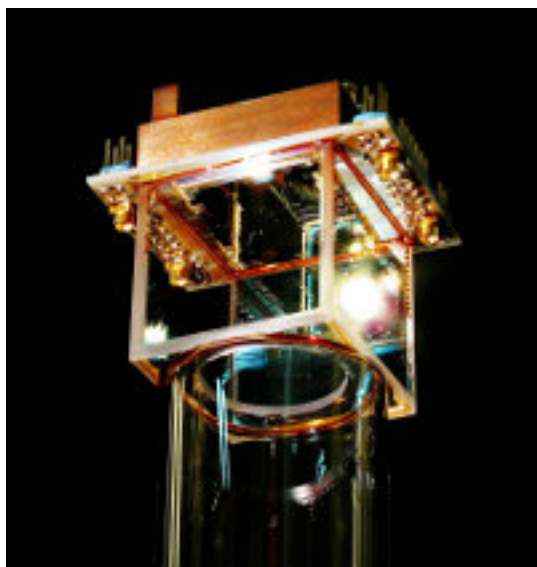


Schraubzwinde für das Quantenrauschen

Münchener Physiker verschränken auf einem Mikrochip erstmals mehrere Atome und ermöglichen so genauere Messungen

15.04.2010 - Kompakt und präziser als die Quantenphysik zu erlauben scheint - so könnte sich die Atomuhr der Zukunft präsentieren. Ein Team um Physiker des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik und der Ludwig-Maximilians-Universität München hat einen Kniff gefunden, die Genauigkeit von Messinstrumenten, die mit Quantenteilchen auf einem Mikrochip arbeiten, zu erhöhen - und zwar über das Quantenlimit hinaus. Diese Grenze existiert, weil das Verhalten von Quantenteilchen der Wahrscheinlichkeit unterworfen ist. Das sich daraus ergebende Quantenrauschen haben die Forscher reduziert, indem sie Atome auf einem Mikrochip verschränkten. Dann bestimmt das Verhalten eines Atoms, was mit seinen verschränkten Partnern geschieht. Auf diese Weise lässt sich nicht nur die Präzision von chip-basierten Atomuhren, sondern auch von Atominterferometern erheblich steigern, die sich etwa für die Navigation verwenden lassen.



Was Quantenphysiker Verschränkung nennen, ist geheimnisvoll, fremdartig - und nützlich. Befinden sich zwei Teilchen in einem verschränkten Zustand, verhalten sie sich nicht mehr wie zwei Individuen, sondern wie ein einziges Teilchen. Was immer das eine tut oder treibt - oder was mit ihm getrieben wird -, es beeinflusst im selben Moment das Verhalten des anderen, und zwar unabhängig davon, wie weit die Teilchen voneinander entfernt sind. Dieses Phänomen fasziniert Physiker nicht

nur als Beispiel für die Eigenarten der Quantenwelt, sondern lässt sich auch technisch einsetzen, wie etwa in der Kommunikation, der Metrologie und Informationsverarbeitung.

Nun hat eine Forschergruppe um Theodor W. Hänsch und Philipp Treutlein am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und der Ludwig-Maximilians-Universität München erstmals Teilchen auf einem Atom-Chip verschränkt. Mit solch einem mikrostrukturierten Chip lassen sich einzelne Atome oder auch Atomwölkchen einfangen und manipulieren. Unter anderem haben die Münchener Physiker damit bereits kompakte Atomuhren konstruiert, die für den portablen Einsatz geeignet sind. Und da sich die Teilchen auf solch einem Chip jetzt verschränken lassen, könnten diese Atomuhren künftig noch genauer ticken. Denn verschränkte Atome ermöglichen es, das Quantenrauschen zu reduzieren.

Das Quantenrauschen ergibt sich aus der Unbestimmtheit, die das Verhalten von Atomen, Elektronen und Photonen bestimmt: Was dabei geschieht lässt sich nicht mit absoluter Sicherheit, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit voraussagen. Eine Aussage darüber, wie sich ein quantenmechanisches System verhält kann also nur statistisch sein. Und der Wert einer quantenmechanischen Messung liegt innerhalb einer Bandbreite möglicher Ergebnisse. "Abweichungen von dem Mittelwert, also das Schwanken von Messung zu Messung, führen zu dem Quantenrauschen", erläutert Pascal Böhi, der als Doktorand an dem Projekt mitgearbeitet hat.

Spins, die gleichzeitig nach oben und unten zeigen

Die Verschränkung zu nutzen, um das Quantenrauschen zu reduzieren, stützt sich auf ein Konzept, das die theoretischen Physikerinnen Alice Sinatra und Li Yun vor zwei Jahren zusammen mit der Münchener Gruppe um Philipp Treutlein entwickelt haben. Dieses haben die Münchener Physiker jetzt experimentell umgesetzt. Dazu fangen sie zunächst eine Wolke von Rubidiumatomen auf dem Chip ein und kühlen sie auf weniger als ein Millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt. Bei diesen Temperaturen bildet sich ein neuer Mate-

riezustand aus, ein sogenanntes Bose-Einstein-Kondensat, in dem sich alle Atome im gleichen quantenmechanischen Zustand befinden. Die Rubidiumatome können durch einen sogenannten Spin beschrieben werden, der zwei Einstellungen - aufwärts oder abwärts - annehmen kann.

Im Grundzustand ist der Spin von allen Atomen im Bose-Einstein-Kondensat nach unten gerichtet. Wegen der Unsicherheit quantenmechanischer Aussagen nimmt der Spin allerdings nicht exakt die Senkrechte ein, sondern kann auch Positionen darum herum besetzen. Einstellungen neben dem der Senkrechten werden allerdings immer unwahrscheinlicher je weiter entfernt sie davon liegen. Die Wahrscheinlichkeiten für die Positionen des Gesamtspins - der Summe aller einzelnen Spins - ergeben auf einer Kugeloberfläche am Südpol also einen Fleck mit diffusem Rand.

Mit einem kurzen Mikrowellenpuls drehen die Forscher den Gesamtspin nun in die Waagerechte, sprich: zum Äquator der Kugeloberfläche, wobei die fleckenförmige Verteilung der Spins erhalten bleibt. Doch die quantenmechanische Wirklichkeit ist noch komplizierter. Tatsächlich befinden sich alle Atome in einem Überlagerungszustand - einer Superposition - aus senkrecht nach unten und senkrecht nach oben weisenden Spinzuständen.

Verschränkt mit einer wählerischen Mikrowelle

Nun machen die Garchinger Physiker den entscheidenden Schritt: Sie verschränken die Rubidium-Atome, und zwar mit Hilfe eines zustandsabhängigen Potentials, das die beiden Zustände räumlich voneinander trennt. Dazu senden die Forscher Mikrowellen auf einem Wellenleiter - ein Material, das für bestimmte Lichtfrequenzen durchlässig ist - durch ihren Chip. In der Umgebung dieses Wellenleiters entsteht ein elektromagnetisches Nahfeld, das mit zunehmendem Abstand vom Chip sehr rasch an Intensität verliert. Die Energie der Mikrowelle stellen sie so ein, dass sie ganz nah bei einer Energie liegt, die einen der beiden Spinzustände in einen anderen Zustand befördert. Weil die Energie der Mikrowelle aber nur beinahe mit der Energie des Übergangs übereinstimmt, findet der nicht statt. Vielmehr erhöht sich die Energie des Spinzustands - das mag das System nicht, weil in der Natur alles immer zu möglichst niedriger Energie strebt. Nun kommt zum Tragen, dass die Energie des Mikrowellenfeldes um den Wellenleiter schnell abklingt. Die Atome, denen eine Er-

höhung ihrer Energie droht, weichen aus - und zwar in die Richtung, in der die Intensität der Mikrowelle verschwindet. Die Atome im anderen Spinzustand sind von dieser Energieerhöhung nicht bedroht; sie sehen den Mikrowellenpuls gar nicht und bewegen sich daher auch nicht.

Genaugenommen läuft auch dieser Prozess etwas anders ab. Denn die Spins der Atome zeigen gleichzeitig nach unten und oben, die Teilchen werden also sozusagen "von sich selbst getrennt"; sie werden vom Chip weggedrückt und gleichzeitig doch nicht. Genau diese Eigenschaft, dass Teilchen gleichzeitig hier und dort sein können, stellt eine der mathematischen Grundaussagen der Quantenphysik dar. Was diese Aussage für den tatsächlichen Aufenthaltsort der Teilchen bedeutet und wie sie sich mit unserer physikalischen Alltagserfahrung in Einklang bringen lässt, diskutieren auch Physiker immer noch.

"Anschaulich gesprochen bewirkt dieses Potenzial, dass nur Atome, die im gleichen Spinzustand sind, miteinander in Wechselwirkung treten, das heißt kollidieren können", erklärt Max F. Riedel, Doktorand am Münchner Atom-Chip Experiment: Es können also nur Atome zusammenstoßen, deren Spins entweder nach unten oder nach oben zeigen - Teilchen mit unterschiedlichen Spineinstellungen sehen sich dagegen einfach nicht. "Die zeitliche Entwicklung der Zustände eines Atoms hängt damit vom Zustand der anderen Atome ab. Das bedeutet, dass die Atome miteinander über ihren Spin verschränkt werden."

Ob die Atome zusammenstoßen und mit wem, ergibt sich also aus ihrem Spinzustand. Doch in welche Richtung der Spin zeigt, entscheidet sich erst im Moment der Messung. Die Entscheidung wiederum wird von allen anderen Atomen beeinflusst: Während unverschränkte Atome in ihrer Entscheidung für eine Spinrichtung mehr oder weniger frei sind, verlieren verschränkte Atome ihren unabhängigen Willen.

Höhere Genauigkeit, aber nur in einer Richtung

Zudem hat die Verschränkung zur Folge, dass der diffuse Fleck möglicher Spineinstellungen auseinander gezogen wird, weil sein oberer und unterer Teil in entgegengesetzte Richtungen wandern. Auf diese Weise wird er länger und schmaler. "Messungen mit Atomen etwa in einer Atomuhr lassen sich nun so vornehmen, dass nur die schmale Seite des Flecks der möglichen Spineinstellungen über

den Wert einer Messung entscheidet", sagt Max Riedel. Die kleinste Zeiteinheit, mit der eine Atomuhr tickt, bildet ein der Umlauf des Gesamtspins auf einem Kreis. Wann der beendet ist lässt sich umso genauer messen, je geringer seine Unschärfe. "Wir quetschen das Rauschen in dieser Richtung unter seinen ursprünglichen Wert, auf Kosten des Rauschens in der entgegen gesetzten Richtung - denn Heisenbergs Unschärferelation gilt immer noch. Jedoch interessiert uns diese andere Richtung für unsere Messung nicht, das ist der Trick." Aus der Stärke der "Quetschung" schließen die Physiker, dass sich in dem Wölkchen aus Rubidium-Atomen Cluster von jeweils mindestens vier miteinander verschränkten Atomen gebildet haben.

Mit solchen gequetschten Zuständen ließe sich nicht nur die Genauigkeit von Atomuhren deutlich erhöhen, auch hochempfindliche Atominterferometer könnten extrem schwacher Kraftfelder künftig noch präziser aufspüren. Solche Atominterferometer könnten etwa Drehbewegungen messen oder unterirdisch gelagerte Rohstoffe nachweisen. Zudem lässt sich die Technik vielleicht anwenden, um ein Quantengatter, einen zentralen Baustein von zukünftigen Quantencomputern, zu realisieren. Die Wissenschaftler erhoffen sich von ihren Experimenten ferner grundlegende Einblicke in die Mechanismen, die zu Quantenkorrelationen in Vielteilchensystemen führen.

Die hier beschriebenen Experimente wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Exzellenzclusters "Nanosystems Initiative Munich (NIM)" sowie von der Europäischen Union im Rahmen des Projekts "Atomic Quantum Technologies (AQUTE)" gefördert.

Originalveröffentlichung: Max F. Riedel, Pascal Böhi, Yun Li, Theodor W. Hänsch, Alice Sinatra, und Philipp Treutlein; "Atom chip based generation of entanglement for quantum metrology"; Nature, im Druck

www.chemie.de/news/d/116323/

News

Weitere News zu diesem Thema:
www.chemie.de/news/d/more/116323/