitig ausschließen. **Ignacio Cirac**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Quantenoptik** in Garching, entwickelt Ideen, um mit den mysteriösen Quantenphänomenen Information zu verarbeiten.

TEXT **BRIGITTE RÖTHLEIN**



Eine Theorie für schwierige magnetische Fälle: Mitarbeiter von Ignacio Cirac berechnen, wie die magnetischen Momente der Elektronen (Spins) wechselwirken, wenn sich die Nord- und Südpole dieser winzigen Magnete nicht immer ausweichen können. Die Höhe der Spitzen gibt die Stärke der Wechselwirkung wieder. Aus der Symmetrie der Grafik lesen sie die magnetische Ordnung ab.

**D**ie gelben Ledersessel im Arbeitszimmer von Ignacio Cirac verströmen selbst dann noch einen Hauch spanischer Sonne, wenn draußen dunkle Wolken den Himmel verhängen und Regen das Gefühl von Sommer verwässert. Hier im Max-Planck-Institut für Quantenoptik auf dem Garching Forschungscampus denkt der in Spanien geborene Theoretiker über die Probleme der Quantenphysik nach.

„Von Anfang an hatte die Quantenmechanik einen rätselhaften Teil“, schildert der 44-jährige Institutsdirektor und Physikprofessor die Situation: „Wissenschaftler wie Einstein, Bohr und andere betrachteten diesen Aspekt wie ein kurioses Spiel, wie etwas, was eigentlich gar nicht wahr ist.“ Neuerdings denken Physiker mehr über diesen geheimnisvollen Teil der Quantenphysik nach, und die heutige Technik erlaubt es ihnen auch, Experimente dazu zu machen. „So kann man nun diese Geheimnisse auf den Prüfstand stellen, all diese seltsamen Effekte der Natur“, sagt Cirac.

Für den Normalbürger mit gesundem Menschenverstand klingen die Vorgänge in der Quantenwelt – also der Welt des Allerkleinsten – ohnehin eher nach Märchen: Teilchen, die sich in Wellen verwandeln und umgekehrt; Partikel, deren Ort und Geschwindigkeit man nicht gleichzeitig messen kann; Energie, die nur in Päckchenform auftritt. Physiker nennen diese Phänomene Dualität, Unschärferelation, Quantisierung.

### TEILCHEN VERSTÄNDIGEN SICH SCHEINBAR TELEPATHISCH

Das alles sind keine Märchen, sondern die Grundlagen unserer modernen Welt. Ohne diese erstaunlichen Phänomene gäbe es heute keinen Computer, keinen Laser, keine Kernspintomografie, ja nicht einmal einen gewöhnlichen Fernseher. Das, was dem gesunden Menschenverstand so unerklärlich und rätselhaft erscheint, hat seine Existenz inzwischen millionenfach in der Praxis bewiesen.

Immer noch gibt es aber diesen rätselhaften Teil der Quantenmechanik: Teilchen, die sich anscheinend per Telepathie verständigen. Hypothetische Katzen, die gleichzeitig tot und lebendig sind (siehe Kasten „Eine Katze in der Kiste“). Oder kalte Materie, die sich entgegen allen bekannten Naturgesetzen verhält. Auch hierfür gibt es wissenschaftliche Namen, aber sie blieben bisher reine Beschreibungen: Verschränkung, Überlagerung von Zuständen, Supraleitung, Superfluidität. Man kennt zwar manche Regeln für diese Phänomene, aber wie sie zustande kommen und welche Theorie ihnen zugrunde liegt, weiß man bisher in vielen Fällen noch nicht genau.

Vor gut 15 Jahren änderten einige Forscher ihre Perspektive und sahen die Geheimnisse als Herausforderungen an. Zu ihnen gehört auch Cirac. „Wir sagten nun: Es gibt eine Natur, die sich auf sehr seltsame Weise verhält. Das fordert nicht nur unser philosophisches Denken heraus, sondern wir können die Phänomene auch für etwas nutzen.“ Für

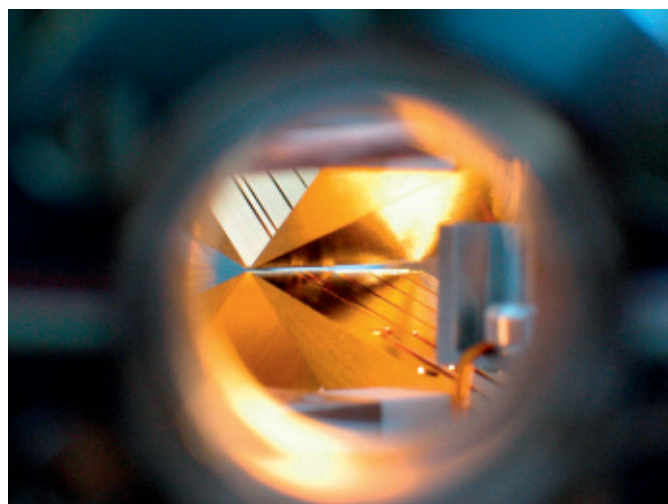
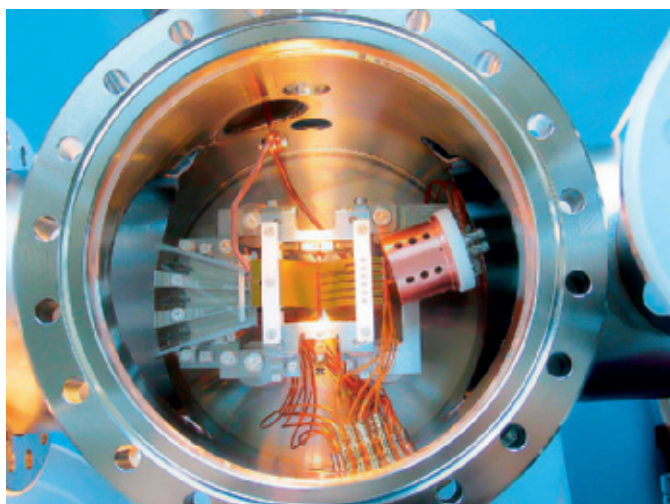
### EINE KATZE IN DER KISTE

Erwin Schrödinger verdeutlichte das Phänomen der Überlagerung mit einem Gedankenexperiment: Man stelle sich eine Kiste vor, in die man nicht hineinsehen kann und aus der keine Geräusche nach außen dringen. In dieser Kiste sitzt eine Katze. Neben ihr steht ein physikalischer Apparat, der ihren sicheren Tod bedeutet: Ein radioaktives Präparat wird irgendwann den Zerfall eines Atoms erleben. Wenn das Atom zerfällt, wird es über einen Geigerzähler einen elektrischen Impuls auslösen, der einen Hammer auf ein Fläschchen mit Gift fallen lässt. Das Gift tritt aus dem zertrümmerten Fläschchen – und die Katze stirbt.

Da aus der Kiste keine Information nach außen dringt, lässt sich nicht feststellen, ob der radioaktive Zerfall bereits den Tod

der Katze verursacht hat. Denn radioaktive Elemente zerfallen nicht zu einem fixen Zeitpunkt, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb einer bestimmten Zeitspanne.

Während der Zeit, in der der Zerfall wahrscheinlich eintreten wird, kann kein äußerer Beobachter sagen, ob die Katze noch lebt oder schon tot ist, denn niemand weiß, wann genau das radioaktive Atom zerfällt. Logisch betrachtet ist die Katze also gleichzeitig lebendig und tot. Oder keines von beiden. Sie befindet sich in einem Überlagerungszustand zwischen Leben und Tod. Selbstverständlich kann man aber zu jedem Zeitpunkt feststellen, ob die Katze noch lebt oder schon tot ist, indem man die Kiste öffnet. Damit zerstört man aber die Überlagerung.



den Bau eines Quantencomputers etwa oder für die sichere Verschlüsselung von Nachrichten. Das führte zu einer Revolution im Denken. Physiker wie Ignacio Cirac wagen sich jetzt an Tabus heran, die einst selbst Leute wie Albert Einstein noch einschüchterten.

### VERSCHRÄNKUNG ERMÖGLICHT QUANTENGATTER

„Alles begann 1994 auf einer Konferenz in Boulder, Colorado“, erinnert sich Rainer Blatt, der als Experimentalphysiker an der Universität Innsbruck sehr eng mit Cirac zusammenarbeitet. „Dort trafen mein österreichischer Kollege Peter Zoller, Ignacio Cirac und ich den britischen Physiker Arthur Eckert, der die Idee vorstellte, dass man bei einem

Quantencomputer wie bei einem klassischen Rechner einen Satz von grundlegenden Gattern benötigt, die bestimmte logische Entscheidungen ausführen können.“ Sobald es die gebe, ließen sich alle Rechenoperationen zusammensetzen. Zoller und Cirac griffen diesen Gedanken auf und schrieben innerhalb weniger Wochen auf, wie er sich realisieren lassen könnte.

Ein Quantencomputer arbeitet – anders als ein klassischer Computer – mit der Überlagerung verschiedener Zustände, sogenannten Qubits (siehe Kasten „Quanten, mit denen zu rechnen ist“). Diese bieten den Vorteil, viele Rechnungen in einem Schritt parallel zu ermöglichen, da alle Zustände gleichzeitig berechnet werden. Jede Messung aber bedeutet einen Eingriff in das System

und zerstört die Überlagerung. Dieses Phänomen hat der Physiker Erwin Schrödinger im Jahr 1935 anschaulich in seinem Bild von der Katze beschrieben, die gleichzeitig tot und lebendig ist. Wie soll man aber logische Operationen verknüpfen, ohne den Zustand der Qubits zu messen und sie damit zu zerstören? Cirac und Zoller hatten 1994 die Idee, wie man den Zustand eines Qubits mit einer Bewegung verschränken und damit gefahrlos messen kann.

Bei der Verschränkung von zwei Objekten handelt es sich um ein Phänomen, das schon Albert Einstein als „spukhafte Fernwirkung“ bezeichnet hat und das es nur in der Quantenwelt gibt: Zwei miteinander verschränkte Quantenobjekte befinden sich immer im gleichen Zustand – egal wie weit sie

### QUANTEN, MIT DENEN ZU RECHNEN IST

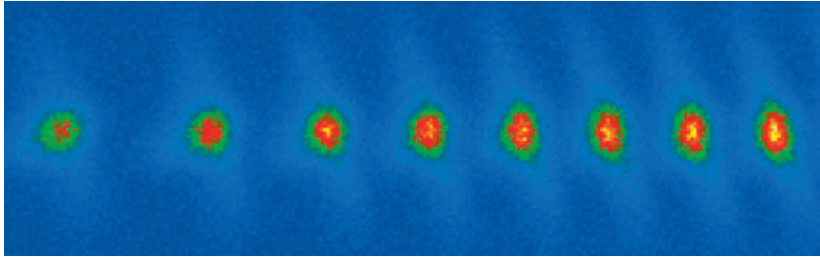
Digitale Information setzt sich bekanntlich aus Bits zusammen. In einem herkömmlichen Computer kann ein Bit den Wert 0 oder 1 annehmen, es wird repräsentiert durch den Ladungszustand eines Schaltelements. Auch in der Quantenmechanik gibt es Zustände, die 0 oder 1 entsprechen, etwa der Anregungszustand eines Atoms oder der Drehsinn eines kreiselnden Teilchens, Spin genannt. Ein angeregtes Atom könnte etwa für eine 1 stehen, eines im Grundzustand für eine 0. Für die Bits der Quantenwelt hat sich der Name Qubit durchgesetzt.

Quantenmechanische Objekte befinden sich jedoch nicht in einem eindeutigen Zustand, sondern immer in einer Überlagerung aller möglichen Zustände gleichzeitig. So kann also ein

Qubit gleichzeitig die 0 und die 1 codieren. Zwei Qubits nehmen also die vier Zustände 00, 01, 10 und 11 an, und zwar alle gleichzeitig. Die Zahl der möglichen Kombinationen steigt schnell an; 32 Qubits ergeben schon vier Milliarden. Im Quantencomputer will man sich diese Vielfalt zunutze machen: Jede Rechenoperation würde ja dann in allen Zuständen gleichzeitig ablaufen. Mit zwei Qubits werden automatisch vier Werte gleichzeitig berechnet, mit 32 Qubits vier Milliarden Werte.

Die Überlagerung der Zustände bricht jedoch zusammen, sobald das System gestört wird. Im Augenblick einer Messung beschreiben Physiker die Wirklichkeit exakt: Es bleibt nur ein einziger Zustand übrig, nämlich der ermittelte Messwert.

links | Blick in eine Ionenfalle: Zwischen den vier Elektroden (rechts als Detailbild) werden geladene Atome gefangen. Mit Fallen dieser Art lassen sich Quantengatter konstruieren, in denen die Zustände von Atomen mit ihrer Bewegung verschränkt werden.  
unten | In einer Reihe ordnen sich die Ionen in einer Falle an; für eine Verschränkung müssen sie sich in absoluter Ruhe befinden.



## VERSCHRÄNKUNG IN DER FALLE

Um den Zustand eines Atoms mit einer Bewegung zu verschränken, schlugen Ignacio Cirac und Peter Zoller folgendes Verfahren vor: Man ordne mehrere Ionen in einer Ionenfalle in Form einer Kette an und bringe sie in einen Zustand absoluter Ruhe. Das ist leichter gesagt als getan. Um das zu erreichen, muss man mehrere Kühlverfahren kombinieren, unter anderem die Laserkühlung sowie die Seitenband-Kühlung. Die Ionenkette stellt einen harmonischen Oszillator dar, der interne Quantenzustände besitzt. Ist er im absoluten Grundzustand, dann ist die Kette absolut bewegungslos; zwischen den Ionen herrscht allerdings weiterhin die Coulomb-Wechselwirkung.

Wenn dieser absolute Grundzustand erreicht ist, kann man durch Manipulation eines der Ionen mit einem geeigneten Laserimpuls erreichen, dass es in einen angeregten Zustand springt. Geschieht dies in der richtigen Art und Weise, kann man mit Mitteln der Quantenlogik dafür sorgen, dass aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung zwischen den Ionen in der Falle eine Bewegung entsteht. So gibt es nicht nur einen Übergang zwischen Anregungszuständen, sondern auch noch einen Kick, damit sich das Ion bewegt. Die Bewegung ist sehr klein, nur wenige Nanometer. Sie bedeutet aber, dass jetzt die ganze Kette anfängt zu schwingen.

Das System weiß im Prinzip gar nicht, von welchem Ion die Bewegung ausging. Dieses Nichtwissen ist auch eine Art von Überlagerung. Man kann deshalb sagen, man hat den internen Zustand mit der externen Bewegung der Ionen verschränkt. Man hat den optischen Übergang umgemünzt in einen Bewegungszustand.

voneinander entfernt sind. Übertragen auf das Quantengatter heißt das: Ist eines der Qubits angeregt, dann ergibt das eine Bewegung, ist es nicht angeregt, dann nicht. Bei der Beobachtung der Bewegung zerstört man die Überlagerung im Qubit nicht.

Im Jahr 2001 verwirklichte die Gruppe von David Wineland in Colorado ein Quantengatter und setzte die Ideen von Cirac und Zoller damit zum ersten Mal experimentell um. Kurz danach gelang das auch Rainer Blatt in Innsbruck. Sein Team setzte auf Ionenfallen, um ein Quantengatter zu bauen. Dabei sperren Physiker geladene Atome mithilfe geeigneter elektromagnetischer Felder in einer kleinen Vakuumkammer ein, manipulieren sie mit Lasern und verschränken so ihre Zustände mit Bewegungen. Inzwischen ist das Verfahren etabliert, und Verschränkungen lassen sich nach der Cirac-Zoller-Methode praktisch auf Knopfdruck herstellen – ein Vorgang, der vorher undenkbar schien.

Vorher fand man lediglich Teilchen, die auf natürliche Weise miteinander verschränkt waren. „In einem nicht linearen optischen Kristall können etwa beim Einfall eines energiereichen Quants zwei miteinander verschränkte Photonen erzeugt werden“, erläutert Ignacio Cirac. Aber wie soll man drei verschränkte Photonen herstellen, oder 30, wie man das für einen Quantencomputer braucht? Er und seine Kollegen haben deshalb einen Weg vorgeschlagen, wie man Ionen absichtlich miteinander verschränken kann. „Heute können wir anbieten: Sag mir, in wel-

chem Zustand deine Teilchen sind, und wir geben dir eine Prozedur, mit der du so viele davon verschränken kannst, wie du willst“, so Cirac.

## RECHNUNGEN – AUS DER ISOLATION GEFÜHRT

Experimentalphysiker haben die Wahl unter vielen theoretischen Vorschlägen für Versuche. Da Ignacio Cirac in Fachkreisen aber einen hervorragenden Ruf genießt, gelingt es ihm und seiner Gruppe von 30 Theoretikern immer wieder, auch Partner für Experimente zu aktuellen Projekten zu gewinnen. So stellte Cirac und zwei ehemalige Mitarbeiter im Juli 2009 mit einer neuen Theorie einen weiteren Grundsatz der Quantenwelt in Frage. Mittlerweile arbeiten einige Teams daran, sie experimentell zu belegen.

Bisher herrschte die Überzeugung, dass die Qubits in einem Quantencomputer nicht von außen gestört werden dürften, damit ihre Überlagerung nicht verloren geht. Deshalb müsse das System komplett von der Außenwelt isoliert werden, Messungen zwischendurch seien unmöglich. Dissipation nennen die Forscher diesen unerwünschten Kontakt mit der Umgebung. Erst am Ende der Rechnung lesen die Experimentatoren das Ergebnis aus, indem sie eine Messung machen – dabei zerstören sie die Überlagerung. „Aber wir haben nun festgestellt, dass man das System beobachten und trotzdem Quantenrechnungen vornehmen kann“, sagt Cirac:





Um große Ideen zu entwerfen reichen eine Tafel und ein Stift. Ignacio Cirac entwickelt Theorien, die Experimentalphysiker praktisch umsetzen.

„Das ist eine These, die allen bisherigen Vorstellungen vom Quantencomputer widerspricht.“

Die Forscher müssen die Beobachtung allerdings in einer ganz speziellen Weise vornehmen. Dann kollabieren zwar die Überlagerungen, aber in einer Art und Weise, die zur Lösung des Problems führt. Wie das Ganze in der Praxis aussehen könnte, ist noch nicht klar. Immerhin hat die Europäische Union Mitte 2009 ein dreijähriges Forschungsprojekt mit dem Namen Quevadis aufgelegt, um entsprechende Experimente zu fördern. „Es gibt letztlich zwei grundsätzliche Arten von Quantencomputern“, fasst Cirac zusammen, „beim einen braucht man völlige Isolation, beim anderen volle Dissipation.“ Möglicherweise lassen sich am Ende die Vorzüge beider Arten kombinieren.

### SIMULATOREN FÜR QUANTENSYSTEME

Noch ein weiteres Projekt treibt Ignacio Cirac um: Er arbeitet mit an der Verwirklichung einer Idee, die der legendäre Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman schon im Jahr 1981 ansprach. Feynman bezweifelte, dass man die Welt mit einem konventionel-

len Computer genau beschreiben kann: „Ich bin nicht glücklich mit all den Analysen, die behaupten, das ginge mit klassischer Physik, denn die Natur ist verdammt noch mal nicht klassisch. Wenn man eine Simulation der Natur machen will, macht man sie besser quantenmechanisch, und – Menschenskind – man erhält dabei auch noch ein wunderbares Problem!“ An diesem „wunderbaren Problem“ arbeiten nun Forschergruppen auf der ganzen Welt, darunter auch die Theoretiker des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik: Sie wollen Quantensysteme simulieren.

### DER MIKROKOSMOS WIRD VORHERSAGBAR

Cirac erklärt das Grundprinzip anhand der heute üblichen klassischen Simulationen: „Angenommen, Sie wollen ein Flugzeug entwerfen und sehen, ob es fliegen kann, bevor sie es bauen. Dann simulieren Sie alle wichtigen Komponenten auf dem Computer und können mithilfe der passenden Gleichungen eine Vorhersage treffen.“ Auf diese Weise können Rechner viele Dinge simulieren. „Aber die Quantensysteme aus unserer mikroskopischen Welt kann kein konventioneller Computer nachbilden“, sagt der Physiker.

Etwa das Verhalten von Atomen bei sehr tiefen Temperaturen: Werden sie Elektrizität leiten oder nicht, werden sie Supraleitung zeigen? Hier versagt ein konventioneller Rechner, hier sind Quanten nötig. Es muss nicht gleich ein Quantencomputer sein, es reicht ein einfacheres Quantensystem, wenn es so zu kontrollieren ist, dass es sich bei tiefen Temperaturen wie eine Gruppe von Atomen verhält. Dann lassen sich damit Vorhersagen über das unbekannte System ableiten (siehe MAX-PLANCKFORSCHUNG, 4/2008, Seite 32ff.).

Im Vordergrund steht zurzeit die Frage, warum manche Materialien bereits bei relativ hohen Temperaturen Supraleitung zeigen, also Strom bei re-

lativ hohen Temperaturen ohne Widerstand leiten. „Mit unseren Quantensimulatoren hoffen wir herauszufinden, warum es Hochtemperatur-Supraleitung gibt“, sagt Cirac. Sobald der Mechanismus klar ist, lassen sich solche Materialien möglicherweise gezielt bauen, sodass sie Strom schon bei Temperaturen verlustfrei leiten, die auch breite Anwendungen ermöglichen.

Es gibt immer noch Abenteuer und Überraschungen in der Physik, auch in der Theorie. Ignacio Cirac ist mit dieser Situation sehr zufrieden. „Ich sage immer zu den Leuten, die selbst keine Forschung machen: Stell dir vor, du gehst auf eine Reise und entdeckst einen Stein, den niemand je zuvor gesehen hat. Das fühlt sich doch großartig an. Und dieses Gefühl haben wir jeden Tag.“

### GLOSSAR

#### Überlagerung

Teilchen nehmen nicht einen Zustand ein, sondern alle möglichen Zustände zur selben Zeit – so lange, bis eine Messung die Überlagerung zerstört.

#### Verschränkung

Zwei oder mehr Teilchen bilden ein Gesamtsystem, Messungen an einem Teilchen wirken sich instantan auf die verschränkten Partner aus – egal wie weit die Partikel voneinander entfernt sind.

#### Supraleitung

Unterhalb der sogenannten Sprungtemperatur, die meistens unter minus 260 Grad Celsius liegt, leiten viele Metalle Strom ohne Widerstand. Diese konventionelle Form der Supraleitung verstehen Physiker sehr gut, die unkonventionelle Form der Supraleitung dagegen noch nicht. Sie tritt unter anderem in Kupferoxid-Keramiken auf, von denen der Rekordhalter immerhin schon bei minus 110 Grad Celsius seinen elektrischen Widerstand verliert.

#### Superfluidität

Das Phänomen wurde zuerst bei zwei Isotopen des Heliums beobachtet. Aufgrund quantenmechanischer Effekte fließt eine Flüssigkeit oder ein Gas ohne Reibung.