

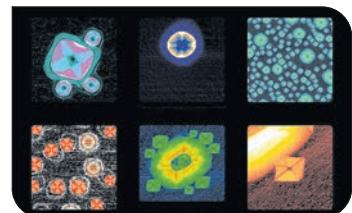
Grundlagenforschung in Österreich: Beispiele für FWF-geförderte Spitzenforschung

Teilchenzoo im Quantencomputer



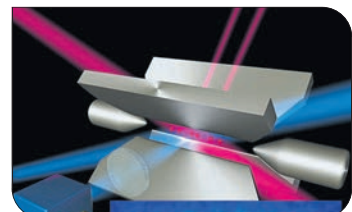
Mit der ersten Quantensimulation einer Gitter-Eichfeldtheorie haben PhysikerInnen um Rainer Blatt und Peter Zoller eine Brücke zwischen Hochenergiephysik und Atomphysik geschlagen.

Quantenpunkte für Nanolaser in Computern



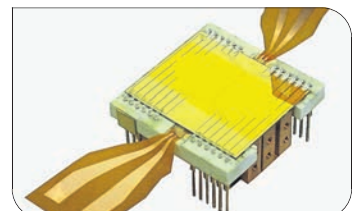
Moritz Brehm und Martyna Grydlik forschen an Germanium-Quantenpunkten und gehen der Frage nach, wie sie für Nanolaser zur optischen Datenübertragung in Computerchips verwendet werden könnten.

Quantencomputer simuliert Urknall



Atome werden mit elektrischen Feldern gespeichert und mit Laserpulsen manipuliert: Das ist das Prinzip eines Quantencomputers, in dem Prozesse des Urknalls von Rainer Blatt und seiner Arbeitsgruppe in Innsbruck simuliert werden konnten.

Atom Chips



Der Physiker Jörg Schmiedmayer arbeitet mit seinem Team an integrierten Schaltungen für Materiewellen, die das Beste aus zwei Welten kombinieren: die Quantenexperimente ultrakalter Gase und die Robustheit der Nanofabrikation.

Quantenzustände



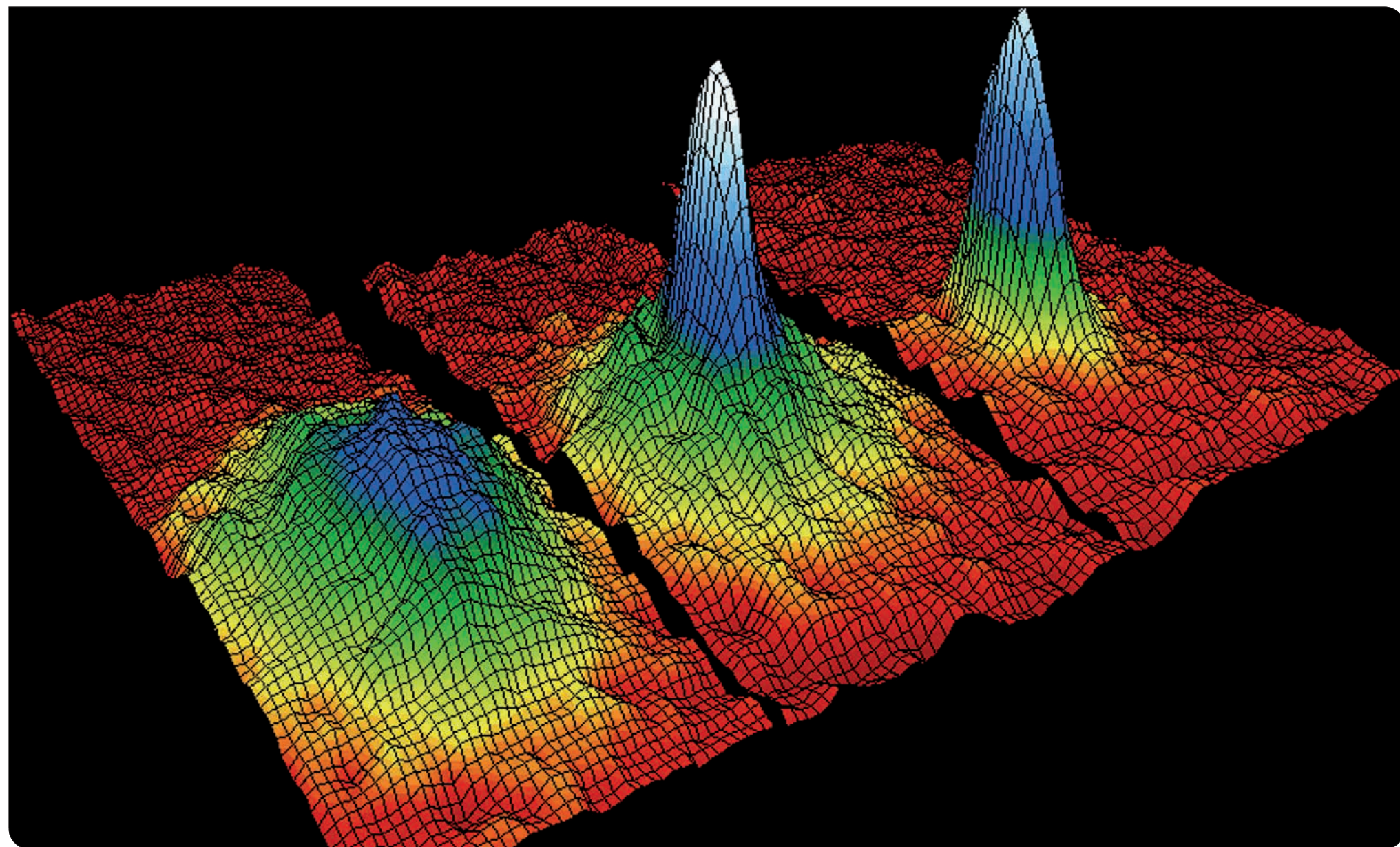
Der Quantenphysiker Anton Zeilinger und seine Teams erforschen die Quanten-Teleportation. Das Bild zeigt, wie der chinesische Quantensatellit MOZI einen Schlüssel mit der Bodenstation in Graz austauscht (Mehrfachbelichtung).

Ultrakalte Teilchen geben Auskunft

Quantenphysik. Gase bekommen ganz besondere Eigenschaften, wenn man sie auf wenige Nano-Kelvin abkühlt.

Die Quantentheorie ist eine der mächtigsten und am besten überprüften Theorien überhaupt. Ohne sie wären zahlreiche Technologien, die unser Leben prägen, undenkbar - beginnend bei CD-Playern bis hin zu Computersystemen und Internet. Trotzdem stellt die Quantenwelt die Wissenschaft unverändert vor sehr große Herausforderungen. Zum einen sind die mathematischen Gleichungen zwar umfassend, sie lassen sich aber für Systeme mit mehr als zehn Teilchen nicht mehr berechnen. Und zum anderen ist die experimentelle Überprüfung von Quanteneffekten sehr aufwendig: Um Teilchen wie z. B. Kernteilchen, Atome, Ionen oder Moleküle quantenmechanisch untersuchen zu können, müssen sie in ganz bestimmte Zustände gebracht werden - sie müssen beispielsweise auf extrem niedrige Temperaturen gekühlt und in sogenannten „Fallen“ im Vakuum eingefangen und stabil gehalten werden.

Quantenphysiker fassen solche Methoden mit dem Überbegriff „Quanten-Engineering“ oder „Quanten-Kontrolle“ zusammen. „Wir wollen die maximale Kontrolle über die Teilchen haben. Das bedeutet, dass wir jeden Freiheitsgrad eines Teilchens kontrollieren wollen“, erläutert Hanns-Christoph Nägerl, Professor für Experimentalphysik an der Universität Innsbruck. Die Teilchen dürfen sich zum Beispiel „quasi nicht mehr bewegen“ - das bedeutet: nur soviel, wie sie sich im Rahmen der Heisenbergschen Unschärfe bewegen dürfen. Zu diesem Zweck werden die Teilchen auf extrem niedrige Temperaturen von wenigen Nano-Kelvin gekühlt, das sind



1995 wurde entdeckt, dass Gase bei extremer Kälte ein „Bose-Einstein-Kondensat“ bilden, das man auch als Materiewelle beschreiben kann.

nur einige Milliardstel Grad über dem absoluten Nullpunkt.

Das ist möglich durch eine Methode namens Laserkühlung. Die Grundidee ist, dass die Geschwindigkeit von Atomen durch geschickten Beschuss mit Photonen verringert werden kann. Da sich die Temperatur eines Gases in der Bewegung der Atome ausdrückt, ist das Abbremsen gleichbedeutend mit einer Abkühlung. „Man kann die Teilchen so weit hinunterkühlen, dass sie einen Zustand möglichst geringer Entropie darstellen“, so Nägerl. Das kann

man mit einer Reihe verschiedener Teilchen machen - Nägerls Spezialgebiet sind Atome, etwa Caesium oder Rubidium, während Forscherkollegen in Innsbruck oder Wien ähnliches mit Ionen oder mit Fermionen (wie etwa Elektronen oder Quarks) machen.

Bose-Einstein-Kondensat

Wenn man Gase auf sehr tiefe Temperaturen abkühlt (kondensiert), geschehen sonderbare Dinge. Sie können beispielsweise ein sogenanntes „Bose-Einstein-Kondensat“ ausbilden. In diesem ex-

tremen Aggregatzustand befindet sich der überwiegende Anteil der Teilchen im selben quantenmechanischen Zustand, die Teilchen sind in diesem System nicht mehr unterscheidbar, draus ergeben sich Eigenschaften wie Supraleitung, Suprafluidität, Suprasolidität oder Kohärenz.

„In meiner Gruppe konzentriere ich mich auf die Quantenkontrolle von Vielteilchensystemen, um Fragen der Vielteilchen-Quantenphysik zu untersuchen“, erläutert Nägerl. Konkret wollen die Wissenschaftler in Zukunft

über Quanteneffekte

Grad Celsius) oder mehr - Supraleitung auftritt. Dabei hat ein Material keinen elektrischen Widerstand, was interessante technische Anwendungen erlaubt. Bei Temperaturen nahe des Nullpunkts kann man das Phänomen erklären (durch sogenannte Cooper-Paare). Bei höheren Temperaturen funktioniert diese Erklärung aber nicht.

Quantenforschung erfordert eine Kombination aus Theorie und Experimenten, betont Nägerl. „Die meisten Effekte in der Physik hat man zuerst im Experiment gesehen. Mit der Theorie versucht man diese Dinge dann zu verstehen: Das ist ein ständiges Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment.“ Daher arbeiten Experimentalphysiker sehr eng mit theoretischen Physikern zusammen - auch das Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Akademie der Wissenschaften (ÖAW) mit Standorten in Wien und Innsbruck hat aus diesem Grund sowohl theoretische als auch experimentelle Arbeitsgruppen.

Viele mögliche Anwendungen

Die Arbeit ist an sich reine Grundlagenforschung, doch der Übergang zur angewandten Forschung ist fließend. Das betrifft neben Fragen der Materialforschung (wie etwa die Supraleitung) auch eines der ultimativen Ziele der Forschung: den Bau eines Quantencomputers, der um ein Vielfaches leistungsfähiger sein könnte als herkömmliche Computer. Davon ist man freilich noch ein gutes Stück entfernt. Quantensimulatoren stellen ein Vorstufe zu einem Quantencomputer dar. „In Ionenfallen kann man das heute mit etwa zehn Ionen machen, in Zukunft vielleicht mit 1000: Das ist die Basis für einen Quantencomputer, der den richtigen Anfangszustand hat, um damit eine Rechenaufgabe zu lösen“, erklärt Nägerl.

Die möglichen Anwendungen der Quantenphysik betreffen viele Bereiche. Als Beispiel nennt Nägerl „entartete fermionische Quantengase“, die die Basis für die nächste Generation von Atomuhren sind. „Da sind Ungenauigkeiten im Bereich von 10 hoch minus 18 und besser möglich.“ Die künftigen Atomuhren sind also tausendmal genauer als heutige. Dabei macht es sich schon bemerkbar, wenn die Atomuhr nur einen Zentimeter höher steht - und allein schon diese Tatsache eröffnet ungeahnte Möglichkeiten z. B. für die Geodäsie.

nicht nur einzelne Atome, sondern sogar aus mehreren Atomen zusammengesetzte Moleküle kontrollieren. Daraus würden sich interessante Systeme ergeben, mit denen man sogenannte „Quantensimulationen“ durchführen könnte. Das bedeutet, dass man ein System von Teilchen in einen genau definierten Ausgangszustand bringt, diesen dann stört und beobachtet, welche Dynamik sich daraus entwickelt. „Berechnen kann man die Dynamik solcher Systeme nicht. Die Schrödinger-Gleichung beschreibt zwar die Dynamik aller Phänomene im Mikrokosmos - von chemischer Bindung bis zur Supraleitung. Das System ist aber so komplex, dass man es, schon wenn man ein Mole-

kül mit zehn Teilchen hat, nicht mehr berechnen kann. Man ist immer auf Näherungen angewiesen.“ Durch das Experiment sollen manche Faktoren, die durch die Schrödinger-Gleichung beschrieben werden, untersucht werden können.

„Wir versuchen, solche Systeme mit Molekülen im Labor herzustellen“, erläutert der Wittgensteinpreisträger den Kern seines neuen ERC-Projektes.

Mit einem Quantensimulator kann man Phänomene nachbilden, die man bisher nicht versteht. Ein solches Phänomen ist die sogenannte Hochtemperatur-Supraleitung: Man weiß nicht, warum bei hohen Temperaturen - damit meinen Physiker 100 Kelvin (minus 173

Sicherheit dank Quantenverschlüsselung

Quanteninformation. Ein per Quantenkryptografie verschlüsseltes Videotelefonat zwischen Peking und Wien stieß eine weitere Tür in Richtung abhörsicherer Kommunikation auf.

Der 29. September 2017 brachte eine technologische Weltpremiere mit starker österreichischer Beteiligung: Der Wiener Quantenphysiker und Präsident der Akademie der Wissenschaften, Anton Zeilinger, führte mit seinem chinesischen Amtskollegen Chunli Bai das erste mithilfe von Quantentechnologie verschlüsselte Videotelefonat zwischen zwei Kontinenten. Durch die Quantenverschlüsselung war die Abhörsicherheit des Gesprächs mindestens eine Million Mal höher als bei konventionellen Methoden der Verschlüsselung. Zudem wur-

de weitere Daten, in Form von Bildern des Physikers Erwin Schrödinger und des chinesischen Philosophen Micius, verschlüsselt und nicht hack-bar zwischen Wien und Peking ausgetauscht.

Möglich wurde das durch ein gemeinsames Forschungsprojekt namens QUSS (Quantum Experiments at Space Scale), das im Jahr 2013 von Zeilinger und seinem ehemaligen Doktoranden Jian Wei-Pan gestartet wurde. Der Kern dieses Projekts ist ein chinesischer Satellit, der für quantenphysikalische Experimente zwischen Erde und Weltraum ausgerüstet wurde. Die

Bodenstationen dafür wurden in China und in Graz eingerichtet. Die Datenübertragung geschieht über Photonen, die mit Laserstrahlen bzw. Fernrohren gesendet bzw. empfangen werden.

Die Abhörsicherheit wird durch die Erzeugung des Quantenschlüssels garantiert, der auf dem quantenphysikalischen Phänomen der Verschränkung beruht. Dabei sind zwei Teilchen unabhängig von ihrer Entfernung verknüpft. Wenn die Eigenschaften des einen Teilchens verändert werden, so geschieht dies unmittelbar auch beim anderen Teilchen. Ein derartiger

Quantenschlüssel ist jedenfalls nicht zu knacken - genauer gesagt: Wenn jemand die zwischen dem Satelliten und der Bodenstation ausgetauschten Photonen abfangen und deren Eigenschaften messen würde, würde sich dadurch der quantenphysikalische Zustand der Teilchen verändern. Was sofort bemerkt werden würde.

Der Datenaustausch zwischen Österreich und China ist die bisher weiteste Datenübertragung per Quantenverschlüsselung. Bis dahin stand der Rekord bei 144 Kilometern - zwischen den Inseln La Palma und Teneriffa.



Hanns-Christoph Nägerl

Pavillon kuratiert von Pavilion curated by

Hanns-Christoph Nägerl ist Professor am Institut für Experimentalphysik an der Universität Innsbruck. 2017 wurde er vom Wissenschaftsfonds (FWF) mit dem

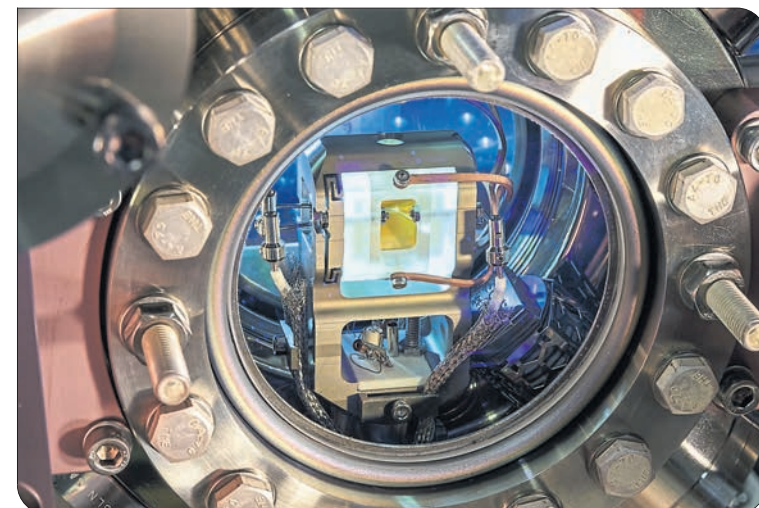


Wittgenstein-Preis ausgezeichnet. 2018 erhielt er einen vom Europäischen Forschungsrat finanzierten ERC Advanced Grant.

Mit Beiträgen von With contributions from



Boehringer Ingelheim investiert in die unabhängige Grundlagenforschung. GRUNDLAGENFORSCHUNG VERPFLICHTET. Includes images of a modern building and scientists in a lab.



In sogenannten „Fallen“ werden Atome oder Ionen eingefangen. [IQOQI/ÖAW, Kobl] ]

Rechnen mit Qubits

Quantencomputer. Ein großes europäisches Konsortium will den Durchbruch schaffen.

Quantensimulatoren, mit denen die Dynamik bestimmter physikalischer Phänomene erforscht wird, sind eine Vorstufe für einen Quantencomputer: Wenn die Teilchensysteme, die von den Quantenphysikern kontrolliert werden können, ausreichend groß werden, können auch allgemeine mathematische Probleme berechnet werden.

Im Unterschied zu heutigen Digitalrechnern arbeiten Quantencomputer nicht auf Basis der Gesetze der klassischen Physik bzw. Informatik, sondern nutzen quantenmechanische Zustände, sogenannte „Qubits“. Die Verarbeitung dieser Zustände erfolgt nach quantenmechanischen Prinzipien wie Superposition oder Quantenverschränkung. Quantencomputer versprechen, um ein Vielfaches leistungsfähiger zu sein als heutige Computer.

Ideen für Einsatzgebiete gibt es bereits viele. Ein Beispiel ist das sogenannte „Faktorisierungsproblem“, also die Zerlegung einer großen Zahl in ihre Primfaktoren. In der klassischen Mathematik gibt es keinen effizienten Algorithmus dafür. Auf dieser Tatsache beruht die gesamte heutige Datenverschlüsselungstechnik. Schon vor fast 25 Jahren konnte indes gezeigt werden, dass es einen Quantenalgorithmus gibt, der die Primfaktoren finden kann. Wenn sich also tausendmal genauer als heutige, dabei macht es sich schon bemerkbar, wenn die Atomuhr nur einen Zentimeter höher steht - und allein schon diese Tatsache eröffnet ungeahnte Möglichkeiten z. B. für die Geodäsie.

Milliardenprojekt

Mit ihrem reichen Know-how ist Österreichs Quantenphysik auch in die große europäische Quantum-Technology-Flagship-Initiative eingebunden, in die in den kommenden Jahren eine Milliarde Euro fließen soll (davon eine halbe Mrd. Euro von der EU). Ziel ist es, die wissenschaftlichen Aktivitäten mit denen der Industrie zu verschränken und Europa dadurch an die Spitze der weltweiten Bemühungen um einen Quantencomputer zu setzen.

Um die österreichische Teilnahme zu erleichtern, haben die Förderagenturen FWF und FFG spezielle Quantenforschungsprogramme eingerichtet.