

Lichtblick für die Quantenforschung

HU-Forschungsteam und Partner haben erstmals die Teilchenaustauschphase von Photonen direkt gemessen

Dieses Experiment liefert den direkten Beleg für ein erstaunliches Quantenphänomen, das nur bei völlig gleichartigen Quantenobjekten beobachtet wird. Damit kommt die Quantenforschung einen wichtigen Schritt voran.

Die Teilchen, denen das Forscherteam auf der Spur ist, sind schwer zu fassen. Die Physiker untersuchen die Quantenteilchen der elektromagnetischen Wellen, auch Photonen genannt, aus denen Licht besteht. Photonen lassen sich nur dann unterscheiden, wenn sie unterschiedliche Wellenlängen haben, in unterschiedlichen Richtungen schwingen oder sich an verschiedenen Punkten in Raum und Zeit befinden.

„Wenn zwei in Wellenlänge und Schwingungsrichtung ununterscheidbare Photonen aufeinandertreffen und sich wieder trennen, haben sie gewissermaßen ihre Identität verloren“, erläutert Kurt Busch. „Man stelle sich vor, wir schicken zwei Zwillinge durch zwei Türen in einen gemeinsamen Raum. Wenn Sie wieder hinaustreten, können wir nicht feststellen, ob sie dazu jeweils dieselbe Tür benutzt haben oder nicht“, ergänzt Oliver Benson, Mitglied von **IRIS Adlershof**. In der Quantenmechanik passiert dennoch etwas. Laut dem sogenannten Symmetrisierungspostulat gibt es zwei Kategorien von Elementarteilchen: Bosonen und Fermionen. Diese Arten von Teilchen unterscheiden sich dahingehend, was passiert, wenn man sie miteinander vertauscht.

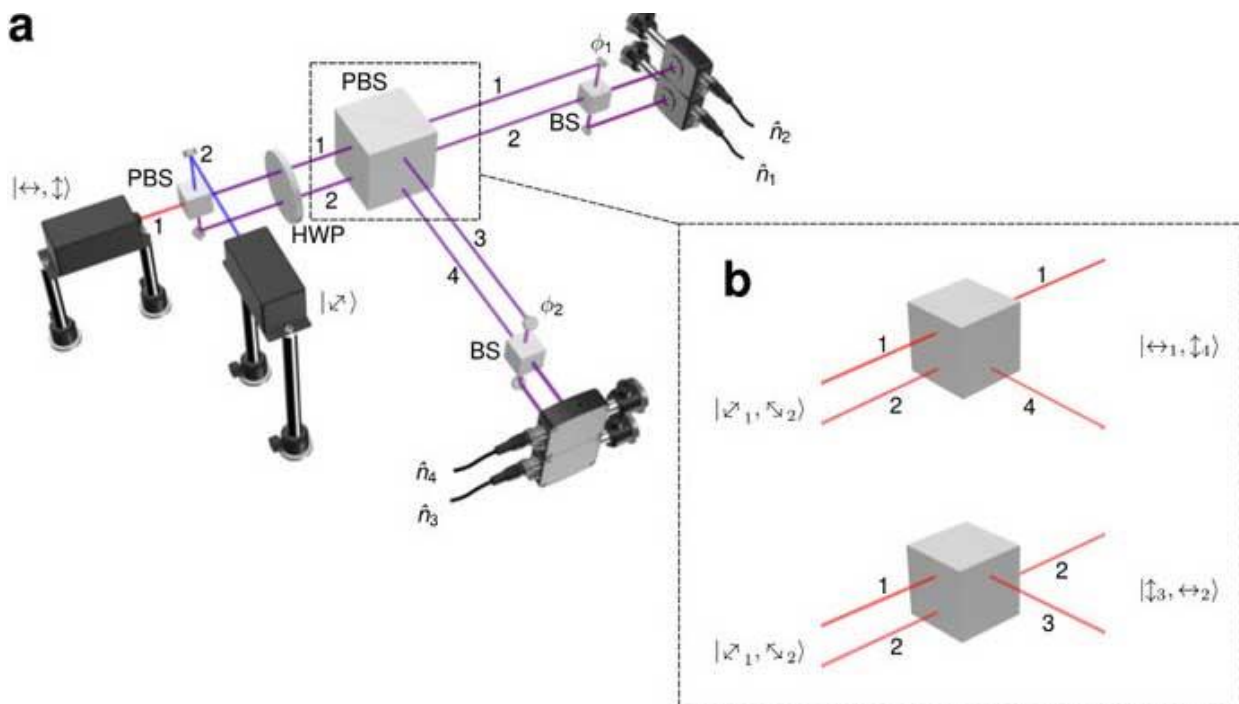


Abbildung 1: Konzeptionelle Skizze des Interferometeraufbaus: a Ein verschränktes Photonenpaar (roter Strahl) wird in das Interferometer geleitet, welches zwei unterschiedliche Möglichkeiten am zentralen polarisierenden Strahlteiler (PBS) produziert, wie in b gezeigt: Entweder das Photon in Pfad 1 wird transmittiert und das Photon in Pfad 2 wird reflektiert oder genau umgekehrt. Die Quantensuperposition dieser Szenarien führt zu der Interferenz zwischen Zuständen, die physikalisch vertauschte Versionen voneinander sind, und offenbart die Teilchenaustauschphase φ_x . Der blaue Strahl wird von einem abgeschwächten Laser erzeugt und dient als Referenzsignal um die effektiven optischen Pfadlängenunterschiede, φ_1 und φ_2 , zu bestimmen.

Im Beispiel hieße das, wenn jeder der Zwillinge den Raum aus der jeweils anderen Tür wieder verlässt. Bei Bosonen ändert sich nichts – bei Fermionen erhält die quantenmechanische Wellenfunktion, die die Teilchen beschreibt, einen Phasenschub, der auch Austauschphase genannt wird. „Im Zwillingsbeispiel kann man sich das vielleicht so vorstellen: Schicken wir die beiden Zwillinge im Gleichschritt in den Raum und kommen sie aus verschiedenen Türen wieder heraus, so sind sie weiterhin im Gleichschritt. Als Bosonen treten die Zwillinge mit demselben Bein voran aus dem Raum heraus, mit dem sie auch zuerst in Raum geschritten sind. Jedoch benötigen sie als Fermionen beide einen Schritt mehr und gehen beim Verlassen des Raumes nun mit dem anderen Bein voran“, so Benson. „Dass Photonen bosonisch sind, konnte bislang nur durch indirekte Messungen und mathematische Berechnungen gezeigt werden“, sagt Kurt Busch. „In unserem jüngsten Experiment haben wir die Teilchenaustauschphase von Photonen erstmals direkt gemessen und haben damit einen direkten Beleg für ihren bosonischen Charakter erbracht.“

Um die Austauschsymmetrie eines Zustandes für zwei identische Teilchen direkt nachzuweisen, hat das Team eine optische Apparatur mit einem Interferometer aufgebaut. Herzstück des Aufbaus – in der Größe eines kleinen Tisches – sind zwei Strahlteiler. Zwei Photonen wurden dann in das Interferometer geschickt und durch den Strahlteiler auf zwei verschiedene Wege geführt. Entlang einem der beiden Wege werden die Photonen miteinander vertauscht, während sie auf dem anderen unverändert bleiben. Am Ausgang des Interferometers wurden dann beide Photonen am zweiten Strahlteiler wieder überlagert. „Je nachdem, ob die Photonen bosonisch oder fermionisch sind, sind dann die beiden Photonen im Gleichschritt und verstärken sich oder sie sind außer Tritt und löschen sich aus“, erläutern die Physiker.

Zukünftige Verbesserungen des Interferometers werden ein neues Werkzeug für Präzisionsmessungen mit Quantenlicht bereitstellen. Gleichzeitig etabliert das Experiment eine neue Methode zur Erzeugung und Zertifizierung von Quanten-Zuständen von Licht. Dies ist sehr wichtig im neuen Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung, auf deren Basis derzeit neuartige, wesentlich leistungsfähigere Computer entwickelt werden.

Direct observation of the particle exchange phase of photons

K. Tschernig, C. Müller, M. Smoor, T. Kroh, J. Wolters, O. Benson, K. Busch, and A. Perez-Leija
Nat. Photonics, 2021, 15(9), 671.

DOI: [10.1038/s41566-021-00818-7](https://doi.org/10.1038/s41566-021-00818-7)