

Abbremsung von Atomstrahlen mittels Laserlicht

Erzeugung ultrakalter Atome / Von Wolfgang Ertmer

Seit Beginn der 70er Jahre hat die Atom-spektroskopie durch die Einführung kontinuierlich durchstimmbarer (in der Farbe veränderbarer) Laser, insbesondere der Farbstofflaser, eine stürmische Renaissance erlebt. Im Gegensatz zu früheren Zeiten wurden die experimentellen Ergebnisse nun nicht mehr durch die spektrale Bandbreite der Lichtquelle, sondern allein durch die Eigenschaften des zu untersuchenden atomaren Gases bestimmt. Damit blieb vor allem die thermische Bewegung der Atome, die sich z. B. im Dopplereffekt zeigt, das vordringliche experimentelle Problem. Die dadurch induzierte, verstärkte Entwicklung sog. „Doppler-freier“ Spektroskopiemethoden konnte diesen Effekt prinzipiell aber nur in der ersten Ordnung des Dopplereffektes (abhängig von der kinetischen Energie der Atome) sowie andere geschwindigkeitsabhängige Einflüsse bleiben erhalten und bestimmten bis zur Einführung der hier erläuterten neuen Methoden die Grenzen der experimentellen Genauigkeit.

„Um das Übel an der Wurzel zu packen“, müßte folglich die Bewegung der Atome gegenüber der Lichtquelle selbst beeinflußt bzw. reduziert werden. Dazu reicht es nicht, die mittlere Geschwindigkeit der Atome zu verlangsamen, sondern die Relativgeschwindigkeit der Atome – anders ausgedrückt: die Temperatur – müßte drastisch verringert werden.

Mit den klassischen Methoden der Kühlung lassen sich aber nicht die niedrigen Temperaturen (Relativgeschwindigkeiten) bei nennenswerten Gasdrücken erreichen, die für diesen Zweck notwendig wären. Demgegenüber verwendet die *Laserkühlung* keine kalten Wände, sondern die Strahlungsdruckkräfte eines resonanten Laserstrahls, um die Atome direkt abzukühlen. Dabei beginnt man nicht mit einem „normalen“ Gas, sondern einem Atomstrahl. Dies ist ein Strahl freier Atome in einer Hochvakuumapparatur. Sie werden z. B. bei Metallatomen aus einem Tiegel durch eine kleine Öffnung verdampft und durch eine Blende zu einem feinen Strahl freier (wechselwirkungsfreier) Atome kollimiert (gebündelt). Diese Atome haben dann je nach Kollimationsverhältnis nur noch eine sehr geringe transversale Geschwindigkeitskomponente; die longitudinale Geschwindigkeitskomponente bleibt, ähnlich wie in einem Gas, über ein relativ großes Geschwindigkeitsintervall verteilt (Maxwell-Verteilung). Das bedeutet, daß man prak-

tisch nur einen Freiheitsgrad (eine Geschwindigkeitskomponente) kühlen muß, um die Atome des ganzen Atomstrahls zu kühlen.

Hierzu läßt man dem Atomstrahl einen Laserstrahl entgegenlaufen, der auf eine Resonanzlinie der Atome abgestimmt ist. Die Atome absorbieren Photonen dieses Laserstrahls, gehen in einen angeregten elektronischen Zustand über und geben nach einer Zeit von typisch 10 ns ihre Energie in Form eines spontan emittierten Photons wieder ab. Während dieses Vorgangs wird nicht nur Energie, sondern auch der Impuls ausgetauscht.

Bei jeder Absorption ändert sich der Impuls der Atome um ca. $-\hbar\mathbf{k}$ (\mathbf{k} : Wellenvektor). Bei jeder spontanen Emission eines Photons ändert sich der atomare Impuls dem Betrage nach auch um ca. $|\hbar\mathbf{k}|$; da diese spontanen Photonen aber stochastisch über alle Raumwinkel symmetrisch verteilt emittiert werden, mittelt sich der resultierende atomare Rückstoß zu null. Der atomare Rückstoß aufgrund der Absorptionsprozesse addiert sich hingegen konstruktiv auf und bremst somit die Atome bei der gegebenen Geometrie ab.

Die resultierende Kraft (Impulsänderung des Atoms/Zeiteinheit) ist $\hbar\mathbf{k}/\Delta t$. Die Zykluszeit Δt ergibt sich aus der natürlichen Lebensdauer τ des angeregten Zustandes und der momentanen Sättigung s ($s = f(I_L, v_L, \vec{v}, t)$) zu $\Delta t = \tau \cdot (1 + 2s)/s$. Die mittlere Geschwindigkeitsänderung Δv des Atoms pro Absorption und die mittlere Beschleunigung a sind folglich (m : Masse des Atoms):

$$\Delta v = -\frac{\hbar k}{m}, \quad a = -\frac{\hbar k}{m} \frac{1}{\tau} \frac{s}{1 + 2s}$$

Die meisten Experimente wurden bisher an einem Natriumatomstrahl durchgeführt; der Kühlaser (ein Farbstofflaser) wird dann auf die Natrium-D₂-Linie (589 nm) abgestimmt. Damit ergeben sich folgende experimentelle Werte: $\tau = 16$ ns, $\Delta t = 48$ ns (bei $s = 1$), $\Delta v \approx 3$ cm/s. Die mittlere longitudinale Geschwindigkeit im Atomstrahl ist ca. 650 m/s; man braucht also im Mittel etwa 22000 Absorptions-Emissions-Zyklen zur vollständigen Abbremsung des Strahls. Da hierbei nur ca. 1 ms vergeht, ist der gesamte Abbremsvorgang nach ungefähr 37 cm beendet. Für dieses Experiment ist also jede Atomstrahlapparatur geeignet! Warum wurde dieses Experiment dann nicht schon eher durchgeführt?

1. In den meisten Fällen kann das angeregte Atom auch in einen metastabilen Zustand zurückkehren, der vom Laserlicht nicht mehr angeregt wird; bei 22000 Zyklen verhindert auch ein sehr kleines Verzweungsverhältnis zu einem solchen Zustand die Abbremsung. In Abb.1 ist ein Ausschnitt aus dem Termschema von Natrium mit dem Kühlübergang und einem möglichen, optisch pumpenden Übergang vom Zustand $^2S_{1/2}, F=2$ nach $^2S_{1/2}, F=1$, der ca. 1,7 GHz entfernt ist, dargestellt. Aufgrund der natürlichen Linienbreite des Überganges von 10 MHz wären diese Atome bei 1,7 GHz Differenzfrequenz nicht mehr resonant mit dem Laserlicht.

2. Die Dopplerverschiebung der Absorptionsfrequenz eines Atoms, das sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} auf den Laserstrahl zubewegt, hat die Größe $\hbar\mathbf{k}/(2\pi)$ bzw. $-v/\lambda$;

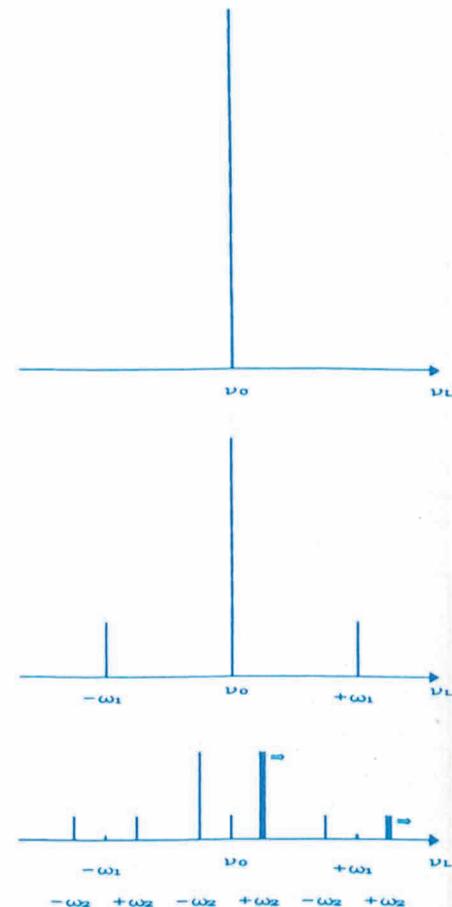


Abb.2: Schematische Darstellung des Frequenzspektrums im Laserstrahl vor dem ersten elektro-optischen Modulator (EOM1) (oben), hinter EOM1 (Modulationsfrequenz: ω_1) (Mitte) und hinter EOM2 (Modulationsfrequenz: ω_2) (unten).

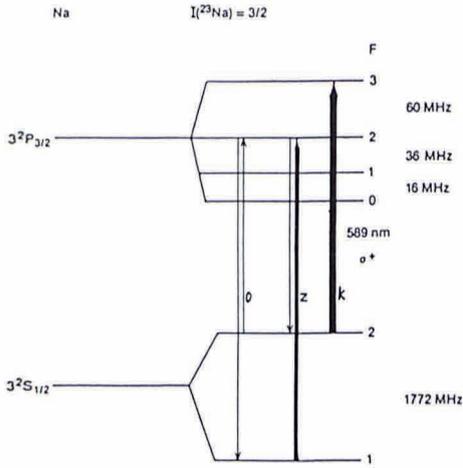


Abb. 1: Ausschnitt aus dem Natrium-Termschema mit dem Kühlübergang (K), einem „optischen Pumpzyklus“ (o) und dem Kompensationsübergang (z).

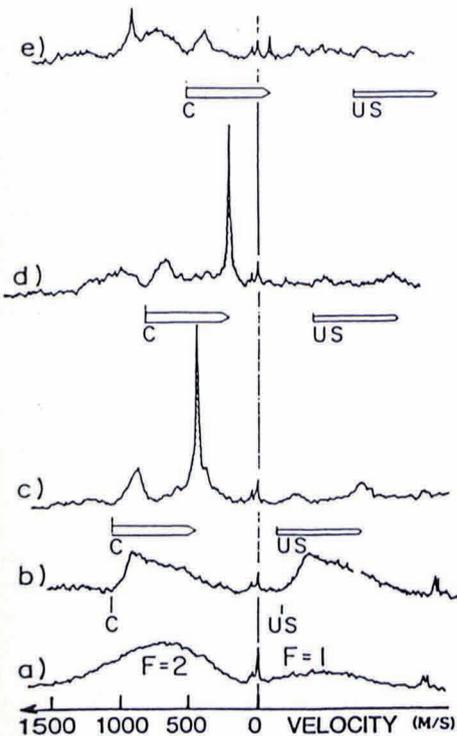


Abb. 4: Experimentelle Ergebnisse: a) Geschwindigkeitsverteilung ohne Kühlaser mit den beiden Nullgeschwindigkeitsmarken für beide Hyperfeinunterzustände. b) Mit Kühlaser ohne EOM1 (ohne sweep). c-e) Vollständige Kühlung mit verschiedenen Startfrequenzen ν_0 (Startgeschwindigkeiten „C“). Die Pfeile entsprechen einer Durchstimmung von 1GHz \leftrightarrow ca. 600 m/s. Bei c) ist die Startgeschwindigkeit 1080 m/s und die Endgeschwindigkeit der komprimierten, gekühlten Gruppe 460 m/s; bei d) sind es 840 m/s Startgeschwindigkeit und 210 m/s Endgeschwindigkeit. Bei e) ist bei einer Startgeschwindigkeit von 530 m/s die Endgeschwindigkeit negativ -90 m/s.

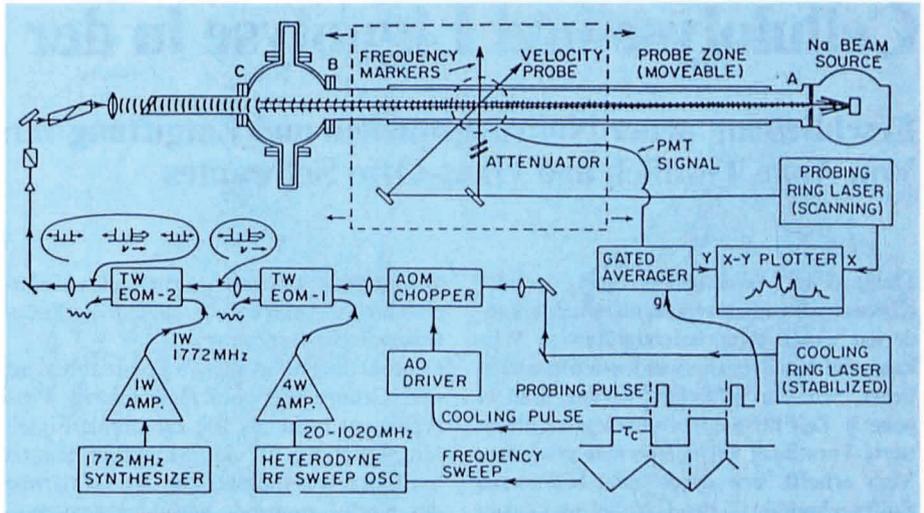


Abb. 3: Schema der gesamten Apparatur. Der Kühlaserstrahl durchläuft nacheinander einen akusto-optischen Modulator AOM und die beiden elektro-optischen Wanderwellenmodulatoren (TW EOM-1,2). Nach jedem Kühlvorgang (Frequenzsweep) wird der Kühlaserstrahl kurz vom AOM unterbrochen und das Fluoreszenzlicht, das vom langsam durchgestimmten Nachweislaserstrahl induziert wird, aufgenommen. Dies ergibt dann die resultierende Geschwindigkeitsverteilung; der unter 90° eingestrahlte Nachweislaserstrahl erzeugt Nullgeschwindigkeitsmarken.

für ein Natriumatom mit einer Geschwindigkeit von 1000 m/s sind dies etwa -1,7 GHz. Dies ist um zwei Größenordnungen größer als die natürliche Linienbreite von 10 MHz; somit ist der Kühlaserstrahl nur mit einer sehr kleinen Geschwindigkeitsgruppe in Resonanz. Wenn die Atome aus einem solchen Intervall von einigen 10 m/s abgebremst worden sind, laufen sie aus der Resonanz und damit aus dem Abbremsvorgang heraus.

In der Lösung dieser Probleme unterscheiden sich die verschiedenen Methoden der Atomstrahlkühlung. Wir entschieden uns für elektro-optische Methoden der Frequenzmodulation von Laserstrahlung, um in einem Laserstrahl einer Frequenz die Energie auf gleichzeitig mehrere Frequenzen, wie in Abb. 2 dargestellt, zu verteilen (auf die recht komplizierten Details dieser Methode kann im Rahmen dieser Darstellung nicht eingegangen werden).

Zwei Frequenzen werden, wie in Abb. 1 erläutert, benötigt, um einerseits die Atome abzubremsen und andererseits optisch gepumpte Atome aus dem Zustand $^2S_{1/2}$, $F=1$ in den Zustand $^2S_{1/2}$, $F=2$ zurückzupumpen. Um die Resonanzbedingung aufrechtzuerhalten, haben wir in dem Maße, in dem sich die Dopplerverschiebung der langsamer werdenden Atome verringert, diese beiden Frequenzen, wie in Abb. 2 und Abb. 3 gezeigt, synchron zu größeren Frequenzen durchgestimmt. Diese Abbremszyklen von typisch 1 ms Dauer werden dann periodisch wiederholt. Während jeder Periode fliegen frisch nachgeströimte Atome nur etwa 1 m frei, bevor auch sie abgebremst werden; das heißt, mit einer etwa 1,5 m lan-

gen Apparatur und einem etwas modifizierten Durchstimmchema der Laserfrequenz läßt sich praktisch der ganze Atomstrahl abbremsen. Abbildung 4 zeigt die experimentellen Ergebnisse, die von uns bei der Abbremsung eines Natriumatomstrahls erreicht wurden. Die Breite der Geschwindigkeitsverteilung lag nach der Abbremsung unter 10 m/s. Diese geringe Relativgeschwindigkeit entspricht einer Temperatur im Millikelvin-Bereich. Die mittlere Geschwindigkeit der gekühlten Atome konnte in weiten Bereichen, einschließlich der Geschwindigkeit 0 m/s, variiert werden; die Atome konnten sogar in ihrer Richtung umgekehrt werden (-90 m/s in Abb. 4). Damit war es erstmals gelungen, einen Atomstrahl fast vollständig ohne Verluste abzubremsen.

Die gleichen Kräfte, mit denen man Atome abbremsen kann, eignen sich auch zur weiteren Manipulation neutraler Atome, z. B. um die Dichte des Atomstrahls zu erhöhen, die Atome in sog. „Atomfallen“ in einem kleinen Volumen für einige 10 s festzuhalten oder die kalten Atome von den heißen Atomen zu trennen. Die gekühlten Atome lassen sich nach dem ersten Kühlvorgang in geeigneten Laserfeldern anschließend noch weiter in den Sub-Mikrokelvin-Bereich abkühlen.

Damit eröffnet die präzise bestimmbare, sehr schmale Geschwindigkeitsverteilung der langsamen, kalten Atome viele neue Bereiche und Dimensionen, z. B. in der Stoßphysik, Quantenelektrodynamik, Mikrowellen- und Laserspektroskopie, Metrologie, Quantenmechanik (z. B. Bosekondensation), Laserphysik, Oberflächenphysik.