

Neuer Kühlmechanismus für die Quantentechnologie

Max-Planck-Wissenschaftler haben das erste universelle Verfahren zur Laserkühlung von Atomen und Molekülen entwickelt

Eine neue Methode, mit der man einzelne Atome gezielt abbremsen und präzise positionieren kann, haben Forscher am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München verwirklicht. Das besondere an dieser Kühlmethode besteht darin, dass sie erstmals auch bei anderen Teilchen wie beispielsweise Molekülen funktioniert, die mit herkömmlichen Laserkühlverfahren nicht abgebremst werden können. Die Entdeckung der Garchinger Forscher, dass sich Atome durch Ankopplung an einen optischen Resonator kühlen lassen, ist ein wichtiger Schritt zur Entwicklung eines universell einsetzbaren Laserkühlmechanismus für die Quantentechnologie. (Nature, Vol. 428, Seite 50, 4. März 2004)

Die erstmalige Abbremsung eines Strahls von Atomen mit Hilfe von Laserlicht vor etwa 20 Jahren hat ein sich stürmisch entwickelndes Forschungsgebiet begründet, das mittlerweile in vielen Zweigen der physikalischen Forschung Einzug gehalten hat. Nicht nur bei der Erzeugung von ultrakalten Bose-Einstein-Kondensaten, sondern auch beim Bau ultrapräziser Atomuhren kommt die Kühlung mittels Laserlicht zum Einsatz. Die Bedeutung der Laserkühlung für die moderne Physik wurde daher im Jahre 1997 mit der Verleihung des Physiknobelpreises eindrucksvoll dokumentiert. Allerdings sind die bisher verwendeten Kühlverfahren nicht universell einsetzbar. Vielmehr können bisher nur einige ausgewählte Atomsorten aus dem Periodensystem der Elemente mit Licht gekühlt werden, nicht aber Moleküle.

Alle bisherigen Kühlverfahren beruhen darauf, dass die gerichteten Lichtteilchen eines Laserstrahls, die Photonen, von den Atomen absorbiert und danach in unterschiedliche Richtungen abgestrahlt werden. Der mit der Richtungsänderung verbundene Rückstoß der Photonen führt zu einer Bremskraft, die dem Gas Wärme entzieht. Die entnommene Energie wird von den emittierten Photonen also davongetragen: Ein Atom sendet Photonen bevorzugt mit einer charakteristischen Energie aus. Um ein Kühlen zu erreichen, strahlt man "rot verstimmt" Photonen mit geringerer Energie auf das Atom ein. Damit das Atom nun ein Photon mit seiner charakteristischen Energie aussenden kann, muss die Energiedifferenz durch Verminderung der Bewegungsenergie ausgeglichen werden - das Atom wird dadurch langsamer (und kühler).

Ein wesentliches Problem dieser Kühlverfahren ist jedoch, dass während des Streuprozesses das Atom kurzzeitig in einen angeregten Zustand gelangt. Kehrt es bei der Abstrahlung eines Photons nicht wieder in seinen ursprünglichen Ausgangszustand zurück, so kommt der Kühlprozess zum Erliegen. Daher sind diese Kühlverfahren nur auf ausgewählte Atomsorten, die nur wenige mögliche Endzustände aufweisen, anwendbar. Auf komplexere Systeme, insbesondere Moleküle, lassen sich diese Verfahren nicht anwenden, da diese stets eine Vielzahl von Zuständen aufweisen, weil sich die Atome in Molekülen auch gegeneinander bewegen können.

Bei dem neuen Kühlverfahren müssen die zu kühlenden Teilchen nicht angeregt werden. Stattdessen wird die Wechselwirkung des Teilchens mit einem Lichtfeld, das von außen in einen Resonator aus zwei hochreflektierenden Spiegeln eingestrahlt wird, zum Kühlen genutzt. Bewegt sich das Atom zwischen den Spiegeln, so führt dies dazu, dass das von dem Resonator ausgesandte Licht energiereicher ist als das auf den Resonator eingestrahlte Laserlicht. Die Energiedifferenz entstammt der Bewegungsenergie des Atoms, welches dadurch abgebremst wird. Da das Atom in diesem Kühlverfahren nicht angeregt werden muss, eignet sich dieses Verfahren prinzipiell auch für Teilchen, die mit konventionellen Laserkühlmethoden nicht gekühlt werden können.

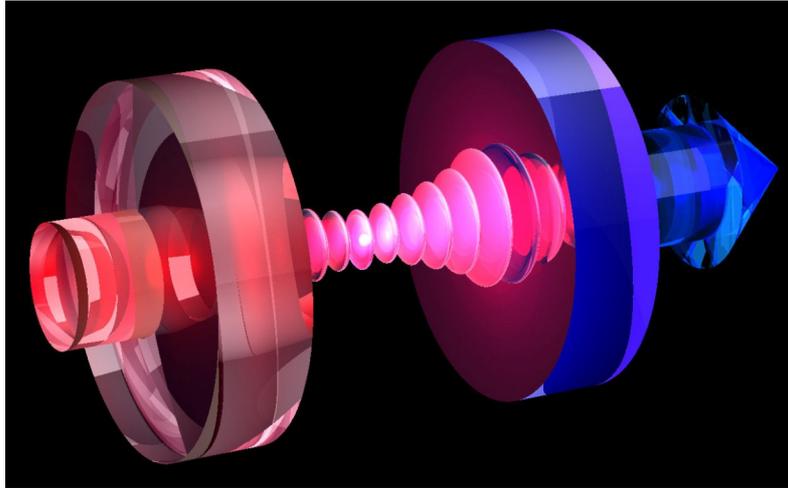


Abbildung:

Kühlung eines Atoms mit einer stehenden Lichtwelle zwischen zwei hochreflektierenden Spiegeln. Die Abnahme der Bewegungsenergie des Atoms beruht auf einer Blauverschiebung des transmittierten gegenüber dem eingestrahnten Laserstrahl. Das vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München realisierte Kühlverfahren eröffnet erstmalig die Möglichkeit, neben Atomen auch Moleküle optisch zu kühlen.

Bild: MPI für Quantenoptik

Der Mechanismus, der die Bewegungsenergie des Atoms auf das vom Resonator ausgesandte Photon überträgt, erklärt sich wie folgt: Strahlt man auf der Achse des Resonators von außen einen Laserstrahl ein, so wird dieser mehrere hunderttausend mal zwischen den Spiegeln hin und her reflektiert. Dabei bildet sich analog zu einer schwingenden Saite ein "stehendes" Lichtfeld, vorausgesetzt, der Lichtstrahl hat eine ganz bestimmte Wellenlänge bzw. Farbe, die durch den Abstand der Spiegel festgelegt wird. Dabei bilden sich Bäuche und Knoten mit hoher und niedriger Lichtintensität (siehe Abbildung). Befindet sich nun ein Atom in dem Lichtfeld, so ändert dieses lokal die Lichtgeschwindigkeit. Obgleich der Effekt sehr klein ist, wird er durch die vielen Reflexionen verstärkt. Experimentell kann man dabei erreichen, dass dem Licht der Resonator verkürzt erscheint und damit die "passende" Wellenlänge des Lichtes ebenfalls kürzer wird. Dieser Effekt hängt nun davon ab, ob sich das Atom an einem Bauch oder Knoten aufhält. Befindet sich das Atom in einem Bereich verschwindender Lichtintensität, hat es keinen Effekt auf das Lichtfeld. Bewegt sich das Atom aber in einen Bereich hoher Lichtintensität, so passt die Wellenlänge des eingestrahnten Laserlichtes nicht mehr in den Resonator. Der Laserstrahl wird daher am Einkoppelspiegel reflektiert, so dass kein weiteres Licht in den Resonator gelangt. Andererseits kann das Licht, welches bereits im Resonator gespeichert ist, diesen aufgrund der hohen Reflektivität der Spiegel nicht sofort verlassen. Es muss sich vielmehr den geänderten Bedingungen anpassen. Die Wellenlänge des gespeicherten Lichtes wird dadurch verkürzt: Es wird "blau verstimmt" und damit energiereicher. Die "Mehrenergie" gegenüber dem eingestrahnten Licht entstammt der Bewegungsenergie des Atoms, welches langsamer wird. Da das Atom bei diesem Prozess nicht in einen angeregten Zustand gelangen muss, ist dieser Resonator-Kühlmechanismus auch für Teilchen geeignet, bei denen konventionelle Laserkühlmechanismen nicht anwendbar sind, wie zum Beispiel für Moleküle.

Bei ihren Versuchen haben die Garchinger Forscher das Atom mit Hilfe eines weiteren Lasers auch tatsächlich im Zentrum des Resonators gespeichert. Mit der neuen Kühlmethode konnten sie das Atom an den Bäuchen der optischen Stehwelle besser lokalisieren und die Speicherzeit des Atoms im Resonator deutlich verlängern. Interessant ist dabei, dass das Kühlverfahren mit extrem wenig Licht auskommt: In den Experimenten befand sich im Mittel nur etwa ein hundertstel Photon im Resonator. Im Vergleich zu konventionellen Laserkühlverfahren für Atome konnten die Wissenschaftler zeigen, dass das neue Kühlverfahren auch eine mindestens fünfmal so starke Bremskraft erreicht.

Die Ergebnisse der Garching Forscher sind auch im Hinblick auf eine ganz andere Anwendung interessant: In zukünftigen Experimenten könnte man nämlich mit einem einzelnen, gut lokalisierten Atom in einem optischen Resonator eine im internen Zustand des Atoms gespeicherte Quanten-Information auf ein Photon übertragen, dieses zu einem zweiten, ähnlich gebauten System schicken und die Information dort in einem anderen Atom wieder abspeichern. Das System ist daher eine ideale Quantenschnittstelle zwischen ruhenden und fliegenden Quantenbits und ein grundlegender Baustein für ein zukünftiges Quantennetzwerk aus vielen, verteilten Atom-Resonator-Systemen.

Originalveröffentlichung:

P. Maunz, T. Puppe, I. Schuster, N. Syassen, P.W.H. Pinkse, und G. Rempe

Cavity cooling of a single atom

Nature, Vol. **428**, Seite 50, 4. März 2004

Weitere Informationen erhalten Sie von:

Prof. Gerhard Rempe

Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Hans-Kopfermann-Str. 1
85748 Garching

Tel: 089 32905-701

Fax: 089 32905-311

E-Mail: Gerhard.Rempe@mpq.mpg.de