

Von gespeichertem Licht zum Quanten-Repeater

In zwei Experimenten an der Harvard University [1] und am California Institute of Technology [2] ist es gelungen, Quantenkorrelationen zwischen einem spontan erzeugten und einem gespeicherten Lichtpuls nachzuweisen. Damit sind beide Gruppen der Realisierung eines wichtigen Bausteins von lichtbasiereten Quantennetzwerken, dem so genannten Quanten-Repeater, einen wichtigen Schritt nähergekommen.

Ein wesentliches Element der Quanteninformationsverarbeitung ist die Übertragung von unbekanntem Quantenzuständen, z. B. innerhalb eines Quantenrechners, aber auch über große Distanzen. Die Schwierigkeit bei letzterem liegt darin, dass klassische Techniken, welche den Verlust von Information kompensieren, nicht anwendbar sind. Um unbekanntem Quantenzustände über beliebige Abstände verlustfrei zu übertragen, verwendet man vielmehr das Verfahren der Quantenteleportation, das jedoch voraussetzt, dass Sender und Empfänger im Besitz eines maximal verschränkten Teilchenpaares sind. Damit reduziert sich das Problem der Informationsübertragung zwar auf die einfachere Erzeugung verschränkter Zustände, aber auch dies wird aufgrund unvermeidbarer Verluste mit zunehmendem Abstand exponentiell aufwändiger.

Dieses Problem lässt sich mit dem Quanten-Repeater umgehen [3]. Die Übertragungsstrecke ist hierbei in kleine Abschnitte eingeteilt, an deren Endpunkten sich jeweils ein Teilchen befindet (Abb. 1). Zunächst wird Verschränkung nur zwischen den Enden einer jeden Teilstrecke erzeugt. Ist dies – in der Regel nach mehreren Versuchen – gelungen, werden an zwei Teilchen benachbarter Teilstücke (z. B. B und A') Messungen durchgeführt und damit Verschränkung zwischen den entfernten Endpunkten der beiden Abschnitte hergestellt. Das Verfahren wird iterativ fortgesetzt, bis ein verschränktes Teilchenpaar über die gesamte Distanz vorliegt.

Die Experimentatoren an der Harvard Universität [1] und am CalTech [2] verwendeten – gemäß dem zugrunde liegenden theoretischen Vorschlag [4] – zwei räumlich getrennte atomare Ensembles aus Drei-Niveau-Atomen. In beiden

Experimenten wurden die Atome durch optisches Pumpen im Grundzustand $|b\rangle$ präpariert, bevor durch Einstrahlung eines schwachen Raman-Pump-Pulses (blau) spontane Stokes-Photonen (orange) entstanden (Abb. 2a). Ähnlich wie beim parametrischen Zerfall ist die mit dem Stokes-Photon gleichzeitig entstehende kollektive atomare Anregung streng mit diesem korreliert. Die Stokes-Photonen werden dann über einen 50/50-Strahlteiler auf zwei Einphotonen-Detektoren geschickt (Abb. 2b). Die Messung an den Detektoren projiziert in 50 % aller Fälle auf einen verschränkten Zustand zwischen den Ensembles A und B. Das Besondere an den kollektiven Ensemblezuständen ist nun, dass sie sich nach Bedarf durch Einstrahlung eines zweiten, zeitverzögerten Raman-Pulses, der nun jedoch an den Zustand $|c\rangle$ koppelt, auf anti-Stokes-Photonen übertragen lassen (Abb. 2c). Interferenz und Detektion der anti-Stokes-Photonen aus zwei benachbarten Ensembles erlaubt die für das Repeater-Protokoll notwendige Verknüpfung von Teilstrecken.

Beide Experimente zeigten nun, dass Stokes- und anti-Stokes-Photonen über das klassisch erlaubte Maß hinaus korreliert sind, was sich nur durch eine Übertragung der Quantenkorrelation zwischen Stokes-Photon und Atomen auf eine zwischen Stokes- und anti-Stokes-Photon erklären lässt. Die

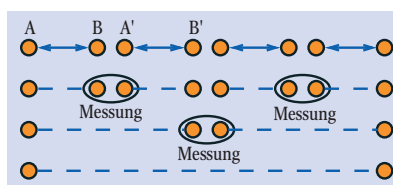


Abb. 1: Mithilfe des Quanten-Repeater lassen sich verschränkte Zustände über große Entfernungen erzeugen.

Quantenkorrelation der Photonen per se ist dabei nicht das Überraschende. Das Aufregende ist hier, dass diese mit einer variablen und einstellbaren Zeitverzögerung geschieht. Damit ist erstmals gezeigt, dass ein nichtklassischer Quantenzustand in einem atomaren Ensemble gespeichert und auf ein Photon übertragen werden kann.

Die experimentellen Ergebnisse haben neben der unmittelbaren Anwendung für Quanten-Repeater auch Bedeutung für photonische Quantenspeicher. Das Grundprin-

zip des Repeaters aus [4] ist nämlich sehr ähnlich dem in [5] vorgeschlagenen Schema zur Speicherung von Photonenzuständen durch „Anhalten“ von Licht. Die klassischen Aspekte des „Anhaltens“ von Licht sind bereits seit mehr als einem Jahr experimentell bestätigt [6]. Die neuen Experimente haben nun auch den Nachweis erbracht, dass sich kollektive Zustände als „Quantenspeicher“ für Licht eignen.

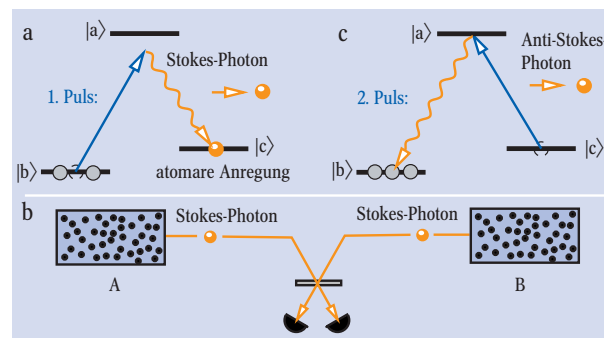


Abb. 2: Grundelemente des Quanten-Repeater nach [4]:
 ► a) spontane Stokes-Raman-Streuung
 ► b) Interferenz und Detektion der Stokes-Photonen
 ► c) stimulierte anti-Stokes-Raman-Streuung.

Während das physikalische Prinzip beider Experimente dasselbe ist, setzten die beiden Gruppen unterschiedliche Speichermedien und Nachweismethoden ein. Am CalTech waren dies Cs-Atome in einer magneto-optischen Falle und in Harvard Rb-Atome in einer Gaszelle. Während im CalTech-Experiment für Pulse von etwa 34 ns Länge nichtklassische Korrelationen mit 410 ns Zeitverzögerung nachgewiesen werden konnten, war dies im Harvard-Experiment nur im Dauerstrich-Betrieb möglich. Hierbei waren die Quantenkorrelationen aufgrund der langsamen intrinsischen Dynamik der Atome noch immer um ca. 81 ns zeitverzögert. Klassische Korrelationen für Pulse ließen sich in Harvard mit einer variablen Zeitverzögerungen zwischen 50 ns und 1 μ s nachweisen.

Die Größe der nichtklassischen Effekte betrug in beiden Experimenten nur wenige Prozent. Dies deutet auf experimentelle Unzulänglichkeiten wie atomare Diffusionsbewegungen während der Speicherzeit, unzureichende Laserintensität und imperfektes Mode-Matching. Bis zur Realisierung eines funktionierenden Quanten-Repeater dürfte es daher wohl noch ein längerer Weg sein.

CLAUDIA MEWES UND
 MICHAEL FLEISCHHAUER

Dipl.-Phys. Claudia Mewes und Prof. Dr. Michael Fleischhauer, AG Theoretische Quantenoptik, Fachbereich Physik, Universität Kaiserslautern, 67663 Kaiserslautern

[1] C. H. van der Wal et al., Science 10859461 (2003)
 [2] A. Kuzmich et al., Nature 423, 731 (2003)
 [3] H.-J. Briegel et al., Phys. Rev. Lett. 81, 5932 (1999)

- [4] L.-M. Duan et al., Nature **414**, 413 (2001)
- [5] M. Fleischhauer und M. D. Lukin, Phys. Rev. Lett. **84**, 5094 (2000); Phys. Rev A **65**, 022314 (2002)
- [6] D. F. Phillips et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 783 (2001); C. Liu et al., Nature **409**, 490 (2001)

Erstes „exotisches“ 5-Quark-Teilchen entdeckt

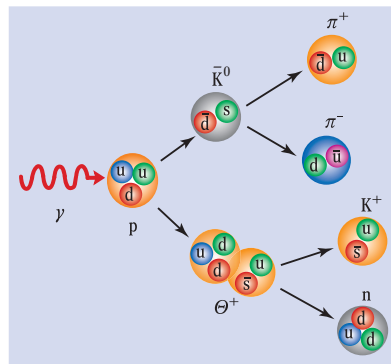
Der Fund ist eine Sensation: Seit über 40 Jahren hat man danach gesucht, jetzt wurde es von einer japanischen Arbeitsgruppe entdeckt und von weiteren Gruppen in Russland, den USA und Deutschland ebenfalls nachgewiesen: ein Baryon mit Namen Θ^+ , das nicht aus drei Quarks besteht wie das Proton und Neutron, sondern mindestens aus vier Quarks und einem Antiquark.¹⁾ Es handelt sich bei diesem „Pentaquark“ nicht nur um ein weiteres neues Teilchen unter vielen, sondern um eine neue Teilchensorte.

Die Messergebnisse bestätigen dabei die Berechnungen von Diakonov, Petrov und Polyakov, die diese gleichzeitig in St. Petersburg und Bochum durchgeführt hatten [1]. Nach ihrer Theorie musste das Teilchen ein „Soliton“ sein und aus mindestens vier Quarks und einem Antiquark bestehen. Die Idee mit dem Soliton an sich war damals nicht neu, aber niemand verwendete das Bild konsequent und berücksichtigte dabei die vielen bereits bekannten Daten „normaler“ Baryonen, um nach exotischen Baryonen zu suchen. Außer dem nun entdeckten Θ^+ sollten noch weitere exotische Teilchen mit ähnlicher Quarkstruktur vorkommen, die meisten von ihnen aber mit merklich geringerer Lebensdauer und deshalb schwieriger nachzuweisen. Bei dem Θ^+ war das anders, seine Masse konnte genau berechnet werden und seine Lebensdauer musste relativ groß sein.

Zunächst wurde die japanische Gruppe LEPS am Synchrotron-Labor Spring8 bei Osaka fündig [2]: Bei exakt der vorausgesagten Energie fanden die Forscher ein langlebiges Teilchen mit Ladung +1 und einem Anti-Strange-Quark – die Messung wurde zwei Monate später von der DIANA-Gruppe am Institut für Theoretische und Experimentelle Physik (ITEP) in Moskau bestätigt [3]. Die russischen Kollegen brauchten gar keine neue Messung, sondern werteten alte Blasenkammer-

Daten gezielt aus. Inzwischen durchforsteten auch US-amerikanische Physiker der CLAS-Kollaboration am Jefferson Laboratory ihre frisch erzeugten Daten aus der Elektronenstreuung und fanden ebenfalls das Teilchen, sogar mit noch größerer Genauigkeit [4]. Auch Physiker der HERMES-Kollaboration am Deutschen Elektron Synchrotron DESY und bei ELSA (Bonner Elektron-Stretcher Anlage) [5] konnten das Θ^+ präzise identifizieren.

Die Erkenntnis, dass Quarks fundamentale Bausteine der Materie sind, wurde von Gell-Mann und Zweig 1963 eingeführt, um die damals bekannten Baryonen zu klassifizieren und zu verstehen.²⁾ Die



Eine der Reaktionen, bei denen das Pentaquark-Teilchen entdeckt wurde: Bei Bestrahlung von Protonen mit Photonen an ELSA entstehen $\bar{K}^0 K^0$ -Paare. Das K^0 verbindet sich mit dem Proton p zum Θ^+ .

beiden ordneten die Quarks zu einem Tripletts aus jeweils einem up-, down- und strange-Quark (u, d, s) an. Die Baryonen sollten sich durch Produkte dieser Tripletts, die sog. Multipletts (Singulets, Oktetts und Dekupletts), klassifizieren und ordnen lassen. Das bedeutete, dass die Baryonen dieser Multipletts eine Struktur aus drei Quarks haben müssten, das Proton z. B. sollte aus zwei up-Quarks und einem down-Quark bestehen (uud). Aufgrund dieses Schemas sagte damals Gell-Mann ein neues Teilchen im Dekuplett voraus, das Ω^- , bestehend aus drei strange-Quarks (sss). Dieses berühmte Ω^- wurde prompt entdeckt und brachte Gell-Mann den Nobelpreis ein. Alle Baryonen wurden seither in wachsendem Maße als Teilchen betrachtet, die aus drei Quarks (verschiedener „Farbladung“) bestehen. Alle Versuche, „exotische“ Teilchen mit einer anderen Quark-Anzahl zu finden, schlugen bislang ausnahmslos fehl. Diese Lage hat sich nun durch die Entdeckung von Θ^+ geändert.

Für das Soliton-Modell, auf dem die Voraussagen beruhen, ist das Vakuum nicht einfach ein leerer Raum wie im etablierten 3-Quark-Modell, sondern seinerseits ein kompletter See aus Quarks mit negativer Energie, eine zunächst überraschende Idee, die auf Dirac in den 30er-Jahren zurückgeht, im Rahmen der modernen Quantenfeldtheorie jedoch ihren etablierten Platz hat. Das Vakuum hat Baryonenquantenzahl $B=0$, ein Baryon hat $B=1$, was bedeutet, dass zum Vakuum drei (eng beieinander liegende) Quarks (jeweils $B=1/3$) hinzugefügt werden müssen, um ein Baryon zu konstruieren. Diese drei Quarks wechselwirken mit den Quarks des Dirac-Sees, wodurch um sie im Vakuum eine Art „weiche Luftblase“ entsteht, die ihrerseits die drei Quarks beieinander hält und sie zu einem Baryon bindet. Diese „Luftblase“ nennt man Polarisation des Dirac-Sees.

Theoretisch lässt sich ihre Bildung so beschreiben, dass aus dem ungestörten Dirac-See in wachsendem Maße Quarks negativer Energie entfernt und auf positive Energiezustände gehoben werden, wobei jeweils ein Loch im Dirac-See (d. h. ein Anti-Quark) zurückbleibt. Die drei Saat-Quarks umgeben sich also mit einer Wolke aus Quark-Antiquark-Paaren, und diese Wolke stellt die „Luftblase“ und den polarisierten Dirac-See dar. Das Baryon besteht also aus drei Quarks plus dem polarisierten Dirac-See, beide Strukturen lassen sich nicht voneinander trennen und tragen zu den Quantenzahlen (Drehimpuls, Parität, Strangeness, etc.) des resultierenden gesamten Baryons bei. Das geht soweit, dass es Baryonen gibt, deren Quantenzahlen von den drei Saat-Quarks nicht aufgebracht werden können, also ohne die Polarisation des Dirac-Sees gar nicht möglich wären.

Ein solches „exotisches“ Baryon ist das Θ^+ . Bei ihm ist die Polarisation des Dirac-Sees so stark, dass sie sogar ein strange-Quark aus dem Dirac-See entfernt, es in einen positiven Energiezustand befördert und gleichzeitig in ein down-Quark umwandelt. Somit hat Θ^+ als wichtigste Komponente zwei up-Quarks und zwei down-Quarks kombiniert mit Anti-strange-Quark: uudd \bar{s} .

Die einfachste Art ein Θ^+ herzustellen, besteht im Prinzip darin, ein positiv geladenes K-Meson K^+ mit Quarkstruktur $u\bar{s}$ auf ein Neu-

1) „Theta“, weil alle Baryonen außer dem Proton und Neutron mit großen griechischen Buchstaben bezeichnet werden, und „+“, weil es eine positive Elementarladung trägt. Die weitere wichtige Eigenschaft, dass es nämlich neben zwei up- und zwei down-Quarks noch ein strange-Antiquark enthält, findet sich nicht im Namen wieder.

2) Die Familie der Baryonen besteht aus den Nukleonen, d. h. Protonen und Neutronen, und vielen anderen „schweren“ Teilchen.

3) Diese entspricht 1530 MeV im Vergleich zum Proton mit 938 MeV und zum K-Meson mit 493 MeV.