

Offen bleibt aber wie der Cluster 30 Photonen pro Atom aus dem Laserfeld absorbiert. Die Autoren schätzen die Absorption im Plasma des Xe-Clusters in einem Modell, das die bekannten Prozesse, wie die inverse Bremsstrahlung, berücksichtigt. Demnach sollte die Zahl der absorbierten Photonen einen Faktor 5 bis 10 unter den beobachteten Werten liegen. Ohne weiterführende Experimente wird sich dieses Rätsel wohl nicht lösen lassen.

Auf jeden Fall ist das neue Experiment die vorläufige Krönung des rasanten Fortschritts am weltweit führenden Projekt eines Freien-Elektronen-Lasers im Röntgenbereich. Das Hamburger Experiment hat schlaglichtartig gezeigt, dass selbst bei dem alten Thema der Wechselwirkung von Licht mit Materie noch viele Fragen offen sind. Ebenso wichtig wie die Ergebnisse dieses Experimentes ist die Tatsache, dass es überhaupt durchgeführt werden konnte. Mit der TESLA Test Facility wurde damit die Zukunft der Röntgen- und Synchrotronstrahlung eingeläutet. Im sichtbaren Bereich haben Laser viele Bereiche der Physik und der Technik revolutioniert. Im Röntgenbereich hat diese Entwicklung nun in Hamburg begonnen.

REINHARD DÖRNER

- [1] J. Andruskow et al., Phys. Rev. Lett **85**, 3825 (2000)
- [2] V. Ayvazyan et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 104802 (2002)
- [3] H. Wabnitz et al., Nature **420**, 482 (2002)

## Eine Hand voll Atome verzögern Licht

Mehr als 300 Jahre, nachdem der Niederländer Christiaan Huygens zum ersten Mal die reduzierte Lichtgeschwindigkeit in dichten Medien beschrieben hat, gibt es immer noch faszinierende und überraschende Forschungsergebnisse zur Lichtausbreitung in Medien. Nachdem es in den vergangenen Jahren gelungen war, Lichtpulse in Bose-Einstein-Kondensaten praktisch anzuhalten, haben japanische und amerikanische Physiker nun gezeigt, dass bereits eine Hand voll Atome in einem Resonator ausreicht, um Lichtpulse zu verzögern oder zu beschleunigen.

In den meisten Medien ist die Phasengeschwindigkeit, mit der sich eine Trägerwelle fortbewegt, ungefähr genauso groß wie die Gruppengeschwindigkeit, mit der sich Intensitätsmodulationen, wie z. B. Lichtpulse, ausbreiten. Die Gruppengeschwindigkeit ist mit  $c/(n+\omega \, dn/d\omega)$  eine direkte Funktion der Brechungsindexänderung  $dn/d\omega$ , die auch als Dispersion bezeichnet wird. Ändert sich der Brechungsindex des Mediums in Abhängigkeit der Wellenlänge, dann weicht die Gruppengeschwindigkeit von der Phasengeschwindigkeit ab. Dies bedeutet, dass Lichtpulse im Medium verlangsamt oder beschleunigt werden. Dieser Effekt ist jedoch nur bei hinreichend großer Dispersion signifikant, die in

optisch aktiven Substanzen, wie beispielsweise in atomaren oder molekularen Gasen, typischerweise nur in unmittelbarer Nähe von Resonanzen auftritt. Daraus resultiert meist eine erhöhte Absorption, die einen experimentellen Zugang erschwert, wenn nicht unmöglich macht.

In atomaren Gasen lässt sich jedoch eine große Dispersion bei verschwindend kleiner Absorption erzielen, wenn neben den interessierenden schwachen Lichtpulsen ein weiterer, starker Lichtstrahl auf das Medium fällt, der eine elektromagnetisch induzierte Transparenz (EIT) des Gases bewirkt. Dies führt zur Ausbildung einer so genannten Dunkelresonanz, die mit einer erhöhten Transmission für ansonsten resonantes Licht einhergeht. L. V. Hau und Mitarbeiter konnten diesen Effekt nutzen, um Licht in einem Bose-Einstein-Kondensat auf Geschwindigkeiten von wenigen Metern pro Sekunde abzubremsen [1], und M. D. Lukin und Mitarbeitern gelang es sogar, Lichtpulse in atomaren Gasen anzuhalten und anschließend wieder in Bewegung zu setzen [2]. Diese Experimente beruhen auf Dispersionseffekten in mehr oder weniger homogenen Medien.

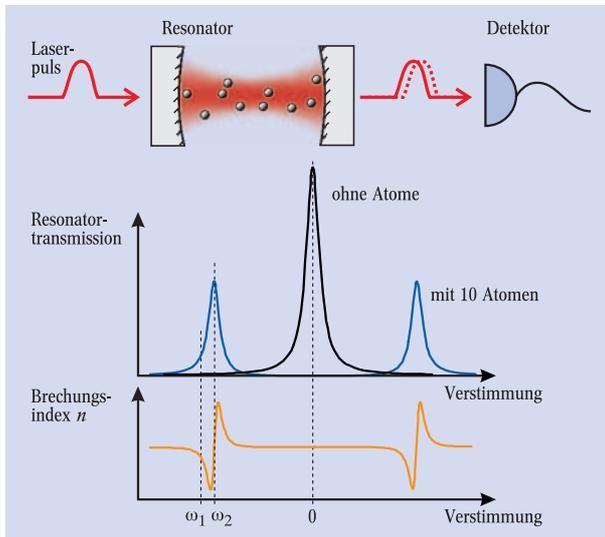
In dem neuen Experiment nutzen J. Shimizu und Mitarbeiter die verstärkende Wirkung eines optischen Resonators, der aus zwei ultrahoch reflektierenden Spiegeln aufgebaut ist [3]. In einem solchen Resonator hat ein einzelnes Atom

Prof. Dr. Reinhard Dörner, Institut für Kernphysik, Universität Frankfurt, August-Euler-Str. 6, 60486 Frankfurt

Dr. Pepijn Pinkse und Dr. Axel Kuhn, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching

aufgrund seiner hunderttausendfachen Spiegelung eine ähnliche Wirkung wie eine viel größere Atomwolke und beeinflusst daher merkbar die optischen Eigenschaften des Resonators [4]. Um diesen Einfluss zu steigern, verwenden Shimizu et al. langsame Rubidium-Atome aus einem atomaren Springbrunnen, sodass jedes Atom mehrere Mikrosekunden im Resonator bleibt.

Die Anwesenheit weniger Atome genügt, um die Resonanzfrequenz des leeren Resonators in zwei neue Resonanzlinien aufzuspalten. Der Brechungsindex variiert dispersionsartig auf jeder der beiden neuen Resonanzlinien (Abb.). Dies führt bei den Resonanzfrequenzen zu einer Reduktion der Gruppengeschwindigkeit und damit zur Verzö-



Im Mittel genügen bereits zehn Atome, um einen Laserpuls in einem Resonator zu verzögern oder zu beschleunigen (oben). Die Atome spalten die Resonanzfrequenz des leeren Resonators in zwei Linien auf, die mit einer Frequenzabhängigkeit des Brechungsindex einhergehen (unten). Ein Puls der Frequenz  $\omega_1$  wird dadurch beschleunigt, ein Puls der Frequenz  $\omega_2$  abgebremst.

gerung von Lichtpulsen. Bei leicht kleineren oder größeren Frequenzen hat die Brechungsindexänderung ein umgekehrtes Vorzeichen, sodass die Pulse etwas beschleunigt werden. Ein wesentlicher Unterschied zu Experimenten in homogenen Gasen besteht darin, dass ein idealer Resonator bei der Resonanz vollständig transmittiert und nicht, wie ein freies Atom, seine Energie in alle Richtungen abstrahlt. Dies erlaubt es, beschleunigte oder verzögerte Lichtpulse zu beobachten, ohne weitere atomare Zustände und zusätzliche Lichtfelder, wie bei EIT, ins Spiel zu bringen.

Die Forscher haben beobachtet, dass eine mittlere Zahl von zehn Atomen im Resonator genügt, um

Lichtpulse entweder um 440 ns zu verzögern oder um 170 ns zu beschleunigen, d. h. ihre Gruppengeschwindigkeit ist „subluminal“ bzw. „superluminal“. Die Kausalität ist dabei nicht verletzt, da die superluminale Ausbreitung sich lediglich in einer Änderung der Pulsform innerhalb der Pulsdauer von ca. 5  $\mu$ s äußert. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Tatsache, dass selbst ein leerer Resonator in der Lage ist, je nach Frequenzwahl Lichtpulse leicht zu verzögern oder zu beschleunigen.

Sollte es gelingen, den beobachteten Effekt mit nur einem einzelnen Atom oder Ion nachzuweisen, würden sich vollkommen neue Anwendungsbereiche eröffnen. Ein sehr langsames einzelnes Atom sollte hierzu genügen, wie Rechnungen von Shimizu et al. zeigen, die diesen Ansatz verfolgen. Ideal wäre natürlich, ein einzelnes Atom oder Ion in einem Resonator hoher Güte (Finesse) zu speichern. An einer Realisierung solcher Systeme wird weltweit intensiv gearbeitet, da Anwendungen in der Quanteninformationsverarbeitung auf der Hand liegen. Hat das Teilchen z. B. einen weiteren (Grund-)Zustand, der nicht an den Resonator koppelt und somit keine Verzögerung bewirkt, dann sollte ein Atom in einer Überlagerung zwischen beiden Grundzuständen zu einer Überlagerung zwischen einem verzögerten und nicht verzögerten Lichtpuls führen. Darüber hinaus sollte es auch möglich sein, die Transmission des Resonators in Abhängigkeit des atomaren Zustands zu schalten, und somit den Weg eines Lichtpulses oder Photons (reflektiert oder transmittiert) mit dem Zustand des Teilchens zu verschränken [5]. In den letzten Jahren wurden sogar mehrere Quellen für einzelne Photonen entwickelt, die zum Teil auf gekoppelten Atom-Resonator-Systemen basieren [6], die dem System von Shimizu vergleichbar sind. Man kann sich leicht ein Experiment vorstellen, in dem ein einzelnes Atom ein einzelnes Photon verzögert.

Das Experiment von Shimizu ist ein weiterer Schritt hin zur vollständigen Kontrolle quantenmechanischer Systeme. Dank dieser Kontrolle erlauben es moderne quantenoptische Experimente heute zum einen, grundlegende Gedankenexperimente zur Quantenmechanik durchzuführen, zum anderen drin-

gen sie in das konzeptionell neue Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung vor, das auf der deterministischen Kopplung verschiedener Quantensysteme beruht. Aus diesem sehr aktuellen Forschungsgebiet werden an dieser Stelle mit großer Sicherheit weitere Berichte folgen.

PEPIJN PINKSE UND AXEL KUHN

- [1] L. V. Hau et al., Nature **397**, 594 (1999)
- [2] D. F. Phillips et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 783 (2001)
- [3] Yukiko Shimizu et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 233001 (2002)
- [4] P. Pinkse und G. Rempe, Phys. Bl., November 2000, S. 49
- [5] K. M. Gheri und H. Ritsch, Phys. Rev. A **56**, 3187 (1997)
- [6] A. Kuhn, M. Hennrich und G. Rempe, Phys. Rev. Lett. **89**, 067901 (2002)

## Und es kondensiert doch ...

**Nur durch raffinierte Tricks gelingt es, ultrakaltes Cäsium in den Club der Bose-Einstein-Kondensate aufzunehmen. Dabei offenbart es seine äußerst vielseitigen Wechselwirkungseigenschaften.**

Von allen bislang untersuchten Quantengasen zeigt Cäsium (einziges stabiles Isotop: das Boson  $^{133}\text{Cs}$ ) das merkwürdigste Verhalten. Da es sich sehr effizient mit Lichtdruckkräften kühlen lässt, galt das schwerste stabile Alkaliatom beim Rennen um die Bose-Einstein-Kondensation ursprünglich als hoher Favorit. Während es in den vergangenen Jahren gelang, alle bosonischen Ein-Elektronen-Atome von Wasserstoff bis Rubidium bis zur Kondensation abzukühlen, schlugen sowohl „traditionelle“ Methoden wie Verdampfungskühlung in magnetischen Fallen [1] als auch neuere Ansätze mit optischen Kühl- und Speichermethoden [2] bei Cäsium fehl. Cäsium widersetzte sich der Kondensation vehement mittels inelastischer Stoßprozesse, welche unerwartet hohe Verlust- und Aufheizraten zur Folge hatten. Außerdem wurde bald klar, dass ein Cäsiumkondensat einem attraktiven Wechselwirkungspotential unterliegt, sodass dem Kondensat der sofortige Kollaps durch Implosion drohte.

Erst jetzt ist es Rudolf Grimm und seiner Gruppe an der Universität Innsbruck mittels ausgeklügel-