

Garching, 14. April 2013

Presse-Information

„Spukhafte Fernwirkung“ in der Quantenwelt steht kurz vor ihrer endgültigen Bestätigung

Physiker schließen letztes *lokal realistisches Schlupfloch* für verschränkte Photonensysteme.

Im Alltag ist es für uns eine Selbstverständlichkeit, dass die Eigenschaften von Gegenständen unabhängig von ihrer Beobachtung existieren, und dass eine Veränderung dieser Eigenschaften immer durch eine unmittelbare, lokale Einwirkung erfolgen muss. In der Quantenwelt dagegen gelten andere Gesetze: So wird die Eigenschaft eines Teilchens erst bei seiner Messung festgelegt, und zwei verschränkte Teilchen scheinen auch über große Distanzen nicht-lokal zusammenzuhängen. Zahlreiche Experimente weltweit haben diese Fundamente der Quantentheorie mittlerweile bestätigt. Doch letzte Zweifel daran konnten bislang nicht vollständig ausgeräumt werden. Verteidiger des in der klassischen Welt geltenden „lokalen Realismus“ berufen sich auf mehrere Arten von „Schlupflöchern“, um ihr Weltbild zu retten. Physiker aus der Gruppe von Prof. Anton Zeilinger am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) in Wien haben vor kurzem das letzte Schlupfloch für Lichtquanten geschlossen. Von theoretischer Seite wurde die Arbeit durch Dr. Johannes Kofler unterstützt, der in der Abteilung Theorie von Prof. Ignacio Cirac am Max Planck Institut für Quantenoptik (MPQ) forscht. An den Experimenten haben Wissenschaftler der Gruppe von Dr. Sae Woo Nam am National Institute of Standards (NIST) in Boulder, USA, sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig mitgewirkt. Die Ergebnisse wurden in dieser Woche in der Fachzeitschrift *Nature* (14.04.2013, AOP, DOI: 10.1038/nature12012) veröffentlicht.

Unter lokalem Realismus versteht man ein Weltbild, in dem die Eigenschaften physikalischer Objekte unabhängig davon feststehen, ob sie von irgendjemandem wahrgenommen werden (Realismus), und in der sich keine physikalische Wirkung schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann (Lokalität). 1964 bewies der irische Physiker John Bell in einer der wichtigsten Arbeiten der Grundlagen der Quantentheorie, dass lokaler Realismus im Widerspruch zu den Vorhersagen der Quantenmechanik steht, und dass die Entscheidung zwischen diesen so radikal verschiedenen Weltbildern durch ein Experiment gefällt werden kann.

Für einen solchen Bell-Test verwendet man verschränkte Teilchen. Der Begriff der Verschränkung wurde von dem österreichischen Physiker Erwin Schrödinger geprägt. Für den Fall zweier miteinander verschränkter Photonen (Lichtquanten) beinhaltet er, dass zwar keines der Teilchen für sich genommen eine definierte Polarisation besitzt. Misst man jedoch die Polarisation eines Photons und erhält dafür ein zufälliges Ergebnis, dann ist die Polarisation des anderen Teilchens damit festgelegt, d.h. perfekt korreliert. Diesen seltsamen Effekt bezeichnete Albert Einstein als „spukhafte Fernwirkung“.

Im Experiment werden zunächst Paare von verschränkten Photonen erzeugt. Von jedem Paar wird ein Photon zu Beobachter A (genannt Alice), das andere zu Beobachter B (Bob) geschickt. Alice und Bob treffen jeweils eine Wahl, wel-

Presse- und
Öffentlichkeitsarbeit
Dr. Olivia Meyer-Streng

Tel.: 089 / 32 905-213
E-Mail: olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de

Hans-Kopfermann-Str. 1
D-85748 Garching

Tel.: 089 / 32 905-0
Fax: 089 / 32 905-200

che Polarisationsrichtung sie messen wollen. Wie oben erwähnt, sollten die beobachteten Messwerte der beiden Photonen gemäß der Quantentheorie stark korreliert sein. (Diese Eigenschaft der Verschränkung wird in der sogenannten Quanteninformation beispielsweise dafür genutzt, um absolut abhörsichere Informationsübertragung zu ermöglichen). Bell zeigte mithilfe einer mittlerweile nach ihm benannten Ungleichung, dass es für die Stärke der Korrelationen in jeder lokal realistischen Theorie eine obere Grenze gibt, die von den Vorhersagen der Quantentheorie verletzt wird.

In den letzten Jahrzehnten wurde die Verletzung der „Bellschen Ungleichung“ in zahlreichen Experimenten bestätigt, sowohl mit Lichtquanten als auch mit Atomen. Allerdings gibt es für die Verteidiger des lokalen Realismus drei Arten von „Schlupflöchern“ – d.h. Möglichkeiten, dass die beobachteten Korrelationen, obschon sie die Bellsche Ungleichung verletzen, doch noch im Rahmen von lokal realistischen Theorien erklärbar sind. Das eine bezieht sich auf die *Lokalität* der Ereignisse. Hier wird angenommen, dass das Messresultat auf einer Seite durch ein schnelles und verstecktes Signal von der anderen Seite beeinflusst wird. In ähnlicher Weise geht das Schlupfloch, das die „freie Wahl“ betrifft, davon aus, dass die lokal realistischen Eigenschaften des Teilchenpaares die von Alice und Bob getroffene Wahl beeinflussen. Mit erheblichem experimentellem Aufwand sind diese beiden Schlupflöcher für Photonen mittlerweile geschlossen worden. Dabei wurde in den Experimenten zum einen dafür gesorgt, dass Alice und Bob räumlich sehr weit voneinander getrennt sind. Zum andern wurden die Zeitpunkte der Paarerzeugung, der Auswahl der Messeigenschaften und der Messung selbst mit extrem großer Genauigkeit bestimmt. Unter diesen Bedingungen ließen sich die gemessenen Korrelationen allenfalls durch Signalübermittlung mit Überlichtgeschwindigkeit erklären – die aber ist im lokal realistischen Weltbild nicht gestattet.

Doch es gibt noch ein drittes Schlupfloch – genannt „*Fair Sampling*“. Dabei führen die lokalen Realisten die Verletzung der Bellschen Ungleichung darauf zurück, dass nur ein Bruchteil der erzeugten Teilchenpaare gemessen wird. Die beobachteten Teilchen betrachten sie als nicht repräsentativ für das ganze Ensemble, als „unfair“. Die Gesamtheit der Teilchen würde dagegen der Bellschen Ungleichung genügen.

Für Photonen konnte dieses Schlupfloch bislang nicht geschlossen werden, zumal es hier besonders schwierig ist, Teilchenverluste an der Teilchenquelle oder am Detektor zu vermeiden. „Der Erfolg des Wiener Experiments beruht zum einen auf technischen Errungenschaften“, erklärt Dr. Johannes Kofler. „Es wurde eine neuartige Quelle für die Erzeugung verschränkter Photonenpaare verwendet, des Weiteren Techniken, die geringe Durchgangsverluste ermöglichten, und moderne supraleitende Detektoren.“ So konnten insgesamt 75% aller verschränkten Photonen gemessen werden. „Diese Effizienz reicht für einen Test der originalen Bell-Ungleichung nicht aus“, so Kofler. „Allerdings hat vor rund 20 Jahren der Physiker Philippe Eberhard vom Lawrence Berkeley Laboratory in den USA eine Formulierung der Bellschen Ungleichung gefunden, welche die nicht nachgewiesenen Photonenpaare explizit einschließt – dann genügt es, wenn man zwei Drittel aller Photonen detektiert. Durch die hohe Effizienz des Wiener Experiments und die Anwendung der Eberhardschen Ungleichung konnten wir nun erstmals das Fair-Sampling-Schlupfloch für Photonen schließen.“

Mit diesem Ergebnis wurden für Photonen alle lokal realistischen Schlupflöcher ausgeschlossen, allerdings in jeweils unterschiedlichen Experimenten. Nun fehlt nur noch das allerletzte Beweisstück – ein finales und definitives Experiment, in dem die Bellsche Ungleichung verletzt wird und gleichzeitig alle Schlupflöcher geschlossen sind. Es ist noch nicht klar, ob dies zuerst für Photonen oder für Atome (für die bislang nur das Fair-Sampling-Schlupfloch versperrt wurde) oder vielleicht für ganz andere Quantensysteme erreicht werden wird. Wenn es gelingt, bleiben nur noch zwei radikale Erklärungsmöglichkeiten: Entweder, es gibt in der Natur eine verborgene Form der Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit, oder wir leben in der Tat in einer Welt, in der physikalische Eigenschaften unter bestimmten Bedingungen nicht unabhängig von ihrer Beobachtung existieren. In beiden Fällen wäre, 50 Jahre nach seiner Formulierung, der lokale Realismus ein für alle Mal widerlegt.

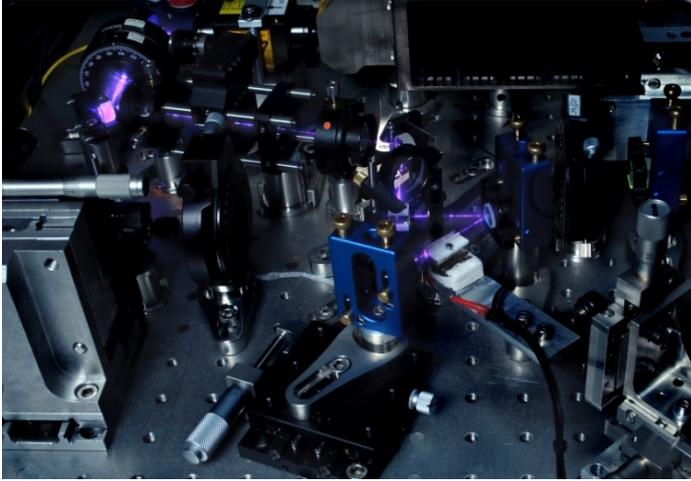


Abb.: Experimenteller Aufbau zur Überprüfung der Bellschen Ungleichung
(Foto: IQOQI Wien, Jacqueline Godany 2012)

Originalveröffentlichung:

Marissa Giustina, Alexandra Mech, Sven Ramelow, Bernhard Wittmann, Johannes Kofler, Jörn Beyer, Adriana Lita, Brice Calkins, Thomas Gerrits, Sae Woo Nam, Rupert Ursin, and Anton Zeilinger

Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption

Nature, 14. April 2013, Advance Online Publication, DOI:10.1038/nature12012

e-print: <http://arxiv.org/abs/1212.0533>

Kontakt:

Dr. Johannes Kofler
Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ)
Hans-Kopfermann-Str. 1
85748 Garching, Germany
Tel.: +49 (0)89 32905 -242
E-Mail: johannes.kofler@mpq.mpg.de