

Kühlung im Resonator

Ein neues Laserkühlverfahren in optischen Resonatoren sollte es ermöglichen, auch Atome oder Moleküle zu kühlen, bei denen die traditionelle Laserkühlung versagt. An einem einzelnen Rubidiumatom wurde das neue Verfahren nun erstmals im Experiment realisiert.

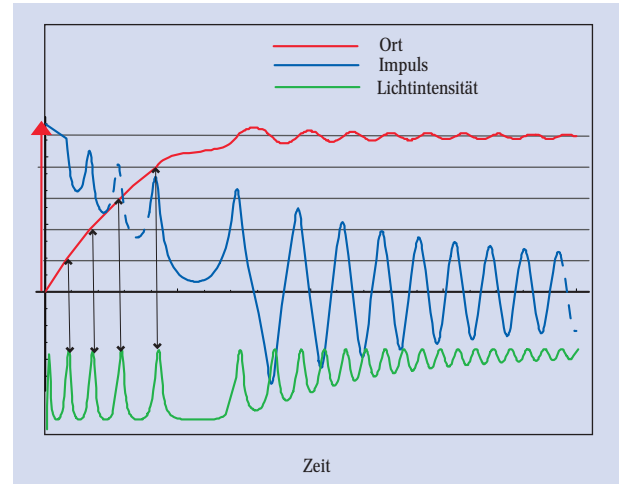
Freie Lichtfelder tragen neben Energie auch Impuls, sodass bei der Absorption, der spontanen Emission oder der Lichtstreuung Kräfte wirken. Für einen einzelnen Elementarprozess sind diese sehr klein: So bewirkt die Rückstreuung eines „roten“ optischen Photons an einem Rubidium-Atom eine Geschwindigkeitsänderung von ca. 1 cm/s. Laserlicht enthält jedoch sehr viele Photonen mit gleichem Impuls. Durch schnelle zyklische Wiederholung der resonanten Absorption eines Laserphotons mit nachfolgender spontaner Emission in eine zufällige Richtung lassen sich sehr starke gerichtete Beschleunigungen erzielen. Da sich der Rückstoß der emittierten Photonen im Zeitmittel weghebt, bleibt netto nur der aus dem Laserlicht absorbierte Impuls übrig. Aufgrund des Doppler-Effekts hängt die Anregungswahrscheinlichkeit durch den Laser und damit diese Kraft stark von der Geschwindigkeit des Atoms ab. Dadurch lässt sich eine Atomwolke abbremsen und bis in den Nanokelvinbereich $kT = \hbar\Gamma$ kühlen, wobei Γ die Linienbreite des Übergangs zwischen Grund- und angeregtem Zustand ist. Diese

Technik des Doppler-Kühlens bildet die Grundlage für die Erzeugung von Bose-Einstein-Kondensaten.

Das Laserkühlen setzt also die Existenz eines schnellen, geschlossenen Zyklus aus Laseranregung und spontaner Emission voraus. Auf Moleküle mit einer großen Zahl von langlebigen Vibrationszuständen lässt es sich daher nicht anwenden, da diese Zustände durch die spontane Emission besetzt werden und vom Laserlicht nicht erneut angeregt werden können: Damit ist der Kühlzyklus unterbrochen. Darüber hinaus begrenzt bei Standard-Laserkühlverfahren der Strahlungsdruck spontan gestreuter Photonen die erzielbare Dichte. Beide Probleme lassen sich nun mit Hilfe eines optischen Resonators vermeiden.

Der entscheidende Trick beruht darin, dass genauso wie das Lichtfeld eine Kraft auf Teilchen ausübt, diese Teilchen auch das Lichtfeld im Resonator verändern. Dabei nutzt man die Tatsache, dass die Rate für spontane Streuung mit dem Quadrat $1/\delta^2$ des Frequenzunterschiedes δ zwischen dem eingestrahlt Laserlicht und der Resonanzfrequenz der Teilchen abnimmt. Im Grenzfall großer Verstimmung $\delta \gg \Gamma$ ist die spontane Emission also stark unterdrückt. Aufgrund ihrer Polarisierbarkeit wirken die Teilchen dann einfach wie ein Medium mit einem variablen, von seiner momentanen Position abhängigen Brechungsindex, der die Resonanzfrequenz des Resonators verschiebt. Die Frequenzverschiebung der

Resonatormode, die ein Teilchen bewirkt, ist dabei proportional zur Wechselwirkungsenergie (potentiellen Energie) des Teilchens im Resonatorfeld und maximal, wenn das Teilchen sich an einem Bauch der



Beim Einfangen und Kühlen eines Atoms in einem Resonator sind die Dynamik von Lichtfeld und Atombewegung gekoppelt. Die horizontalen dunklen Linien zeigen den Ort der Wellenbäuche der Resonatormodenfunktion. Immer dann, wenn das Teilchen (rot) in der Nähe eines solchen Bauches ist, steigt die Intensität im Resonator an (grüne Linie). Das Teilchen startet mit einer relativ hohen Geschwindigkeit, sodass es zunächst über mehrere Bäuche läuft, wobei jedesmal die Lichtintensität kurz anwächst und es etwas gebremst wird (blaue Kurve), bis es schließlich an einem Bauch gefangen wird. Dieser Einfang lässt sich nun am gemittelten Anstieg der Lichtintensität auch direkt erkennen.

Resonatormode befindet. Der Gradient der Wechselwirkungsenergie als Funktion des Orts bestimmt wiederum die Kraft auf das Teilchen. Diese komplexe, gekoppelte Dynamik lässt sich nun zum Fangen und Kühlen von optisch polarisierbaren Teilchen nützen [1, 2].

KURZGEFASST...

Supraleitender Diamant
Russischen Physikern aus Moskau ist es gemeinsam mit amerikanischen Kollegen vom Los Alamos Laboratorium gelungen, Supraleitung in Diamant nachzuweisen. Sie haben dazu Bor-dotierte Diamant-Kristallite hergestellt, indem sie B_4C und Graphit bei einem Druck von 8 GPa und einer Temperatur von rund 2500 K miteinander reagieren ließen. Messungen der elektrischen Leitfähigkeit zeigen, dass dieser Diamant ein Typ-II-Supraleiter ist mit einer kritischen Temperatur von 4 K und dass die Supraleitung erst bei Magnetfeldern oberhalb 3,5 T zusammenbricht.
(E. A. Ekimov et al., Nature 428, 542 (2004))

Konstante Konstanten
Nicht bestätigt wurde kürzlich eine drei Jahre alte Analyse von Absorptionsspektren weit entfernter Quasare, derzufolge sich die

Feinstrukturkonstante α in den vergangenen Milliarden Jahren um $\Delta\alpha/\alpha \approx -7 \times 10^{-5}$ geändert hat. Indische und französische Astrophysiker kamen nun anhand besserer Daten zum Schluss, dass sich mit der heutigen Messgenauigkeit keine Variation von α in den vergangenen 10 Milliarden Jahren nachweisen lässt.^(*) Mit Laborexperimenten, in denen sich die Frequenz des 1s-2s-Zwei-photonenübergangs in Wasserstoff hochpräzise mithilfe einer Cäsium-Atomuhr messen ließ, konnte indes die mögliche Zeitabhängigkeit von α auf $\dot{\alpha}/\alpha = (-0,9 \pm 4,2) \times 10^{-15}$ pro Jahr eingegrenzt werden.⁽⁺⁾ Sog. optischen Atomuhren, die mit einzelnen Ionen in Fallen arbeiten und deren Takt nicht im Mikrowellen-, sondern im optischen Spektralbereich liegt, sollen in den nächsten Jahren eine Genauigkeit von 10^{-19} ermöglichen.^(#)
^(*) R. Srianand et al., Phys. Rev. Lett. 92, 121302 (2004)
⁽⁺⁾ M. Fischer et al., arxiv.org/abs/physics/0312086, vgl. auch Physik Journal, April 2003, S. 49
^(#) L.-S. Ma et al, Science 303, 1843 (2004)

Allgemeine Relativitätstheorie erneut bestätigt
Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie sagt voraus, dass elektromagnetische Strahlung, die auf dem Weg von der Quelle zum Beobachter auf der Erde an der Sonne vorbei propagiert, vom Gravitationsfeld der Sonne doppelt so stark abgelenkt wird, als nach Newtons Gravitationsgesetz erwartet. Die Ablenkung lässt sich durch den sog. post-Newtonischen Parameter γ ausdrücken, der in Newtons Theorie verschwindet und nach Einstein den Wert 1 hat. Durch eine Auswertung von Beobachtungen an über 500 Radioquellen, die in den vergangenen zwei Jahrzehnten mithilfe der Very Long Baseline Interferometry gemacht wurden, haben amerikanische Astrophysiker nun für die Ablenkung von Radiowellen den Wert $\gamma = 0,9998 \pm 0,0004$ gefunden und damit die Allgemeine Relativitätstheorie erneut bestätigt.
(S. S. Shapiro et al., Phys. Rev. Lett. 92, 121101 (2004))

Prof. Dr. Helmut Ritsch, Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck, A-6020 Innsbruck, Österreich

Für Resonatoren hoher Güte kann bereits ein einzelnes Teilchen je nach seiner Lage die Resonanzfrequenz um mehr als eine Resonatorlinienbreite verschieben und so die Lichtstärke im Resonator um mehr als eine Größenordnung ändern [3]. Man wählt nun geschickterweise eine Lichtfrequenz deutlich unterhalb der Resonanzlinie des Teilchens (rote Verstimmung) und unterhalb der Eigenfrequenz des leeren Resonators. In diesem Fall wird das Teilchen zu den Maxima der Lichtintensität, d. h. den Bäuchen des Resonatorfeldes, hingezogen. Gleichzeitig wächst die Lichtintensität im Resonator an, sobald das Teilchen in der Nähe eines Bauches angelangt ist, da die Eigenfrequenz des Resonators durch das Teilchen in Richtung der eingestrahlten Frequenz verschoben wird. Das Teilchen verändert also durch seine Bewegung das Potential, in dem es sich bewegt und fängt sich selbst ein. Da das Lichtfeld etwas verzögert auf die Teilchenbewegung reagiert, sieht das Teilchen bei der Bewegung vom Potentialminimum weg eine größere Kraft als auf dem Hinweg. Analog zum Rollen einer Kugel auf einer Schaumstoffunterlage führt dies im Mittel zu einer Abbremsung des Teilchens, das somit gefangen und gleichzeitig noch gekühlt wird.

Das neue Verfahren funktioniert im Prinzip für jedes Teilchen, das ausreichend polarisierbar ist, unabhängig von der genauen Lage und Anzahl seiner Energieniveaus. Eine genauere quantenmechanische Analyse des Kühlprozesses zeigt, dass letztendlich Quantenfluktuationen im Lichtfeld, die durch Lichtein- und -auskopplung an den Spiegeln entstehen, verhindern, dass das Teil-

chen vollständig zur Ruhe kommt. Stattdessen stellt sich eine minimale Temperatur von $kT = \hbar\kappa$ ein, wobei κ die Linienbreite des Resonators ist. Je nach der Qualität der Spiegel und der Geometrie kann diese Temperatur deutlich unter der Grenztemperatur $kT = \hbar\Gamma$ liegen, die sich mittels Doppler-Kühlen erzielen lässt [1].

Nachdem bereits in mehreren früheren Experimenten klare Hinweise auf Veränderungen von Lichtkräften in Resonatoren im Einklang mit den theoretischen Vorhersagen gefunden wurden, ist es am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching in der Arbeitsgruppe von Gerhard Rempe nun erstmals zweifelsfrei gelungen, resonatorinduzierte Kühlung an einem einzelnen Rubidiumatom in einer Dipolfalle nachzuweisen [2]. Eleganterweise lässt sich die vom Atom induzierte Änderung der Lichtstärke im Resonator zum direkten Nachweis des Einfanges und der Kühdynamik verwenden. Im Münchner Experiment gelang es, die spontane Streurrate im Vergleich zu konventionellen Kühlverfahren um eine Größenordnung zu vermindern. Dieser Erfolg gibt nun zu großem Optimismus Anlass im Hinblick auf eine Anwendung zur Kühlung von einerseits Molekülen und andererseits neuen Sorten von Atomen, für die bisherige Laserkühlmethoden nicht oder nur begrenzt infrage kamen. Zudem sollte sich die maximal erzielbare Dichte für Laserkühlung erhöhen lassen.

Eine wichtige Frage für die praktische Anwendung des Verfahrens ist die maximale Zahl der Teilchen, die in einem Resonator gekühlt werden können. Numerische Simulationen zeigen zwar eine vom Resonatorvolumen weitgehend

unabhängige Endtemperatur, jedoch nimmt die Kühlrate mit dem Resonatorvolumen ab, sodass sich dieses nicht beliebig vergrößern lässt. Interessanterweise lässt sich dieses Problem vermeiden, wenn nach einem Vorschlag von V. Vuletic von der Stanford Universität das Laserlicht nicht über die Resonatorspiegel eingekoppelt wird, sondern die Teilchen von der Seite direkt beleuchtet werden. Hier startet ein überraschender Selbstorganisationsprozess der Atome, der zu einer Verstärkung der kollektiven Kühlrate führen kann [4, 5]. Kollektive, lichtinduzierte Atomschwingungen in optischen Ringresonatoren wurden kürzlich experimentell auch in Tübingen und Hamburg beobachtet [6, 7]. Die Kombination dieser Ergebnisse mit dem eindeutigen Kühlnachweis aus München erlaubt eine sehr optimistische Sicht auf den Einsatz optischer Resonatoren für eine neue Generation von Laserkühlverfahren in naher Zukunft.

HELMUT RITSCH

- [1] P. Horak, G. Hechenblaikner, K. M. Gheri und H. Ritsch, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 4974 (1997)
- [2] P. Maunz, T. Puppe, I. Schuster, N. Syassen, P. W. H. Pinkse und G. Rempe, *Nature* **428**, 50 (2004)
- [3] R. J. Thompson, G. Rempe und H. J. Kimble, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1132 (1992)
- [4] H. W. Chan, A. T. Black und V. Vuletic, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 063003 (2003)
- [5] P. Domokos und H. Ritsch, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 253003 (2002)
- [6] B. Nagorny, Th. Elsässer und A. Hemmerich, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 153003 (2003)
- [7] D. Kruse, C. von Cube, C. Zimmerman und Ph. W. Courteille, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 183601 (2003)