

Quantenspuk ist nicht relativ

Zu den kuriosesten Phänomenen der Quantenwelt gehören die scheinbaren „Fernwirkungen“ verschränkter Photonen. Ein neues Experiment zeigt: Quantenkorrelationen bleiben selbst dann erhalten, wenn die „Gleichzeitigkeit“ der Messung relativ ist.

Während uns bald in jedem Forschungsantrag der Quantencomputer begegnet, sind viele fundamentale Fragen der Quantenphysik auch heute noch unbeantwortet, vor allem, wenn es um den Messprozess geht. Den verbleibenden Spielraum zwischen Quantenmes-

dererseits sind die Fragen, die in der Interpretation der Quantenphysik auftreten, im Zusammenhang mit Relativität und Kausalität noch brennender. Während die von der Schrödinger-Gleichung bzw. ihren relativistischen Äquivalenten beschriebene deterministische Zeitentwicklung eines Zustands im Allgemeinen keine Probleme mit der Kausalität verursacht, gibt uns das Konzept der Messung eine harte Nuss zu knacken. Immer wenn wir an einem System eine Messung machen, gibt uns der Quantenzustand zwar ein Maß für die zu erwartenden Wahrscheinlichkeiten, aber der Ausgang ist meist nach wie vor unbestimmt. Nach der Messung haben

auf das andere Photon schließen, die Ergebnisse sind „korreliert“.

Wenn wir z. B. das linke Photon hinter einem vertikal orientierten Polarisator finden, schließen wir, dass es jetzt vertikal polarisiert ist. Nun dürfen wir sofort mit Fug und Recht behaupten, dass das andere ebenso vertikal polarisiert ist, auch wenn es meilenweit entfernt ist. Wenn man der durchaus umstrittenen Meinung ist, dass diese, oft „Reduktion“ genannte Veränderung des Zustands ein realer Vorgang ist, dann muss man auch erklären, wie sich trotz der großen Entfernung eine reale Änderung am anderen Photon ergibt, oder zumindest wann diese stattfindet.

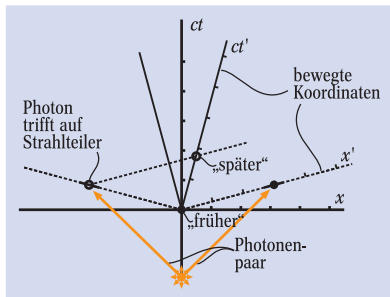


Abb. 1: Raum-Zeit-Diagramm für zwei verschränkte Photonen, die im Laborsystem (x, t) gleichzeitig auf zwei Strahlteiler treffen. Die Strahlteiler entfernen sich voneinander. Im bewegten System schließt ein mitlaufender Beobachter, dass das Photon im anderen System (x', t') „später“ auf den Strahlteiler trifft. Nach einer neuen Theorie müssten die Quantenkorrelationen zusammenbrechen, weil Ursache und Wirkung in den Bezugssystemen vertauscht sind.

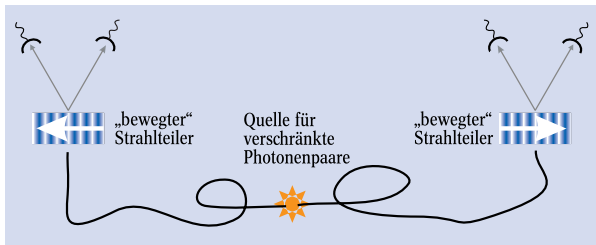


Abb. 2: Vereinfachter Aufbau des Experiments zur „multiplen Gleichzeitigkeit“. Die Quelle – ein nichtlinearer Kristall – emittiert verschränkte Photonenpaare. Die laufenden Schallwellen dienen als bewegte Strahlteiler. Gemessen werden Korrelationen zwischen Detektorklicks links und rechts. Das Ergebnis stimmt mit den Vorhersagen der Quantentheorie überein.

sung und Relativität versuchten Nicolas Gisin und seine Mitarbeiter an der Universität Genf kürzlich weiter einzuengen [1]. Dazu unterwarfen sie verschränkte „Zwillingsphotonen“ verschiedenen „Gleichzeitigkeiten“ im Versuch, deren zwillingshaftes Verhalten zu stören. Aber die Zwillinge behielten die Oberhand. Es scheint, als könne fast nichts die quantenphysikalischen Korrelationen stören.

Das Zusammenspiel von Quantenphysik und Relativitätstheorie ist in vieler Hinsicht ungeklärt. Einerseits wissen wir nicht, wie wir die Gravitation quantisieren sollen, an-

wir einen neuen Informationsstand und müssen konsequenterweise dem gemessenen System den entsprechenden neuen Zustand zu beschreiben. Wenn man nun glaubt, dass der Quantenzustand etwas Objektives bzw. Reales ist, so heißt das, dass die Messung den Zustand verändert hat.

Das ganze bliebe wahrscheinlich ein Streit unter Philosophen, wenn es nicht so genannte verschränkte Zustände gäbe. So können zwei Photonen, die aus einer gemeinsamen Quelle stammen, über beliebige weite Entfernungen wie ein zusammenhängendes Ganzes beschrieben werden. Stellen wir uns vor, ein System aus zwei derart verschränkten Photonen habe die folgenden Eigenschaften: Wenn wir die beiden Photonen jeweils auf einen Polarisator treffen lassen und beide Polarisatoren gleich ausgerichtet sind, sollen immer beide Photonen reflektiert oder beide transmittiert werden. Außerdem soll die Wahrscheinlichkeit, dass das individuelle Photon transmittiert wird, genau 50 % betragen. Damit ist der Quantenzustand auch schon vollständig beschrieben, mit einer wichtigen Konsequenz: Wenn wir eine Messung des einen Photons durchführen, können wir mit Sicherheit

An diesem Punkt setzten die Schweizer Forscher an, ein realistisches Modell der Quantenphysik von Suarez und Scarani zu testen [2]. Wenn, so behauptet das Modell, das eine Photon vor dem anderen gemessen wird, dann ist klar, in welche Richtung die Beeinflussung laufen wird. In einem relativistischen Bild ist aber die zeitliche Ordnung zweier Ereignisse überhaupt nicht eindeutig, sondern abhängig vom gewählten Bezugssystem (Abb. 1). Was in dem einen System als gleichzeitig gesehen wird, ist im anderen noch lange nicht gleichzeitig.

Dasselbe gilt, wenn wir die beiden Photonen in verschiedenen Bezugssystemen messen: Wir werden Schwierigkeiten haben zu sagen, welche Messung zuerst den Zustand des anderen Photons verändert. In ihrer Theorie fanden Suarez und Scarani das entscheidende Bezugssystem im Ruhesystem des jeweiligen Messapparats. Wenn es also möglich wäre, beide Photonen einer schnell bewegten Messung zu unterwerfen, dann könnte man die Gleichzeitigkeit durch die relative Bewegung der beiden Messapparate zueinander steuern. Die Hypothese der Theorie: Wenn beide Photonen in ihrem eigenen Bezugssystem „glauben“, zuerst gemessen zu werden, sollten die mysteriösen Quantenkorrelationen verschwinden.

In einem ersten Versuch vor zwei Jahren brachten Gisin und seine Kollegen in Genf die Relativität ins Spiel, indem sie einen Detektor durch einen rotierenden Lichtabsorber ersetzen [3]. Dieser sollte einem bewegten Detektor entsprechen, auch wenn die geschluckten Photonen kein messbares Signal auslösen würden, wie sie es in einer

Dr. Gregor Weihs,
Ginzton Laboratory,
Stanford University,
gregor.weihs@stanford.edu

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].