



Der Nobelpreis für Physik 2022 an Alain Aspect, John F. Clauser und Anton Zeilinger für Experimente mit verschränkten Photonen.

Verschränkte Quantenzustände – von der Theorie zur Technologie

In ihren bahnbrechenden Experimenten haben Alain Aspect, John Clauser und Anton Zeilinger jeweils verschränkte Quantenzustände erforscht. Dabei verhalten sich zwei Teilchen, selbst wenn sie getrennt werden, wie eine einzige Einheit. Die Wissenschaftler haben mit ihren Erkenntnissen den Weg für neue Technologien auf der Grundlage der Quanteninformatik geebnet.

Heute existiert ein großes Forschungsgebiet, das sich mit Quantencomputern, Quantennetzwerken und sicherer quantenverschlüsselter Kommunikation beschäftigt. Den diesjährigen Physik-Nobelpreisträgern gelangen im Rahmen dieser Entwicklungen einige entscheidende Durchbrüche. Alle drei nutzten ein bedeutsames Phänomen der Quantenmechanik, die sogenannte Verschränkung. Verschränkte Teilchen weisen gemeinsame Quanteneigenschaften auf.

Laut Quantenmechanik können Teilchen, bevor sie gemessen werden, undefinierte Eigenschaften aufweisen. Ihr Zustand ist nicht festgelegt, sondern kann eine Kombination aller Möglichkeiten umfassen – jede mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, gemessen zu werden. Nach dem Messen bleibt nur eine Möglichkeit übrig. Verschränkte Photonen (Lichtteilchen) zum Beispiel können parallel zueinander polarisiert sein, selbst wenn die Richtung dieser Polarisation unklar ist, bis eine Messung erfolgt.

Die Messung eines Photons eines solchen verschränkten Paares legt die Polarisationsebene fest. Gleichzeitig wird dadurch das Messergebnis für das andere Teilchen bestimmt, selbst wenn sich dieses Hunderte Kilometer entfernt befindet. Anscheinend kann jedes Teilchen erkennen, was

mit dem anderen Teilchen geschieht, obwohl sie untereinander keine Signale austauschen können.

Lange Zeit fragte man sich, ob die Teilchen in einem verschränkten Paar lokale verborgene Variablen aufweisen, beispielsweise eine Anleitung, die beschreibt, wie das Ergebnis eines Experiments aussehen wird. In den 1960er Jahren entdeckte John Stewart Bell, dass es Fälle gibt, in denen die Quantenmechanik ein Ergebnis vorhersagt, das sich durch lokale verborgene Variablen nicht erklären lässt. Auf diese Weise ließ sich überprüfen, welche Beschreibung korrekt ist.

John Clauser und einige seiner Kolleg*innen entwickelten Bells Idee weiter, bis sie sich für die Anwendung bei Versuchen mit Photonen eignete. Der Trick war, die Polarisation zweier verschränkter Photonen in verschiedenen Ebenen zu messen.

Alain Aspect wiederum verbesserte dieses Experiment. Und Anton Zeilinger führte später verschiedene Versuche mit verschränkten Zuständen im Rahmen der Quantenkommunikation durch. Dabei machte er sich die Eigenart eines Lasers zunutze, zahlreiche verschränkte Photonenpaare zu erzeugen, wenn er auf eine spezielle Art von Kristall gerichtet wird.

Eine Fernbeziehung

Die Verschränkung zweier Teilchen kann erfolgen, wenn beide in einer Reaktion erzeugt werden, die ihnen eine gemeinsame Quanteneigenschaft zuweist. Diese Eigenschaft vereint sie und macht sie zu einer einzigen Einheit, selbst wenn sie in verschiedene Richtungen ausgesendet werden.

Bellsche Ungleichung

John Bell formulierte eine mathematische Ungleichung, die für die Korrelation zwischen den Ergebnissen aus einer Reihe von wiederholten Experimenten gilt, wenn es versteckte Variablen gibt. Die Quantenmechanik erlaubt jedoch Ergebnisse, die diese Ungleichung verletzen.

Die Quantenmechanik hat Recht

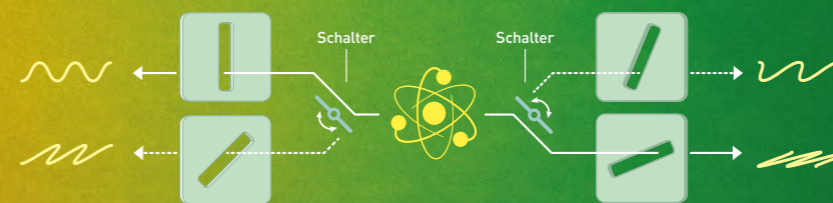
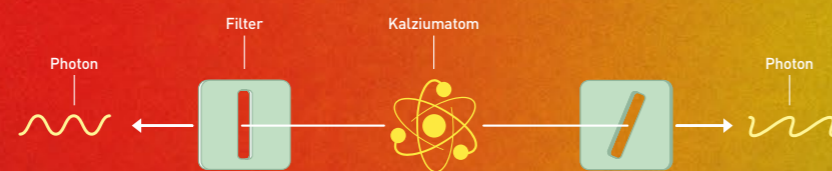
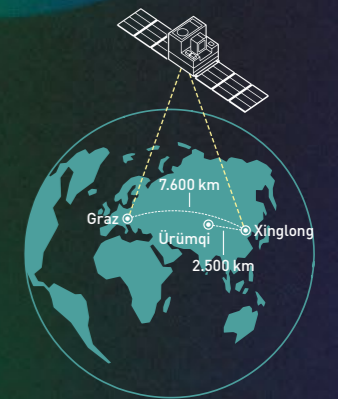
John Clauser arbeitete mit Kalziumionen, die nach Bestrahlung mit einem speziellen Licht verschränkte Photonen emittieren können. Er installierte auf beiden Seiten einen Filter, um die Polarisation der Photonen zu messen, wobei jeder Filter in einem anderen Winkel eingestellt wurde. Nach einer Messreihe konnte er zeigen, dass die Ergebnisse die Bellsche Ungleichung verletzen, jedoch mit der Quantenmechanik in Einklang standen.

Eine Lücke wird geschlossen

Alain Aspect wandte bei diesem Experiment eine neue Technik zur Anregung der Atome an, bei der sie eine größere Anzahl verschränkter Photonen emittierten. Darüber hinaus konnte er zwischen verschiedenen Einstellungen hin- und herschalten, sodass das System keine Vorabinformationen enthielt, die die Ergebnisse beeinflussen und das von der Quantenmechanik vorhergesagte Verhalten imitieren konnten.

Kommunikation und Verschlüsselung

Anton Zeilinger führte zahlreiche Versuche durch, bei denen verschränkte Quantenzustände über große Entfernungen gesendet wurden. Dieses Vorgehen lässt sich für die sichere quantenverschlüsselte Kommunikation nutzen. 2017 sprach Zeilingers Arbeitsgruppe per quantenverschlüsseltem Videoanruf mit einem chinesischen Forschungsteam; der Verschlüsselungscode war dabei von dem chinesischen Satelliten Micius erzeugt worden.



Alain Aspect

Geboren 1947 in Agen, Frankreich. Professor an der Institute d'Optique Graduate School der Université Paris-Saclay und an der École Polytechnique, Palaiseau, Frankreich.

John F. Clauser

Geboren 1942 in Pasadena, CA, USA. Research Physicist, J.F. Clauser & Assoc., Walnut Creek, CA, USA.

Anton Zeilinger

Geboren 1945 in Ried im Innkreis, Österreich. Professor Emeritus an der Universität Wien, Österreich, und sogenanntes Wirkliches Mitglied der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Foto: Porträt von Alain Aspect: Peter Bader; Porträt von John F. Clauser: JC Penny Portraits; Porträt von Anton Zeilinger: David Hirtzrammager/Österreichische Akademie der Wissenschaften

ERFAHREN SIE MEHR ÜBER DIE NOBELPREISE UNTER WWW.KVA.SE/EN

Weitere Informationen zum Nobelpreis für Physik 2022 finden Sie auf www.kva.se/nobelphysics2022 sowie unter www.nobelprize.org. Die angegebenen Seiten enthalten detaillierte Informationen zu den Laureaten und deren Forschung sowie Empfehlungen zu weiterführender Literatur und Videos. Alle weiterführenden Informationen sind auf Englisch.

Redaktion: Ulf Danielsson, Thors Hans Hansson, Anders Irbäck und Mats Larsson, Nobelkomitee für Physik, Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften; Anna Davour, Wissenschaftsredakteurin; und Marianne Nordenlöw, Redakteurin, Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften. Grafikdesign: IVY Agency. Illustrationen: Johan Jarnestad/Infographics.se

Druck und Vertrieb mit freundlicher Unterstützung von



Realisierung der deutschen Version durch



Druck und Vertrieb der deutschen Version gefordert von der



© Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften Box 50005, SE-104 05 Stockholm, Schweden +46 8 673 95 00, www.kva.se Dieses und weitere Poster sind online verfügbar unter www.mediatheque.lindau-nobel.org/educational und www.kva.se/nobelposters.