

■ Cäsium mag es unrealistisch

Nichtinvasive Messungen atomarer Positionen erlauben die Falsifizierung makrorealistischer Modelle.

#) Ein Beispiel für empirisch erlaubte Modifikationen der Quantenmechanik sind Kollaps-Theorien [2]. Ihre Vorhersagen unterscheiden sich für mikroskopische Freiheitsgrade nicht messbar von der Quantenphysik, auf makroskopischer Ebene verletzen sie das Superpositionsprinzip aber massiv.

Der Mond ist auch dann da, wenn niemand hinsieht. Wer diesen Satz unterschreibt, macht sich die makrorealistische Sicht der Dinge zu eigen: Ein großes Objekt, das sich an klar unterscheidbaren Orten befinden kann, hält sich zu jeder Zeit an einem dieser Plätze auf. In einem Versuch mit Cäsium-Atomen an der Universität Bonn ist es nun erstmals gelungen, eine derart realistische Naturbeschreibung auf atomarer Ebene klar zu widerlegen [1]. Dazu führten Carsten Robens, Andrea Alberti, Dieter Meschede und Kollegen ein Experiment durch, in dem die „Leggett-Garg-Ungleichung“ mit hoher statistischer Signifikanz verletzt wird.

Die Quantentheorie bestätigt sich jeden Tag in unzähligen Laboren. Aus dieser Tatsache darf man jedoch nicht ohne Weiteres schließen, dass sie auch jenseits der betrachteten mikroskopischen Skalen ihre Gültigkeit behält. Gilt vielleicht außerhalb der mikroskopischen Physik eine Theorie, die mit unserer alltäglichen Auffassung der Wirklichkeit weniger radikal bricht als die Quantenmechanik? Erstaunlicherweise lässt sich diese These überprüfen, auch ohne eine konkrete Alternative zur Hand zu haben. Ausgehend von „natürlichen“ Forderungen an eine Klasse solcher alternativen Theorien schließt man dazu auf eine Einschränkung für die Korrelation von Messergebnissen, die durch die

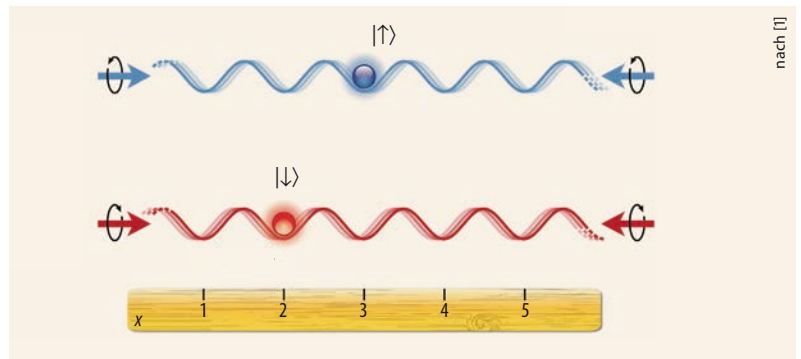


Abb. 1 Das Atom fühlt je nach Stellung seines Spins das Potential der links- bzw. rechts-polarisierten Stehwelle und kann

so abhängig vom internen Zustand beliebig transportiert werden.

Vorhersage der Quantenmechanik verletzt wird. Ein berühmtes Beispiel ist die Bell-Ungleichung, deren lückenlose experimentelle Verletzung ein für alle Mal die Ansicht widerlegt, dass bei weit entfernten Messungen Eigenschaften enthüllt werden, die bereits lokal vorliegen.

Der Makrorealismus ist eine weit verbreitete Haltung in der Physik. Seine Anhänger konstatieren die Gültigkeit der Quantenmechanik, solange mikroskopische Freiheitsgrade betroffen sind, wie es in allen Präzisionsexperimenten und Grundagentests bisher der Fall war. Sie vertreten jedoch den Standpunkt, dass makroskopische Objekte, die klar unterscheidbare Positionen einnehmen können, wie etwa der Zeiger eines Messgeräts, sich zu jedem Zeitpunkt in einem dieser definiten Zustände befinden, niemals aber in einer Superposition. Die Quantenmechanik würde

demnach im Makrokosmos objektiv verletzt.^{#)}

Vor dreißig Jahren gelang es Tony Leggett und Anupam Garg, aus der Forderung des Makrorealismus eine Ungleichung herzuleiten, die nach den Regeln der Quantenmechanik verletzt werden kann [3]. Sie betrachteten dazu eine makroskopisch relevante Größe wie die Lage des Objekts zu drei verschiedenen Zeitpunkten t_1, t_2, t_3 und setzten lediglich voraus, dass sie sich feststellen lässt, ohne das weitere Verhalten des Objekts zu stören. Im einfachsten Fall handelt es sich um dichotome Messresultate, etwa ob sich das Objekt in der rechten oder der linken von zwei möglichen Positionen befindet. Ordnet man diesen Ergebnissen den Wert $Q(t_i) = +1$ bzw. $Q(t_i) = -1$ zu, kann man die beobachteten Korrelationen zu $K = \langle Q(t_2) Q(t_1) \rangle + \langle Q(t_3) Q(t_2) \rangle - \langle Q(t_3) Q(t_1) \rangle$ kombinieren. Verhält sich das System makrorealistisch, besitzen die $Q(t_i)$ also jederzeit einen definiten Wert, so gilt $K \leq 1$. Verletzen die gemessenen Korrelationen dagegen diese Leggett-Garg-Ungleichung, ist die These falsifiziert, dass sich das Objekt makrorealistisch verhält. In den letzten Jahren gelang dieser Nachweis bereits in einigen Experimenten, allerdings an Zwei-Niveau-Systemen, von denen man ohnehin kein makrorealistisches Verhalten erwarten würde [4].

Das neue Experiment verfolgt die Position eines Cäsium-Atoms

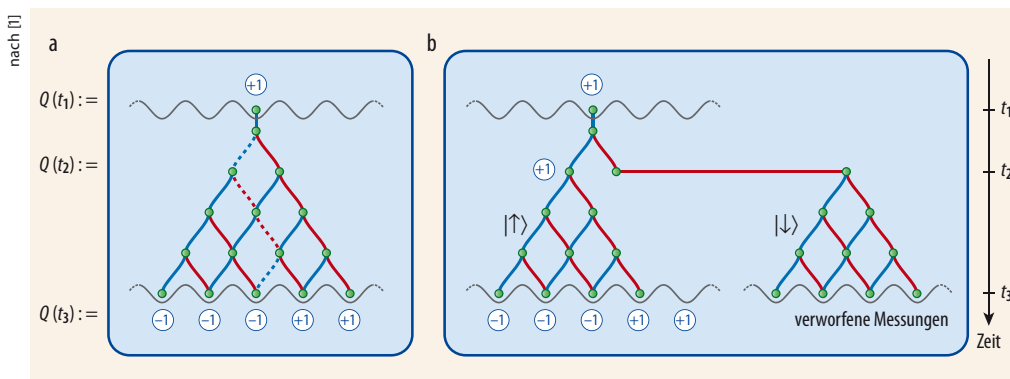


Abb. 2 Mit gezielten Spindrehungen lässt sich die Quantenversion eines Galton-Bretts realisieren (a). Um makrorealistische Theorien mit definiten Trajek-

torien auszuschließen, ist eine nichtinvasive Ortsmessung bei t_2 nötig, die durch den Abtransport nur einer Spinneinstellung bewerkstelligt wird (b).

in einem tiefen optischen Waschbrettpotential und somit eine Observable, die man genauso auch für deutlich größere und massivere Objekte betrachten könnte (Abb. 1). Die Bonner Physiker platzieren das Atom zunächst in einer Potentialmulde und setzen dann die Quantenversion einer symmetrischen Zufallsbewegung in Gang [5]. Für jeden von vier diskreten Zeitschritten strahlen sie dazu einen Mikrowellenpuls ein, der eine gleichmäßige Überlagerung zweier Hyperfeinstruktur-Niveaus herstellt. Mit Hilfe zweier unabhängiger, gegeneinander verfahrbarer optischer Gitter aus orthogonal polarisiertem Licht schieben sie das Atom abhängig vom Spin um eine Mulde nach rechts bzw. links. Aus quantenmechanischer Sicht wird das Atom so über fünf Potentialmulden delokalisiert (Abb. 2a).

Für den Test der Leggett-Garg-Ungleichung messen die Bonner Physiker die Lage des Atoms zunächst im Rahmen der Präparation (t_1), und dann nach dem ersten (t_2) und vierten Zeitschritt (t_3). Hierbei ist die Messung zur Zeit t_2 entscheidend, in der das Teilchen zwischen der Mulde rechts und links von der Ausgangsposition superponiert ist. Die Messung muss nichtinvasiv stattfinden, d. h. ohne die geringste Störung des Atoms. Ein hartnäckiger Makrorealist könnte die Verletzung der Leggett-Garg-

Ungleichung sonst auf den Störeinfluss der Messung schieben (das „Clumsiness-Loophole“ [4]). Eine nichtinvasive Messung ließe sich im Prinzip bewerkstelligen, indem zufällig nur eine der beiden Mulden mit resonantem Licht beleuchtet wird; tritt kein Fluoreszenzlicht auf, wäre klar, dass sich das Atom in der anderen Mulde aufhält. Im anderen Falle wäre der Durchgang zu verwerfen. Das Bonner Experiment geht aus technischen Gründen einen anderen Weg und verwendet die eindeutige Korrelation zwischen Muldenposition und Spin nach dem ersten Schritt (Abb. 2b). Für eine Stellung des Spins wird das Atom in Ruhe gelassen, für die andere wird es derart weit weg transportiert, dass sich bei der direkten Ortsmessung am Ende der Sequenz auch auf die Position nach dem ersten Schritt schließen lässt. Ein kleiner Wermutstropfen dieser nachgelagerten Detektionsmethode ist, dass ihre Störungsfreiheit für einen Makrorealisten nicht direkt überprüfbar ist.

Die im Experiment beobachteten Korrelationen verletzen die Leggett-Garg-Ungleichung mit einer Signifikanz von sechs Standardabweichungen. Damit ist auf beeindruckende Weise der Nachweis gelungen, dass das Verhalten des Atoms durch keine wie auch immer geartete makrorealistische Theorie zu erklären ist. Man mag

einwenden, dass ein einzelnes Cäsium-Atom kein besonders großes Objekt darstellt und die Mikrometer-Abstände zwischen den Positionen nicht besonders makroskopisch sind. Verglichen mit direkten Tests des Superpositionsprinzips [6] fällt der hier realisierte Grad an Makroskopizität in der Tat eher bescheiden aus, wenn man ein kürzlich vorgeschlagenes Maß [7] zugrunde legt. Die Bedeutung des Experiments liegt aber darin, dass es prototypisch aufzeigt, wie sich makrorealistische Vorstellungen umfassend und unangreifbar falsifizieren lassen. So bleibt zu hoffen, dass dieses Experiment ein Ansporn ist, die Quantenmechanik auch auf deutlich makroskopischeren Skalen zu testen und die Debatte um die Grenzen der Quantenphysik dorthin zu führen, wo sie sich beantworten lässt: ins Physiklabor.

Klaus Hornberger

- [1] C. Robens et al., Phys. Rev. X **5**, 011003 (2015)
- [2] A. Bassi et al., Rev. Mod. Phys. **85**, 471 (2013)
- [3] A. J. Leggett und A. Garg, Phys. Rev. Lett. **54**, 857 (1985)
- [4] C. Emary, N. Lambert und F. Nori, Rep. Prog. Phys. **77**, 016001 (2014)
- [5] M. Karski et al., Science **325**, 174 (2009)
- [6] M. Arndt und K. Hornberger, Nature Phys. **10**, 271 (2014)
- [7] S. Nimmrichter und K. Hornberger, Phys. Rev. Lett **110**, 160403 (2013)

FRUSTRIERTER WÜRFEL

Acht magnetische Dipole, die frei drehbar an den Ecken eines Würfels sitzen, das klingt nach einem System von überschaubarer Komplexität (unten). Weit gefehlt! Wie Physiker aus Göttingen und Bayreuth kürzlich gezeigt haben, gibt es



1594 032 diskrete Gleichgewichtslösungen. Von diesen sind 9536 reell und fallen in 183 Familien unterschiedlicher Energie. Allerdings sind diese Lösungen alle instabil. Einzig stabil ist der Zustand niedrigster Energie, bei dem die Rotation eines Dipols um die Würfeldiagonale dazu führt, dass die sieben anderen Dipole ebenfalls rotieren. Da jede Orientierung die gleiche Energie aufweist, handelt es sich um eine so genannte Goldstone-Mode, die in vielen Bereichen der Physik eine wichtige Rolle spielt. In diesem Zustand sind die Dipole zudem frustriert, weil sie sich parallel ausrichten möchten. Doch das ist aufgrund der drei konkurrierenden Ebenen nicht möglich. Die simultane Rotation der acht Dipole ohne Energiebarriere ermöglicht es,



eine reibungsfreie magnetische Kuppelung zu konstruieren (oben).

J. Schönke et al., Phys. Rev. B **91**, 020410 (2015)