

Explosion übergehen. Wie dies geschieht, ist noch ungeklärt. In den Simulationen der Garching Gruppe wird der Deflagrations-Deflagrations-Übergang ad hoc eingeleitet, wenn sich die Brennfront genügend weit nach außen ausgebreitet hat. Anschließend wird die freigesetzte Strahlungsenergie durch eine Modellatmosphäre transportiert, um synthetische Lichtkurven und Spektren zu erzeugen, die direkt mit den Beobachtungen vergleichbar sind.

Die kürzlich veröffentlichten Ergebnisse sind vielversprechend und reproduzieren den empirischen Zusammenhang zwischen Dauer und Helligkeit der SN sehr genau [2]. Er wird dadurch erklärt, dass zwar die gesamte Menge verbrannten Materials weitgehend konstant ist, sich

aber je nach dem Verlauf der Explosion verschieden auf die Verbrennungsprodukte verteilt. Wenn der Deflagrations-Deflagrations-Übergang bei hoher Dichte stattfindet, verläuft die Verbrennung vollständiger, und mehr Material wird zu Kernen der Eisengruppe fusioniert. Findet er dagegen bei niedriger Dichte statt, erzeugt die dann unvollständigere Verbrennung mehr Kerne mittlerer Masse wie z. B. das im Spektrum auffällige Silizium. Die vollständigere Verbrennung setzt mehr Energie frei und sorgt für metallreichere Gashüllen, deren höhere Opazität den Energietransport verlangsamt und damit den Helligkeitsabfall der Supernova verzögert. Außerdem zeigen die Daten, dass zumindest fast alle Supernovae vom Typ Ia Chandrasekhar-Masse

haben, sodass die Verschmelzung zweier Weißer Zwerge offenbar keine Rolle spielt.

Obwohl wichtige Fragen wie die nach dem Deflagrations-Deflagrations-Übergang noch unbeantwortet bleiben, markiert die Arbeit der Garching Gruppe einen wesentlichen Fortschritt im Verständnis dieser Supernovae. Die dramatischen Schlussfolgerungen, die mit ihnen begründet werden, sind damit erheblich glaubwürdiger geworden.

Matthias Bartelmann

- [1] W. Hillebrandt und E. Müller, *Physik Journal* Mai 2004, S. 49
- [2] P. A. Mazzali et al., *Science* **315**, 825 (2007)
- [3] F. K. Röpkke und W. Hillebrandt, *Astron. & Astrophys.* **431**, 635 (2005)

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Institut für Theoretische Astrophysik, Universität Heidelberg, Albert-Überle-Straße 2, 69120 Heidelberg

■ Ununterscheidbare Kondensate

Dass Quantenteilchen als ununterscheidbar betrachtet werden müssen, selbst wenn sie räumlich getrennt sind, ist jetzt in einem Experiment mit zwei Bose-Einstein-Kondensaten nachgewiesen worden. Das ist nicht unerwartet, aber dennoch beeindruckend.

Im Grundkurs Quantenmechanik lernt man, dass Teilchen derselben Sorte ununterscheidbar sind: Die Wellenfunktion, die ein Ensemble von ihnen beschreibt, ist stets eine Überlagerung von jedem einzelnen Teilchen in jedem möglichen Zustand. Streng genommen bedeutet das z. B., dass wir nicht von einem Elektron auf der Erde sprechen können, ohne im gleichen Atemzug alle Elektronen auf dem Mond zu erwähnen. Glücklicherweise hat die Existenz weiterer Teilchen des gleichen Typs an räumlich entfernten Orten praktisch keine Konsequenz und wir können sie beruhigt ignorieren. Dass Teilchen dennoch ihre Ununterscheidbarkeit offenbaren können, selbst wenn sie über makroskopische Abstände getrennt sind, hat jetzt Lene Hau mit Mitarbeitern an der Harvard University in einem Experiment mit zwei Bose-Einstein-Kondensaten gezeigt [1].

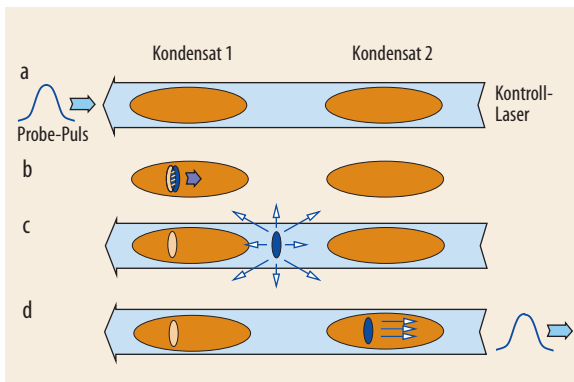
In dem Experiment bedienen sich Hau und Kollegen einer vor einigen Jahren entwickelten Technik, mit der sich Lichtpulse in einem

Atomgas „speichern“ lassen [2, 3]. Hierbei wird ein Probe-Laserpuls in ein atomares Ensemble eingestrahlt, und zwar nahe der Resonanz eines Übergangs vom Grundzustand zu einem angeregten Zustand. Ein zweiter Laser, der als Kontroll-Laser fungiert, koppelt den angeregten Zustand in einem Raman-Prozess an einen ursprünglich unbesetzten, meta-stabilen Zustand in Zwei-Photonen-Resonanz. Diese Kopplung führt zur sog. elektromagnetisch induzierten Transparenz des Probe-Pulses und einer reduzierten Gruppengeschwindigkeit. Mit dieser Reduktion geht ein partieller Transfer der Kohärenz des Laserpulses auf eine Raman-Kohärenz der Atome einher. Schaltet man den Kontroll-Laser ab, noch während sich der Probe-Puls im Ensemble befindet, wird dieser vollständig absorbiert. Da diese Absorption ein kohärenter Prozess ist, geht die räumliche Phaseninformation des Probe-Pulses nicht verloren, sondern bleibt in Form einer räumlichen Phase der Raman-Kohärenz

der Atome erhalten. Wird der Kontroll-Laser wieder angeschaltet, kehrt sich der Prozess um [4]: Die Atome strahlen kohärent und in Phase, analog zu einem Array aus Antennen, und gemäß der Phase des Originalpulses. Licht verlässt das Atomensemble wieder als kohärenter Puls mit einer wohldefinierten Form und Richtung.

Quantenmechanisch ist die Raman-Kohärenz eine Überlagerung des Grundzustands mit einem spin-angeregten Zustand der Atome. Die Speicherung der räumlichen Phaseninformation setzt das gleichzeitige Vorhandensein von beiden Zustandskomponenten am selben Ort voraus, das daher entscheidend für die Kohärenz des Ausleseprozesses ist. Wären nur die spin-angeregten Zustände besetzt, so würden die atomaren Dipole bei Wiederanschalten des Kontroll-Lasers mit zufälligen Phasen oszillieren, und inkohärente und ungerichtete spontane Raman-Streuung wäre die Folge.

Bei den extrem niedrigen Temperaturen der Atome in einem



Ein Probe-Laserpuls lässt sich in einem Bose-Einstein-Kondensat speichern und anschließend aus einem zweiten, räumlich entfernten Kondensat wiederherstellen (vgl. Text).

Bose-Einstein-Kondensat kommt nun ein weiterer wichtiger Aspekt hinzu. Die Absorption eines Probe-Photons und der Übergang aus dem Grundzustand in den spin-angeregten Zustand sind mit einem Impulsübertrag verbunden. Da das Fallenpotential für das Bose-Kondensat die Atome im spin-angeregten Zustand nicht einfängt, beginnt der spin-angeregte Teil der Wellenfunktion sich mit der Photonen-Rückstoßgeschwindigkeit von seinem Ursprungsort wegzubewegen, während die Grundzustandskomponente bleibt, wo sie war. In einem Kondensat leben Spinkohärenzen lang genug, sodass sich der spin-angeregte Zustand über Entfernungen bewegen kann, die viel größer sind als seine Ausdehnung. Daher stellt sich die Frage, ob ein kohärentes Auslesen des Anfangspulses selbst dann noch möglich ist, wenn die beiden Komponenten der Wellenfunktion – spin-angeregter und Grundzustand – räumlich getrennt sind.

Hau und Kollegen zeigen, dass dies in der Tat der Fall sein kann – zumindest solange das Wellenpaket des spin-angeregten Zustands nicht das Kondensat verlassen hat. Dies liegt daran, dass sich die Wellenfunktion des Grundzustands in einem Bose-Einstein-Kondensat über das ganze Kondensat erstreckt. Daher gibt es immer einen räumlichen Überlapp zwischen Grundzustand und spin-angeregten Komponenten, und der Ausleseprozess ist weiterhin kohärent.

Eine noch interessantere und auf den ersten Blick verblüffende

Beobachtung machten Hau und Mitarbeiter in einem zweiten Experiment. Sie präparierten zunächst zwei unabhängige Kondensate in zwei Fallen, jede rund 50 μm groß und voneinander um mehr als 100 μm getrennt. In einem ersten Schritt wurde ein kohärenter Lichtpuls auf die oben beschriebene Weise im ersten Kondensat gespeichert (Abb. a). Dabei entstand ein Wellenpaket von spin-angeregten Atomen, das sich wie zuvor mit der Photon-Rückstoßgeschwindigkeit in Richtung des zweiten Kondensats bewegte (Abb. b). Sobald dieses Wellenpaket das erste Kondensat verlassen hatte, war – wie erwartet – eine kohärente Wiederherstellung des Anfangspulses nicht möglich, da es keinen Überlapp mehr zwischen spin-angeregten und Grundzustandswellenpaket gab. Das Einschalten des Kontroll-Lasers führt in diesem Fall nur zu ungerichteter spontaner Emission (Abb. c). Wenn der Kontroll-Laser jedoch erst wieder eingeschaltet wurde, nachdem das Wellenpaket der spin-angeregten Komponente der Atome aus dem ersten Kondensat das zweite erreicht hatte, so ließ sich der Anfangspuls wiederherstellen, und zwar mit wohl definierter Form und Ausbreitungsrichtung (Abb. d). Aufgrund der voneinander unabhängigen Präparation der beiden Kondensate sollte von einem naiven Standpunkt aus betrachtet das Wellenpaket der spin-angeregten Komponente der Atome aus dem ersten Kondensat nichts mit den Atomen

des zweiten Kondensats zu tun haben. Dass dennoch eine kohärente Wiederherstellung des Probe-Pulses möglich war, ist nur zu verstehen, wenn man die Atome in beiden Kondensaten als ununterscheidbare Quantenobjekte auffasst. Als solche hat die Wellenfunktion des Grundzustands aller Atome gleichzeitig Komponenten in beiden Fallen. Da es sich um Bose-Kondensate handelt, ist die Phase innerhalb eines Kondensats räumlich konstant. Der durch die unabhängige Präparation bedingte zufällige Phasenunterschied zwischen beiden Kondensaten ist dabei für die Kohärenz des Wiederherstellungsprozesses irrelevant.

Diese Arbeit ist ein nicht unerwarteter, aber dennoch experimentell faszinierender Nachweis eines fundamentalen Aspekts der Quantenphysik – die Ununterscheidbarkeit identischer Teilchen. Sie zeigt aber auch, dass die experimentelle Technik der kohärenten Kontrolle von Licht und Materiewellen ein beeindruckendes Maß erreicht hat, was zu einer Vielzahl interessanter technologischer Anwendungen führen wird.

Michael Fleischhauer

- [1] N. S. Ginsberg, S. R. Garner und L. V. Hau, *Nature* **445**, 623 (2007)
- [2] C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi und L. V. Hau, *Nature* **409**, 490 (2001)
- [3] D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth und M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 783 (2001)
- [4] M. Fleischhauer und M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5094 (2000)

KURZGEFASST

■ Verzögerte Wahl

Vor über 20 Jahren schlug John Wheeler ein Gedankenexperiment zum Welle-Teilchen-Dualismus vor, das jetzt erstmals exakt realisiert wurde. Der Clou bei diesem *Delayed Choice*-Experiment besteht darin, dass die Entscheidung, ob ein Interferometer mit einem zweiten Strahlteiler „geschlossen“ wird, erst fällt, wenn ein einzelnes Photon bereits den ersten Strahlteiler passiert hat. Das Photon kann daher zunächst nicht „wissen“, ob es sich in einem Interferometer befindet oder nicht. Die Detektoren des mit einer Einzel-Photonen-Quelle und einem Zufallsgenerator durchgeführten Experiments zeigen das für Wellen erwartete Interferenzmuster bzw. die für

Teilchen erwartete konstante Wahrscheinlichkeit, je nachdem, ob das Interferometer geschlossen ist oder nicht. V. Jacques et al., *Science* **315**, 966 (2007)

■ Der Dreh von der Sonne

Die Eigenrotation von kleinen Asteroiden kann aufgrund der Absorption und anschließenden Emission von Infrarotstrahlung der Sonne zunehmen. Wie jetzt gezeigt wurde, hat die Winkelgeschwindigkeit des Asteroiden (54509) 2000 PH5 aufgrund dieses YORP-Effekts in den letzten vier Jahren um $2 \cdot 10^{-4}$ Grad/Tag² zugenommen. S. C. Lowry et al., *Science Express* doi: 10.1126/science.1139040; P. A. Taylor et al., *ibid.* 10.1126/science.1139038

Prof. Dr. Michael Fleischhauer, Fachbereich Physik, Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger Str., 67663 Kaiserslautern