

■ Vereint verschränken, getrennt messen

In drei unabhängigen Experimenten gelang es, die Vielteilchenverschränkung in Bose-Einstein-Kondensaten nachzuweisen.

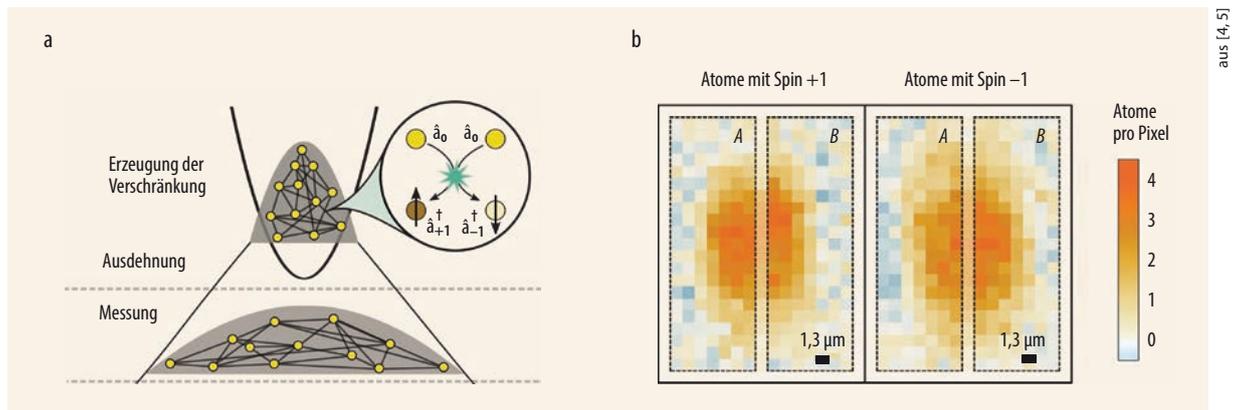


Abb. 1 Zunächst erzeugen Stöße einen Verschränkungszustand zwischen den Atomen eines Bose-Einstein-Kondensats

(a). Nach einer Ausdehnungsphase werden die Spinzustände abgebildet (b). Ein Unterteilen der Abbildung in zwei Region

nen und eine Messung der Varianzen der Gesamtspins in diesen Regionen ergibt schließlich den Grad der Verschränkung.

Erwin Schrödinger bezeichnete 1935 in einem Aufsatz die Verschränkung nicht als *eine*, sondern als *die* entscheidende Eigenschaft der Quantenmechanik [1]. Albert Einstein sah in ihr gar eine „spukhafte Fernwirkung“, da sie bei der Messung eines Quantenobjekts ein anderes weit entferntes augenblicklich und ohne Informationsübertragung beeinflussen kann. Tatsächlich ist die Verschränkung zugleich faszinierend und unheimlich – und bleibt bis heute eine stete Quelle sowohl physikalischer als auch philosophischer Diskussionen.

Zwar belegten eine Reihe von Experimenten in den letzten Jahren eindrucksvoll, dass die messbaren Auswirkungen der quantenmechanischen Verschränkung, etwa in Form der Bellschen Ungleichungen, real sind und dass praktisch alle experimentellen Schlupflöcher geschlossen wurden. Im Big Bell Test[#] wurden dazu kürzlich sogar Menschen als Zufallsgeneratoren eingespannt [2]. Dennoch sind viele Fragen weiterhin offen, insbesondere was die Verschränkung einer großen Zahl von Teilchen betrifft – vor allem dann, wenn diese Teilchen ununterscheidbar sind, wie in einem Bose-Einstein-Kondensat. In diesem haben alle Teilchen dieselbe räumliche Wellenfunktion, sodass das intuitive Bild der Messung an einem Teilchen, die das Ergebnis

einer Messung an einem anderen Teilchen beeinflusst, nicht mehr ohne Weiteres zu gelten scheint. Theoretisch ließ sich schon vor einigen Jahren zeigen, dass es auch unter diesen Umständen sinnvoll ist, von Verschränkung zu sprechen, und dass eine solche Verschränkung als Ressource für Quanteninformationsanwendungen dienen kann [3]. Eine direkte experimentelle Bestätigung dafür blieb jedoch zunächst aus. Nun haben gleich drei Forschungsgruppen unabhängig voneinander gezeigt, dass man in Bose-Einstein-Kondensaten tatsächlich Vielteilchenverschränkung nachweisen kann.

Die Gruppen in Basel [4], Heidelberg [5] und Hannover [6] verwendeten dazu Rubidium-Bose-Einstein-Kondensate. Zwischen einigen hundert und mehreren tausend Rubidiumatomen werden in magnetischen oder optischen Fallen auf weniger als hundert Nanokelvin abgekühlt, sodass alle Teilchen in den gleichen externen Schwingungszustand kondensieren. Aus den internen Freiheitsgraden der Atome lässt sich dann ein Verschränkungszustand herstellen.

Dazu müssen die Atome miteinander wechselwirken, was in den Experimenten mit Hilfe von externen Mikrowellenfeldern und Stößen zwischen den Atomen erreicht wird (Abb. 1a). Die Mikrowellen die-

nen dazu, die Energien bestimmter Hyperfeinzustände so zu verändern, dass bei Stößen zwischen den Atomen Korrelationen zwischen zwei magnetischen Unterebenen mit Spinrichtung +1 und –1 entstehen. Nach einigen Millisekunden sind die Atome im Kondensat miteinander verschränkt. Um dies nachzuweisen, gilt es zuerst dafür zu sorgen, dass die Atome räumlich weit genug voneinander entfernt sind.

Diese räumliche Trennung lässt sich dadurch erreichen, dass man die Falle, die das Kondensat enthält, plötzlich ausschaltet. Angetrieben durch die Wechselwirkungsenergie zwischen den Atomen, dehnt sich das Kondensat für einige Millisekunden selbstständig aus (Abb. 1a). „Selbstständig“ bedeutet dabei, dass die Ausdehnung wie ein Vergrößerungsglas wirkt. In diesem vergrößerten Kondensat lassen sich zwei oder mehr Regionen definieren, in denen eine globale Größe gemessen wird, etwa der Gesamtspin. Dieser ergibt sich aus der Differenz der Anzahl der Atome mit Spinrichtung +1 und derjenigen mit Spinrichtung –1 (Abb. 1b), die mit resonanten Laserstrahlen und einer CCD-Kamera messbar sind. In den Experimenten gelang dies auf unterschiedliche Weise, unter anderem mit Hilfe verschiedener Frequenzen der Laserstrahlen,

#) Website des Projekts: <https://thebigbelltest.org>

Radiofrequenz-Pulsen und inhomogenen Magnetfeldern.

Die Verschränkung der Atome in den verschiedenen Regionen ergibt sich vereinfacht gesagt durch einen Vergleich der Varianzen der Messwerte. Aus diesen Varianzen lässt sich herleiten, ob zum Beispiel eine Messung des Gesamtspins in einer Region A eine Vorhersage des Messresultats in einer unabhängigen Region B ermöglicht. Ist dies der Fall, so sind die Quantenzustände in diesen beiden Regionen nicht separabel: Zwischen ihnen bestehen nichtlokale Quantenkorrelationen. Sind diese Korrelationen stark genug, so kann eine Messung in Region A den Quantenzustand in Region B richtiggehend fernsteuern.

Die Forscher konnten anhand von Ungleichungen, die sich aus den Varianzen ergeben, in allen drei Experimenten zeigen, dass die Atome im Bose-Einstein-Kondensat tatsächlich miteinander verschränkt sind. Ausgehend von dieser Beobachtung widmeten sich die drei Gruppen unterschiedlichen Problemen, die viele der noch offenen Fragen in unserem Verständnis der Vielteilchenverschränkung abarbeiten.

Die Gruppe in Hannover konnte direkt nachweisen, dass die Projektionen des Gesamtspins in den Regionen A und B entlang einer Raumrichtung antikorreliert sind – zeigt eine nach oben, so muss die andere nach unten zeigen [6].

Beim Experiment in Basel wurde der Grad der Verschränkung zwischen Regionen beliebiger Form innerhalb des ausgedehnten Kondensats gemessen (Abb. 2) [4]. Die Physiker machten sich dafür zunutze, dass die zu vergleichenden Regionen *a posteriori* definiert werden können, also nach der Abbildung der Atome verschiedener Spinrichtungen mittels einer CCD-Kamera. Zudem gelang es, die Quantensteuerung (Steering) nachzuweisen und zu zeigen, dass diese unter geeigneten Umständen auch in beide Richtungen, also von A nach B und von B nach A, funktioniert.

Auch in Heidelberg demonstrierten die Forscher, dass Quanten-

steuerung zwischen verschiedenen Regionen des Kondensats möglich ist [5]. Überdies konnten sie zeigen, dass diese Steuerung sich „monogam“ verhält: Entfernt man mehr als ein Drittel des gesamten Kondensats, so ist kein Steering zwischen gleich großen Regionen im Restkondensat mehr möglich.

Mittels einer Unterteilung des Systems in mehrere Regionen war es möglich, aus den Varianzen eine Größe für die Vielparteien-Verschränkung zu berechnen. Dabei ist jede Unterteilung oder Gruppe von Unterteilungen mit dem Rest des Systems verschränkt. Das verhindert, den Quantenzustand des Gesamtkondensats als Summe einzelner Zustände zu beschreiben, von denen jeder bezüglich einer beliebigen Zweiteilung des Systems separabel ist. Auf diese Weise ließ sich echte Fünf-Parteien-Verschränkung nachweisen.

Über die grundlegenden Fragen zur Vielteilchenverschränkung hinaus sind die drei Arbeiten auch für mögliche Anwendungen in neuen Quantentechnologien relevant. Hier wird die Verschränkung als Ressource betrachtet, mit deren Hilfe sich beispielsweise Quantenzustände teleportieren oder extrem genaue Messungen durchführen lassen. Mit den verschränkten

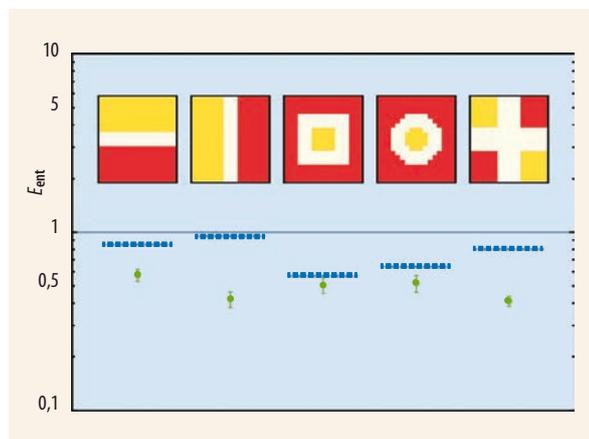


Abb. 2 Das Verschränkungskriterium E_{ent} lässt sich zwischen Regionen beliebiger Form und Größe bestimmen. Falls $E_{\text{ent}} < 1$ gilt, liegt ein Verschränkungszustand vor.

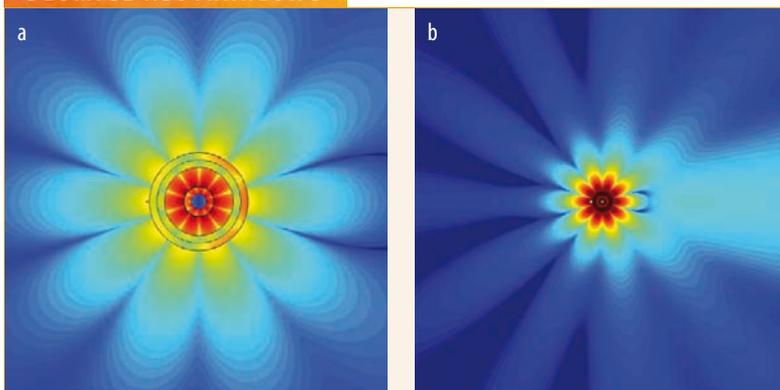
Atomen eines Kondensats könnte man etwa elektromagnetische Feldstärken hochaufgelöst abbilden. Auch Cluster-Zustände für Quantencomputer sollten sich auf diese Weise herstellen lassen.

Oliver Morsch

- [1] E. Schrödinger und M. Born, Proc. Camb. Philos. Soc. **31**, 555 (1935)
- [2] The BIG Bell Test Collaboration, Nature **557**, 212 (2018)
- [3] N. Killoran et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 150501 (2014)
- [4] M. Fadel et al., Science **360**, 409 (2018)
- [5] P. Kunkel et al., Science **360**, 413 (2018)
- [6] K. Lange et al., Science **360**, 416 (2018)

Prof. Dr. Oliver Morsch, INO-CNR Dipartimento di Fisica „Enrico Fermi“, Largo Bruno Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italien

BLUMIGE ABSTRAHLUNG



Optische Nanoantennen dienen dazu, die Wechselwirkung von Licht und Materie zu kontrollieren. Anwendungen finden sich unter anderem in der Raman-Spektroskopie und der drahtlosen Energieübertragung. Kürzlich ist es gelungen, eine Antenne mit einem nadelartigen Abstrahlungsmuster zu entwickeln. Solche gerichteten opti-

schen Nanoantennen könnten in Sensoren oder integrierten optischen Schaltkreisen zum Einsatz kommen. Im Nahfeld dominiert eine drehsymmetrische Struktur (a), während sich im Fernfeld deutlich die gerichtete Abstrahlung zeigt (b).

S. Arslanagić und R. W. Ziolkowski, Phys. Rev. Lett. **120**, 237401 (2018)