

Physik-Nobelpreis 1997

STEVEN CHU, Stanford University, CA

WILLIAM PHILLIPS, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD

CLAUDE COHEN-TANNOUJJI, Collège de France/Ecole Normale Supérieure, Paris

1917 zeigte ALBERT EINSTEIN, dass ein molekulares Gas in einem thermischen Lichtfeld (z.B. von einer Glühlampe) dessen Temperatur annimmt. Dabei übertragen die Photonen beim Auftreffen auf ein Molekül nicht nur die Energie ("Lichtdruck"), sondern auch den Impuls ($m \cdot v$) und ändern somit die Geschwindigkeit des Kollisionspartners.

Atome eines Gases besitzen bei Raumtemperatur eine Teilchengeschwindigkeit von einigen tausend Kilometern pro Stunde. ARTHUR L. SCHAWLOW (Stanford, Nobelpreis 1981) entwickelte zur Abbremsung und somit Kühlung der Atome folgendes Verfahren:

Atome werden von zwei entgegengesetzt angeordneten Lasern beleuchtet. Die Frequenz der Laser liegt etwas unterhalb der Absorptionsfrequenz der Gasteilchen. Diese können dadurch in Resonanz mit dem Laserstrahl treten und dessen Photonen absorbieren. Dabei nehmen sie deren Impuls auf und werden abgebremst. Zwar können die Atome die Photonen später wieder abgeben, was mit einem Rückstoß (und Geschwindigkeitszunahme) verbunden ist, doch da dies in beliebiger Richtung geschieht, heben sich die Effekte gegenseitig auf.

Dieser Schnellbremsung (in 1 ms von ca. 1000 km/h auf ca. 0 km/h) versuchen die Atome durch seitliches Wegdriften zu entfliehen. Man verwendet deshalb heute ein System von sechs Laserstrahlen. In ihrem Kreuzungspunkt können die Atome nur noch langsam herumschleichen. Das Licht wirkt wie ein zäher Sirup, der auch als optische Melasse bezeichnet wird. Allerdings reichen die Laserstrahlen nicht aus: Aufgrund der Schwerkraft fallen Atome nach etwa einer Sekunde aus dem optischen Sirup heraus. Nur mit Hilfe eines zusätzlichen Magnetfeldes können die Atome dauerhaft gespeichert werden.

Die theoretischen Berechnungen ergaben zu erwartende Temperaturen von 0,001 K. Überraschenderweise fand man tausendmal tiefere Temperaturen. Diese zusätzliche Kühlung beruht nicht auf dem Lichtdruck allein, sondern hängt mit der Orientierung des Spins ("Drehsinn") der Atome zusammen. Der Spin wird durch Licht so ausgerichtet, dass die Energie des Atoms minimal ist, wobei der Wert für die Energie vom Drehsinn des Lichts abhängt. Wenn sich das Atom innerhalb des optischen Sirups von einem Ort zum andern bewegt, so trifft es dort auf einen Laserstrahl mit anderem Drehsinn. Der anfänglich energetisch günstigste Spin des Atoms ist es nun nicht mehr. Die damit verbundene Zunahme der potentiellen Energie geht zulasten der kinetischen Energie, d.h. das Atom wird noch langsamer und kühler. Ausserdem wird der Spin des Atoms durch den neuen Laserstrahl neu ausgerichtet. Wohin sich das Atom auch bewegt, es muss immer "bergauf" (Zunahme der Lageenergie); man bezeichnet deshalb diese Kühlung als **Sisyphus-Kühlung**.

Die mit der Sisyphus-Kühlung erreichbare Temperatur liegt nur wenig oberhalb einer als fundamental erachteten Grenztemperatur, dem sog. Rückstosslimit. Dies entspricht der bei der Absorption eines einzigen Photons auf ein Atom übertragenen Rückstossenergie. Dies lässt sich jedoch umgehen, wenn man solche Atome, die nach einem spontanen Emissionsvorgang zufällig beinahe in Ruhe waren, aus dem Kühlprozess herausnimmt. In den siebziger Jahren hatten italienische Physiker festgestellt, dass sich Alkalimetalle durch Lichteinwirkung in bestimmte Quantenzustände (sog. Dunkelzustände) pumpen liessen, die nicht mehr mit dem Licht wechselwirken und sich also nicht wieder aufheizen können. CHU, COHEN-TANNOUDDI und PHILIPS gelang es in einer Reihe von Experimenten, die Rückstoss-Grenztemperatur für Helium ($4 \cdot 10^{-6}$ K) deutlich zu unterschreiten: 1995 erreichten sie für He-Gas $T = 0,18 \cdot 10^{-6}$ K.

Die Anwendungen dieser kalten Atome sind vielfältig:

- Eine längere Beobachtungszeit der langsamen Atome ermöglicht präzisere Messungen und damit einen besseren Atomstandard (Atomuhren), mit dem beispielsweise die Bewegung der Kontinente online gemessen werden können.
- Atomlithographie: Einzelne Atome können gezielt auf einem Substrat deponiert werden. Um die Atome zu fokussieren, werden Linsen benötigt, die ebenfalls mit Licht realisiert werden können. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Atome einmal absorbiertes Licht auch stimuliert (nicht nur spontan) abstrahlen können. Der Rückstoss ist dabei - anders als bei der Kühlung - durch die Ausbreitungsrichtung des stimulierenden Laserstrahls genau festgelegt. Mit zwei Laserstrahlen, einer für die Absorption und einer für die Emission, lassen sich Atome leicht aus ihrer ursprünglichen Richtung ablenken und mit geschickt angeordneten Laserstrahlen präzise fokussieren. Mit diesen "optischen Pinzetten" lassen sich etwa lebende Zellen bewegen.
- BOSE-EINSTEIN-Kondensation: Atome besitzen als Quantenobjekte nicht nur Teilchen- sondern auch Welleneigenschaften. Je langsamer sich die Atome bewegen, desto grösser ist ihre Wellenlänge. Bei einem extrem kalten Gas lässt sich erreichen, dass der Abstand zwischen zwei Atomen kleiner als die Wellenlänge ist. Dann überlappen sich die Atome und kondensieren in den energetisch tiefsten Zustand. Dabei bildet sich ein makroskopisches Quantenobjekt mit bis zu 10 Millionen Atomen und Abmessungen von 0,1 mm. Dieser neuartige Zustand der Materie wurde schon 1925 von EINSTEIN vorhergesagt, aber erst 70 Jahre später beobachtet.
- Atomlaser: Aus einem BOSE-EINSTEIN-Kondensat werden Atome ausgekoppelt. Der Atomstrahl zeichnet sich dadurch aus, dass alle Atome annähernd gleiche Wellenlänge besitzen. Der erste Atomlaser konnte bis zu 200mal pro Sekunde "feuern". Jeder Puls besteht aus rund 1 Million Atomen. Geforscht wird nun an einem kontinuierliche emittierenden Atomlaser. Als optische Bauteile (z.B. Strahlteiler) wird Licht verwendet (bei einem Lichtstrahl sind dies Spiegel). Da Atome sehr empfindliche Kraftsensoren darstellen, ist nicht auszuschliessen, dass mit sog. Atominterferometern neue Erdölfelder oder grössere Wasservorräte anhand der lokalen Erniedrigung der Gravitationskraft ausgespürt werden können.

Quellen:

- *Stanford-News*, 10/15/97 (<http://www-leland.stanford.edu>)
- *Spektrum der Wissenschaft*, Dezember 1997
- *NZZ*, 10.12.97