

Photodiode tun. Doch die Photonen schienen sich nicht um Bewegung zu kümmern. So wie es wohl der Großteil der Physiker vorausgesagt hätte, blieben die Korrelationen so gut wie eh und je.

Für Suarez und Scarani war das jedoch noch keine lupenreine Widerlegung ihrer Theorie. Das Bezugssystem könnte nicht durch die Detektoren definiert sein, so ihre Antwort, sondern durch die Strahlteiler – entsprechend unseren Polarisatoren –, an denen die Photonen „ihre Wahl treffen“.

Im neuen Experiment sind nun die Strahlteiler bewegt (Abb. 2). Wie bei Experimenten zur Relativitätstheorie üblich, musste die Testgeschwindigkeit möglichst hoch sein. Es war also aussichtslos, echte Glasstrahlteiler so schnell zu bewegen, dass ein messbarer Effekt zu erwarten gewesen wäre. Als Strahlteiler fungierten daher laufende Schallwellen im Kristall eines akusto-optischen Modulators. Diese Schallwellen zwingen das Photon, sich für einen der beiden folgenden, stationären Detektoren zu entscheiden. Die Schallwellen im linken Modulator bewegen sich in gerader Linie von denen im rechten weg, sodass genau die für Suarez und Scarani paradoxe Situation eintritt, in der jedes Photon für sich gesehen zuerst gemessen wird und seinen „Zwillingsbruder“ beeinflussen müsste. Dadurch sollte in dieser Theorie die perfekte Übereinstimmung der Messergebnisse zusammenbrechen.

Wie nicht anders zu erwarten, behielt die Quantenphysik in ihrer traditionellen Version die Oberhand: Die Messergebnisse waren genauso korreliert wie mit feststehenden Strahlteilern. Suarez schließt daraus, dass das Konzept Zeit in der Quantenwelt keinen Sinn macht. Eine gewagte Behauptung. Sollte er nicht vielleicht eher ein paar Abstriche an seinem realistischen Bild von geisterhafter Fernwirkung machen?

GREGOR WEIHS

- [1] A. Stefanov, H. Zbinden, N. Gisin und A. Suarez, www.arXiv.org/quant-ph/0110117 (2001).
 [2] A. Suarez und V. Scarani, *Phys. Lett. A* **232**, 9 (1997).
 [3] H. Zbinden, J. Brendel, N. Gisin und W. Tittel, *Phys. Rev. A* **63**, 022111 (2001).

Diskrete Neutronen

Mit ultrakalten Neutronen ist es gelungen, quantisierte quantenmechanische Zustände im Gravitationspotential nachzuweisen

Ein quantenmechanisches Teilchen, das in einem Potentialtopf „eingesperrt“ ist, kann nur diskrete Energiewerte annehmen – dies ist eines der ersten und zentralen Ergebnisse jeder Quantenmechanik-Vorlesung. Welche Wechselwirkung diesem Potential zugrunde liegt, spielt dabei keine Rolle; sei es beispielsweise die Coulomb-Kraft, die für die diskreten Elektronen-Zustände im Atom verantwortlich ist, sei es die starke Kraft, die zu den gebundenen Nukleonen-Zuständen im Atomkern führt. Bereits 1978 hatten V. Lushikov et al. vorhergesagt, dass es mit Neutronen auch möglich sein sollte, diskrete quantenmechanische Zustände aufgrund der Gravitationswechselwirkung zu beobachten [1]. Kürzlich ist es nun der Gruppe um V. Nesvizhevsky am Hochflussreaktor des Instituts Laue-Langevin in Grenoble gelungen, diese Quantisierung mit ultrakalten Neutronen zu beobachten [2].

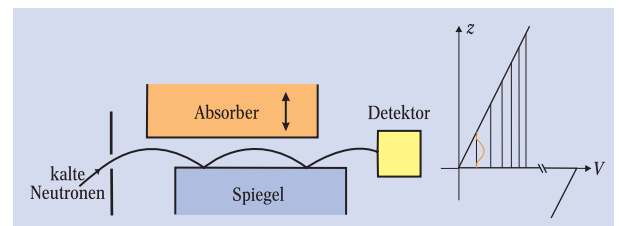
Neutronen eignen sich besonders gut, um den Einfluss der Gravitation auf Quantenteilchen zu untersuchen, da sie elektrisch neutral und verglichen mit anderen Elementarteilchen sehr langlebig sind. Parabelförmige Neutronenbahnen aufgrund der Gravitation sind bereits seit 1951 bekannt [3] und führten zur Entwicklung des von Heinz Maier-Leibnitz vorgeschlagenen und von L. Köster realisierten Gravitationspektrometers. Später sorgten R. Colella, A. Overhauser und S. Werner mit ihrem Neutroneninterferometer für Aufmerksamkeit, in dem sie die Phasenverschiebung eines Neutrons aufgrund des Gravitationsfeldes der Erde beobachteten (COW-Experiment, [4]). Ebenso gelang es, den Einfluss der Coriolis-Kraft auf Neutronen nachzuweisen. In all diesen Fällen lässt sich eine Verbindung zwischen träger und schwerer Masse herstellen, da die kinetische Energie durch die träge und die potentielle Energie der Neutronen im Gravitationsfeld durch die schwere Masse bestimmt wird. Die erreichte Genauigkeit bezüglich der Äquivalenz beider Massen liegt im Bereich 10^{-4} , ein Wert, der durch atominterferometrische Messungen allerdings wesentlich überboten wird [5].

Nesvizhevsky und Kollegen nutzen bei ihrem Experiment aus, dass die Kombination von Gravitationspotential ($V_g = m g z$) mit dem abstoßenden Potential oberhalb eines waagrecht Neutronenspiegels ($V = 2\pi N b_c / m$) zu einem Dreieckspotential führt, in dem sich diskrete Zustände ausbilden. Hierbei ist N die Teilchendichte, b_c die kohärente Streulänge sowie m die Neutronenmasse. Die Bindungsenergien sind mit wenigen Pico-Elektronenvolt allerdings extrem gering und machen sich daher nur bei ultrakalten Neutronen bemerkbar, die sich in vertikaler Richtung nur mit Geschwindigkeiten von wenigen Zentimetern pro Sekunde bewegen dürfen. Besetzt ein Neutron zum Beispiel den niedrigsten Zustand, so hat die ortsabhängige Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei den Parametern des Experiments ein Maximum bei einem Abstand von $10 \mu\text{m}$ von der Oberfläche.

Die Physiker aus Frankreich, Deutschland (Universität Heidelberg) und Russland richteten den Strahl aus ultrakalten Neutronen, die auf eine horizontale Geschwindigkeit unter 10 m/s abgebremst worden waren, so aus, dass die Neutronen – in einem klassischen Teilchenbild – nach dem Durchlaufen einer Wurfparabel am Spiegel (mehrfach) reflektiert wurden, bevor sie auf einen Detektor trafen (Abbildung). Mithilfe eines Absorbers, dessen Abstand zum Spiegel variabel war, ließen sich Neutronen, die in vertikaler Richtung zu schnell waren, herausfiltern. Gemessen wurde nun die Zählrate des Detektors in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Spiegel und Absorber, mit dem Ergebnis, dass bei sehr kleinen Spaltbreiten praktisch keine Neutronen die Anordnung passieren und die Neutronen-Zählrate erst mit zunehmender Spaltbreite zunimmt, und zwar stufenweise! Auf diese Art und Weise gelang es, die Quantisierung des ersten Zustandes nachzuweisen – die Transmission setzt bei einem Abstand von $10 \mu\text{m}$ schlagartig ein – und Andeutungen der Quantisie-

rung der nächst höheren zu beobachten. Diese Ergebnisse sind eine experimentelle Meisterleistung, die sich aber im Rahmen bestehender Theorien vollständig erklären lassen.

Hinsichtlich der Frage nach der Äquivalenz von träger und schwerer Masse scheint es selbst bei längeren Messzyklen unwahrscheinlich, dass man mit dieser Apparatur an die bisher erreichte Genauigkeit mit Atominterferometern herankommen kann. Auch soll betont werden, dass diese Messungen die Quantisierung der Neutronen im *klassischen* Gravitationsfeld nachweisen, aber nicht direkt neue Aspekte zur Quantengravitation lie-



Zum Nachweis der quantisierten Zustände im Gravitationspotential werden ultrakalte Neutronen über einen Neutronenspiegel geführt und anschließend detektiert. Der niedrigste Zustand im Dreieckspotential, das sich aus dem Gravitationspotential und dem abstoßenden Potential des Spiegels ergibt, hat eine maximale Aufenthaltswahrscheinlichkeit in einem Abstand von ca. $10 \mu\text{m}$ vom Spiegel. Überschreitet der Abstand zwischen Absorber und Spiegel diesen Wert, so setzt die Transmission durch die Apparatur schlagartig ein.

fern. Diese Experimente stoßen jedoch in den Bereich der Neutronspektroskopie bei Pico-Elektronenvolt vor und zeigen deutlich die aufgrund der Quantenmechanik erwartete Quantisierung im Gravitationsfeld und eine Art „Berührungsangst“ der Neutronen mit der Oberfläche. Daraus können sich unter anderem neue Aspekte für Oberflächenuntersuchungen ergeben.

HELMUT RAUCH

- [1] V. I. Lushikov et al., JETP **28**, 559 (1978)
- [2] V. V. Nesvizhevsky et al., Nature **415**, 297 (2002)
- [3] A.W. McReynolds, Phys. Rev. **83**, 233 (1951)
- [4] R. Colella, A.W. Overhauser, S. A. Werner, Phys. Rev. Lett. **34**, 1472 (1975)
- [5] K. Kasevich, S. Chu, Appl. Phys. **B54**, 321 (1992)

Prof. Dr. Helmut Rauch, Atominstytut der Österreichischen Universitäten, Stadionallee 2, A-1020 Wien