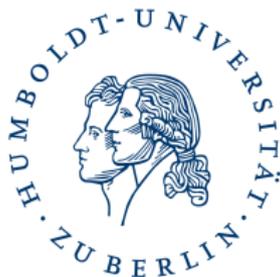


Laserkühlung-Präparation und Anwendungen

Sebastian Bommel

Humboldt-Universität zu Berlin
Institut für Physik

02. Juni 2010

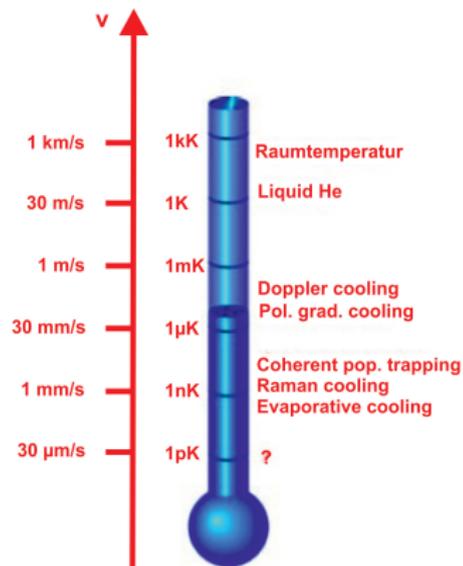


Inhaltsverzeichnis

- 1 Motivation
- 2 Physikalische Grundlagen des Kühlungsprozesses
- 3 Doppler-Kühlung
- 4 Sub-Doppler-Kühlung
- 5 Evaporative Kühlung
- 6 Anwendungen

- 1 Motivation
- 2 Physikalische Grundlagen des Kühlungsprozesses
- 3 Doppler-Kühlung
- 4 Sub-Doppler-Kühlung
- 5 Evaporative Kühlung
- 6 Anwendungen

Motivation I: Temperaturskala

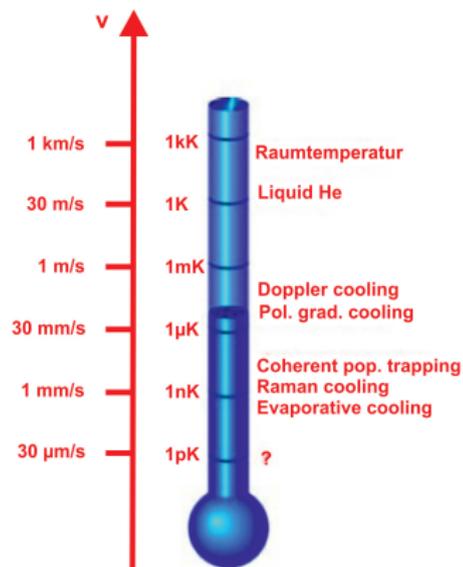


Adams, *Prog. Quant. Electr.*,: 1997, Vol. 21, No. 1,

Motivation I: Temperaturskala

Atome: Geschwindigkeit besitzt
Maxwell-Boltzmann-Verteilung

$$v_{rms} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{3k_B} \sqrt{\frac{T}{m}}$$



Adams, *Prog. Quant. Electr.*,: 1997, Vol. 21, No. 1,

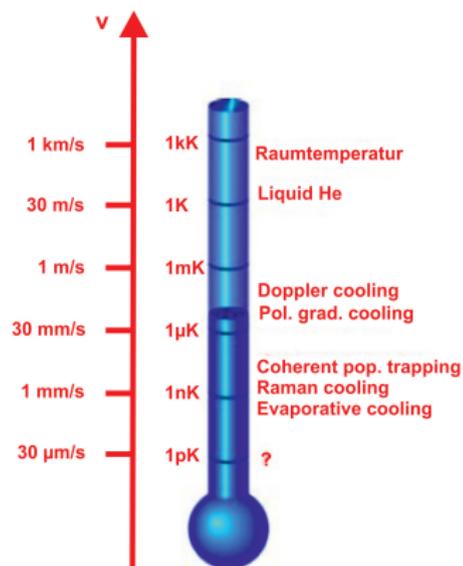
Motivation I: Temperaturskala

Atome: Geschwindigkeit besitzt
Maxwell-Boltzmann-Verteilung

$$v_{rms} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{3k_B} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

Geschwindigkeiten für bestimmte
Temperaturen für Na-Atome

- Raumtemperatur (300K): 570m/s
- 77K (Kondensation von Stickstoff): 289m/s
- 4K (Kondensation von Helium): 66m/s



Adams, *Prog. Quant. Electr.*, 1997, Vol. 21, No. 1,

Motivation II

Geschwindigkeiten beeinträchtigen die Messungen an bzw. mit Atomen

- Doppler-Effekt
- limitierte Beobachtungs- bzw. Messzeit



<http://nobelprize.org>

Motivation II

Geschwindigkeiten beeinträchtigen die Messungen an bzw. mit Atomen

- Doppler-Effekt
- limitierte Beobachtungs- bzw. Messzeit



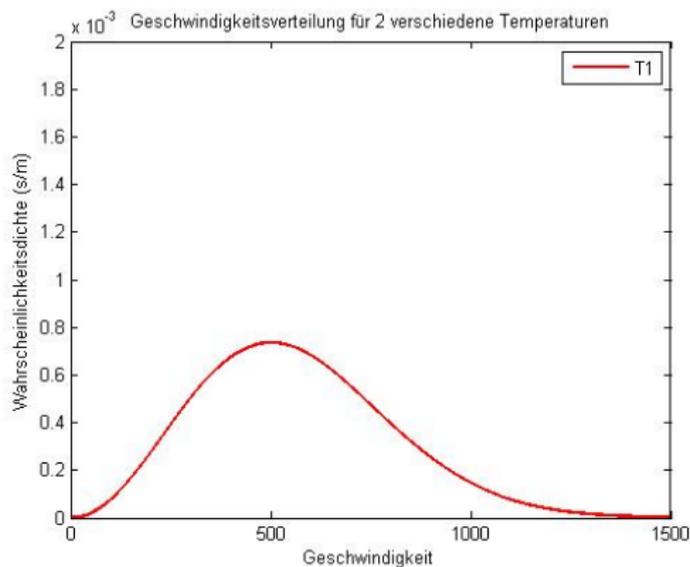
<http://nobelprize.org>

⇒ Kühlen von Atomen notwendig

Motivation III

Was heißt Kühlen ?

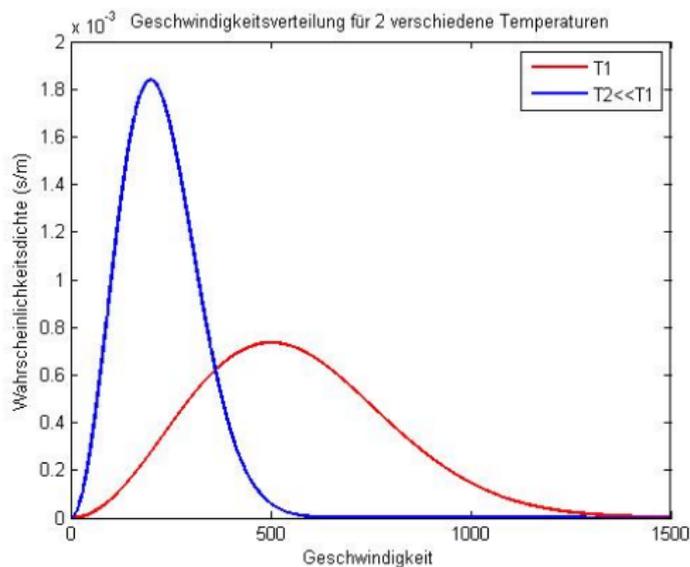
Maxwellverteilung der Geschwindigkeiten innerhalb eines Gases



Motivation III

Was heißt Kühlen ?

Maxwellverteilung der Geschwindigkeiten innerhalb eines Gases



- 1 Motivation
- 2 Physikalische Grundlagen des Kühlungsprozesses**
- 3 Doppler-Kühlung
- 4 Sub-Doppler-Kühlung
- 5 Evaporative Kühlung
- 6 Anwendungen

Photonenrückstoß und Absorption: Einführung

Annahmen

- 2-Niveau-Atom
- resonante Einstrahlung



Photonenrückstoß und Absorption: Einführung

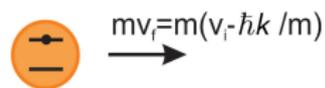
Annahmen

- 2-Niveau-Atom
- resonante Einstrahlung



Impuls-Erhaltung

$$M\vec{v}_i - \hbar\vec{k} = M\vec{v}_f \Rightarrow \vec{v}_f = \vec{v}_i - \frac{\hbar\vec{k}}{M}$$



Photonenrückstoß und Absorption: Einführung

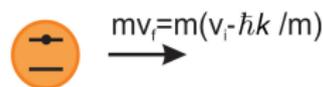
Annahmen

- 2-Niveau-Atom
- resonante Einstrahlung



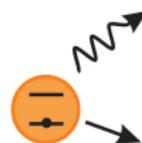
Impuls-Erhaltung

$$M\vec{v}_i - \hbar\vec{k} = M\vec{v}_f \Rightarrow \vec{v}_f = \vec{v}_i - \frac{\hbar\vec{k}}{M}$$



Spontane Emission bei Mittelung

$$\langle p \rangle_t = 0$$



Photonenrückstoß und Absorption: Kraft

- aus optischen Bloch-Gleichungen kann die Kraft der spontanen Emission abgeleitet werden

Spontaneous Force

$$F_{sp} = \frac{\hbar \vec{k} \Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + [2\delta/\Gamma]^2}$$

Photonenrückstoß und Absorption: Kraft

- aus optischen Bloch-Gleichungen kann die Kraft der spontanen Emission abgeleitet werden

Spontaneous Force

$$F_{sp} = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + [2\delta/\Gamma]^2}$$

Zahlenbeispiel für Na

- Annahmen: $s_0 \approx 1$, $\delta = 0$
- $\frac{1}{\Gamma_{Na}} = 15.9\text{ns}$, $\lambda = 589\text{nm}$ und $M = 23 u$

$$a = \frac{\hbar \pi}{M \lambda} \approx 10^6 \text{m/s}^2 = 10^5 g$$

- Stoppen von Na-Atom ($v_0 = 1000\text{m/s}$) in $t = 1\text{ms}$ auf einer Strecke von 0.5m

Abbremsen atomarer Strahlen: Probleme

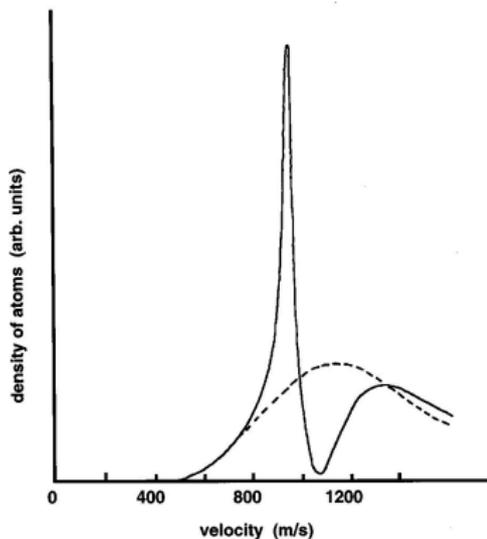
Zahlenbeispiel für Streuung

- Na-Atome aus Ofen ($T = 600\text{K}$,
 $v = 900\text{m/s}$)
- Geschwindigkeitsänderung
 $\Delta v = \hbar k / m \approx 0.03\text{m/s}$

Abbremsen atomarer Strahlen: Probleme

Zahlenbeispiel für Streuung

- Na-Atome aus Ofen ($T = 600\text{K}$, $v = 900\text{m/s}$)
- Geschwindigkeitsänderung
 $\Delta v = \hbar k / m \approx 0.03\text{m/s}$
- Stoppen eines Atomes durch Streuung an ca. 30000 Photonen
- bei Streuung an 200 Photonen:
Doppler-Verschiebung von 10MHz
- Linienbreite von Na: $\Gamma / 2\pi = 10\text{MHz}$
- Laserfrequenz 1.5GHz unter atomarer Resonanzfrequenz



W. Phillips, Nobel Lecture, *Reviews of Modern Physics*,

Vol. 70, No. 3, 1998

Abbremsen atomarer Strahlen: Problem Doppler-Effekt

Kompensation der Doppler-Verschiebung durch

- Regulierung der Laserfrequenz oder
- Verschiebung der atomaren Resonanzen

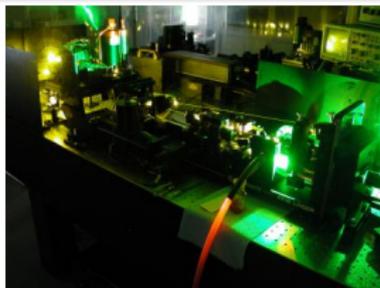
Abbremsen atomarer Strahlen: Problem Doppler-Effekt

Kompensation der Doppler-Verschiebung durch

- Regulierung der Laserfrequenz oder
- Verschiebung der atomaren Resonanzen

frequency chirping

- durchstimmbarer Laser
- Bsp: Farbstoff-Laser und Diodenlaser



<http://de.wikipedia.org/wiki/Farbstofflaser>

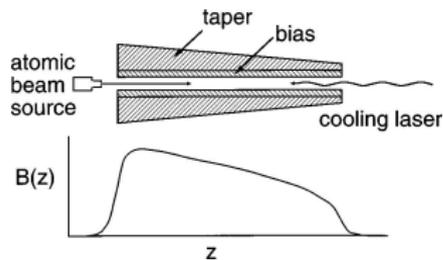


<http://www.fbh-berlin.com>

Abbremsen atomarer Strahlen: Zeemann Kühlung

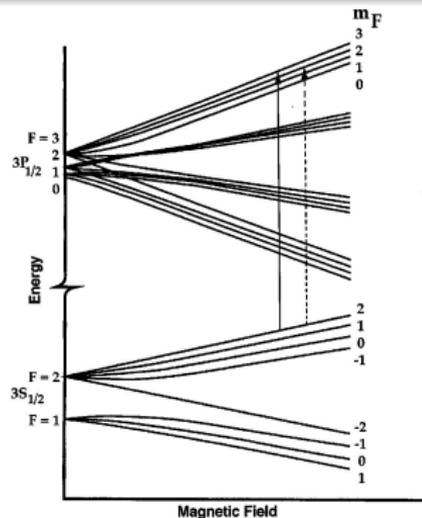
Zeemann Kühlung

- Anlegen eines inhomogenen Magnetfeldes
- Zeemann-Verschiebung der Resonanzfrequenzen kompensiert Doppler-Verschiebung



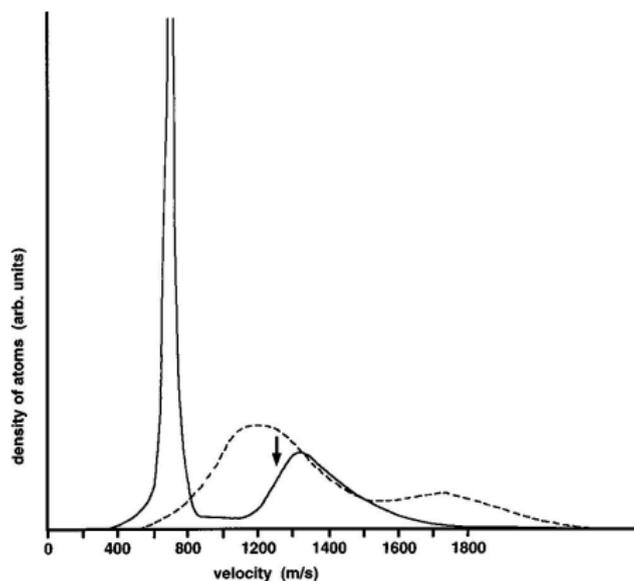
Phillips, Nobel Lecture, Reviews of Modern Physics,

Vol. 70, No. 3, 1998



Abbremsen atomarer Strahlen: Zeemann Kühlung

Geschwindigkeitsverteilung mit Frequenzanpassung

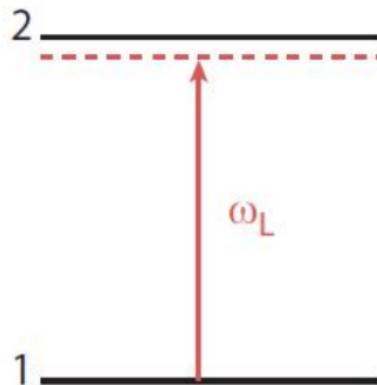


W. Phillips, Nobel Lecture, Reviews of Modern Physics, Vol. 70, No. 3, 1998

- 1 Motivation
- 2 Physikalische Grundlagen des Kühlungsprozesses
- 3 Doppler-Kühlung**
- 4 Sub-Doppler-Kühlung
- 5 Evaporative Kühlung
- 6 Anwendungen

Doppler Kühlung: Prinzip

- Idee der Doppler Kühlung: Hänsch und Schawlow 1975
- Bestrahlung des Atomes mit Laserlicht knapp unter der Resonanzfrequenz aus allen Richtungen



VL Laserspektroskopie und Massenspektrometrie an gespeicherten Teilchen SS2009, Prof. Nörtershäuser, Johannes Gutenberg

Universität Mainz

Doppler Kühlung: Kraft

Spontaneous Force mit Doppler-Abhängigkeit:

$$F_{sp}^{\pm} = \frac{\hbar \vec{k} \Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + [2(\delta \mp \vec{k} \cdot \vec{v})/\Gamma]^2}$$

Doppler Kühlung: Kraft

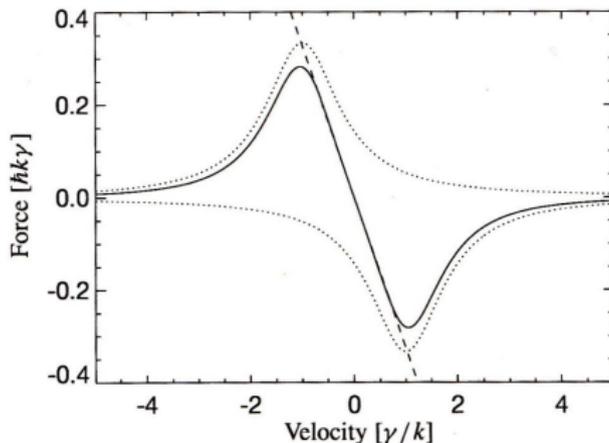
Spontaneous Force mit Doppler-Abhängigkeit:

$$F_{sp}^{\pm} = \frac{\hbar \vec{k} \Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + [2(\delta \mp \vec{k} \cdot \vec{v})/\Gamma]^2}$$

$$\vec{F}_{OM} = \vec{F}_{sp}^+ + \vec{F}_{sp}^-$$

$$\vec{F}_{OM} = \frac{\hbar \vec{k} \Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + [2(\delta - \vec{k} \cdot \vec{v})/\Gamma]^2} - \frac{\hbar \vec{k} \Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + [2(\delta + \vec{k} \cdot \vec{v})/\Gamma]^2}$$

Doppler Kühlung: Kraft



Laser Cooling and Trapping, Harold Metcalf, Peter von der Straten, Springer-Verlag

$$\vec{F}_{OM} = \frac{\hbar \vec{k} \Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + [2(\delta - \vec{k} \cdot \vec{v})/\Gamma]^2} - \frac{\hbar \vec{k} \Gamma}{2} \frac{s_0}{1 + [2(\delta + \vec{k} \cdot \vec{v})/\Gamma]^2}$$

- linearer Bereich: Reibungskraft $\vec{F} = -\alpha \vec{v}$

Doppler Kühlung: Doppler-Limit

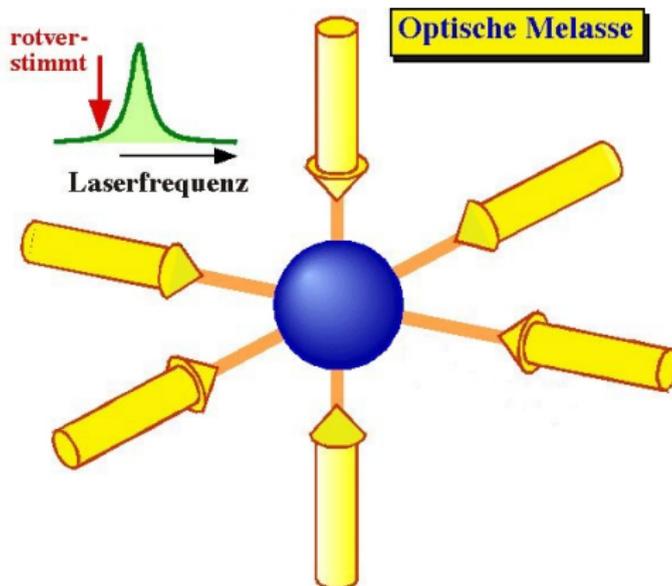
- Aufwärmprozess steht der Kühlung gegenüber
- Impulsübertrag führt zu Diffusion
- thermisches Gleichgewicht: Kühlung = Erwärmung
- im Doppler-Limit ist α maximal

$$T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$$

Beispiel Na-Atom ($1/\Gamma_{Na} \approx 16\text{ns}$)

$$T_D^{Na} \approx 240\mu\text{K}$$

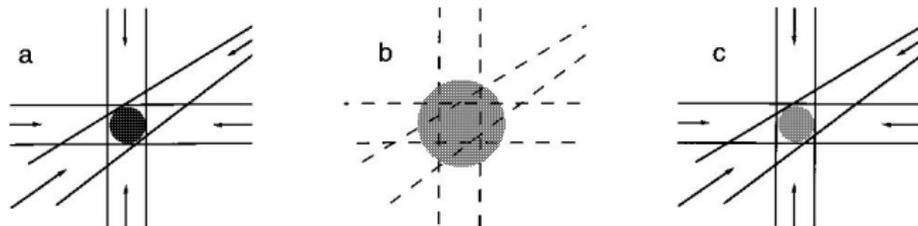
Doppler Kühlung in 3D



VL Laserspektroskopie WS 07/08, Prof. Suter, Universität Dortmund

- Atom bewegt sich im Laserfeld sehr zäh: *Optische Melasse*

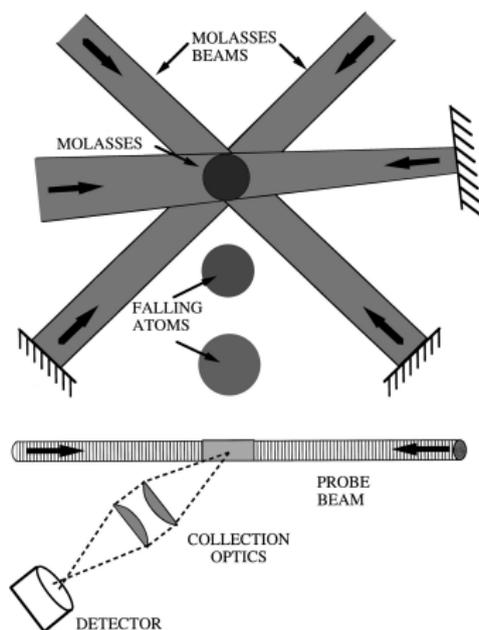
Temperatur-Messung: Release-and-Recapture



W. Phillips, Nobel Lecture, Reviews of Modern Physics, Vol. 70, No. 3, 1998

- große Ungenauigkeit

Temperatur-Messung: Time of Flight



W. Phillips, Nobel Lecture, Reviews of Modern Physics, Vol. 70, No. 3, 1998

Kühlung unter Doppler-Limit

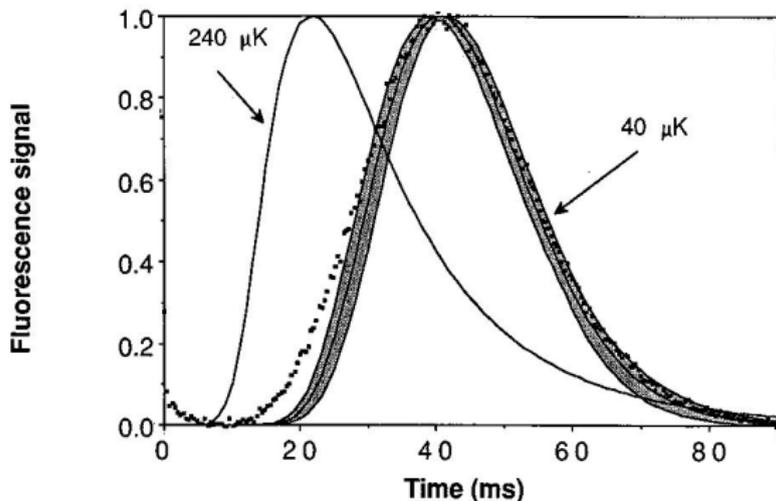
Doppler-Limit für Na-Atom

$$T_D^{\text{Na}} \approx 240 \mu\text{K}$$

Kühlung unter Doppler-Limit

Doppler-Limit für Na-Atom

$$T_D^{\text{Na}} \approx 240 \mu\text{K}$$



Kühlung unter Doppler-Limit

- Doppler-Limit deutlich unterschritten: $40\mu\text{K}$ zu $240\mu\text{K}$

bisher:

- Absorption und spontane Emission
- Rückstoß durch Impulsübertrag

Kühlung unter Doppler-Limit

- Doppler-Limit deutlich unterschritten: $40\mu\text{K}$ zu $240\mu\text{K}$

bisher:

- Absorption und spontane Emission
- Rückstoß durch Impulsübertrag

neu:

- Polarisation der Laserstrahlung
- *light shift* / *AC Stark-Shift*:
Verschiebung der Niveaus in
Abhängigkeit der Verstimmung und
Intensität
- optisches Pumpen: Atombesetzung in
niedrigstem Energieniveau

Kühlung unter Doppler-Limit

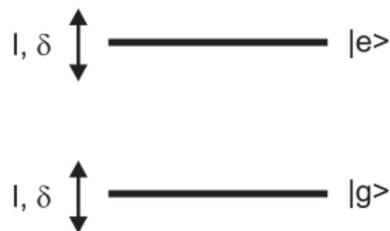
- Doppler-Limit deutlich unterschritten: $40\mu\text{K}$ zu $240\mu\text{K}$

bisher:

- Absorption und spontane Emission
- Rückstoß durch Impulsübertrag

neu:

- Polarisation der Laserstrahlung
- *light shift* / *AC Stark-Shift*:
Verschiebung der Niveaus in
Abhängigkeit der Verstimmung und
Intensität
- optisches Pumpen: Atombesetzung in
niedrigstem Energieniveau

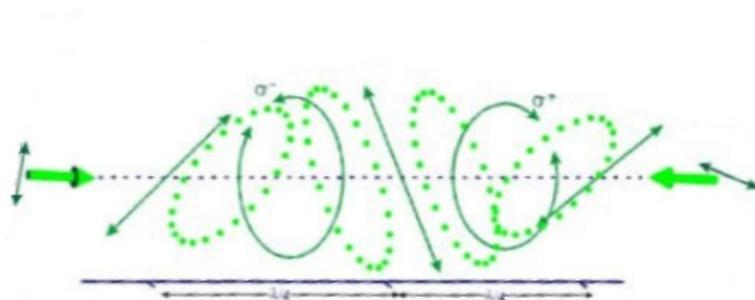


$$\Delta E_g = \frac{\hbar\delta(I/I_{\text{sat}})C_{ge}^2}{1 + (2\delta/\Gamma)^2}$$

- 1 Motivation
- 2 Physikalische Grundlagen des Kühlungsprozesses
- 3 Doppler-Kühlung
- 4 Sub-Doppler-Kühlung**
- 5 Evaporative Kühlung
- 6 Anwendungen

Polarisationsgradienten-Kühlung

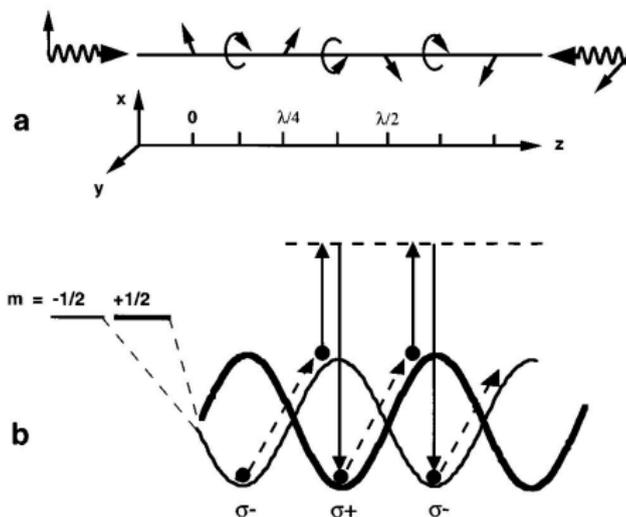
- Prinzip am Beispiel für $lin \perp lin$ -Polarisation, Einstrahlung von σ_+ σ_- -Polarisation wäre auch möglich
- Interferenz der Laserstrahlen \Rightarrow Variation der Polarisation



Adams, *Prog. Quant. Electr.*,: 1997, Vol. 21, No. 1, pp. 1-79

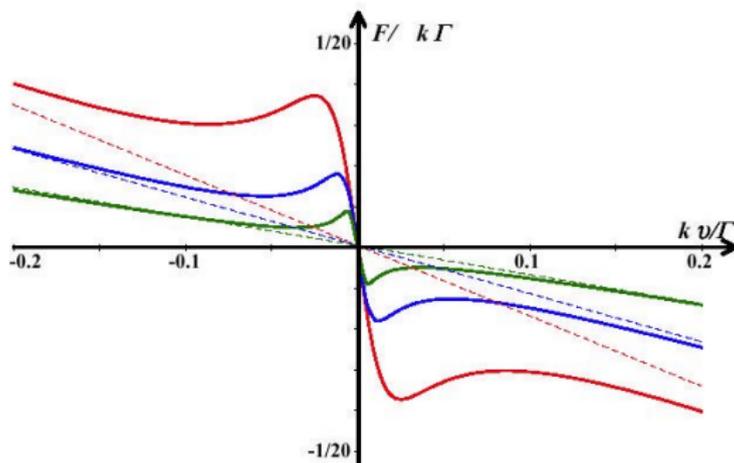
Polarisationsgradienten-Kühlung

- Variation der Polarisation \Rightarrow Variation der Aufspaltung
- Atom „sieht“ periodisches Potential



W. Phillips, Nobel Lecture, Reviews of Modern Physics, Vol. 70, No. 3, 1998

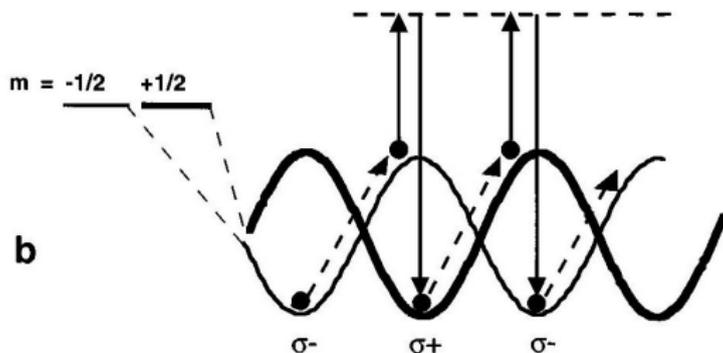
Sisyphus Kühlung: Kraft



Adams, *Prog. Quant. Electr.*,: 1997, Vol. 21, No. 1, pp. 1-79

- Anstieg steiler als bei Doppler-Kühlung
- größere Abkühlung möglich

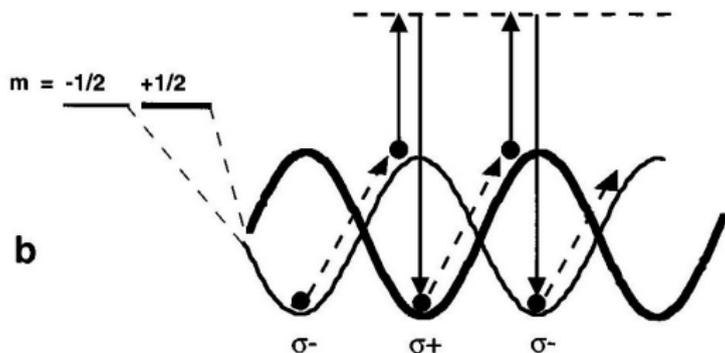
Polarisationsgradienten-Kühlung: Sisyphus Kühlung



W. Phillips, Nobel Lecture, Reviews of Modern Physics, Vol. 70, No. 3, 1998

- Energiebetrag $U_0 = \text{Potentialunterschied der Zeeman-Niveaus}$
- Temperaturlimit: $k_B T_{\text{sis}} \approx U_0 \propto \frac{1}{\delta}$

Polarisationsgradienten-Kühlung: Sisyphus Kühlung

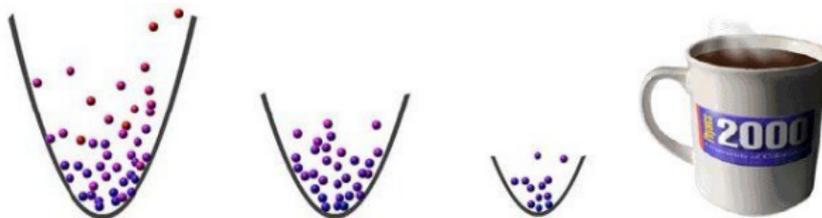


W. Phillips, Nobel Lecture, Reviews of Modern Physics, Vol. 70, No. 3, 1998

- Energiebetrag $U_0 =$ Potentialunterschied der Zeeman-Niveaus
- Temperaturlimit: $k_B T_{sis} \approx U_0 \propto \frac{1}{\delta}$
- Rückstoßlimit: $k_B T_R \approx 2E_R = \frac{\hbar^2 k^2}{m}$, wobei gilt: $T_{sis} \approx 20 T_R$
- Natrium: $T_R = 2.4 \mu\text{K}$

- 1 Motivation
- 2 Physikalische Grundlagen des Kühlungsprozesses
- 3 Doppler-Kühlung
- 4 Sub-Doppler-Kühlung
- 5 Evaporative Kühlung**
- 6 Anwendungen

Evaporative Kühlung

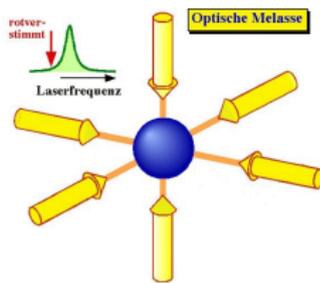


M. Pater, Bose-Einstein-Kondensat, Seminar zur Theoretischen Physik WS 06/07, Universität Essen-Duisburg

- Temperaturen bis in den nK-Bereich können erreicht werden

Laserkühlung - Zusammenfassung

- Abbremsen atomarer Strahlen
- Doppler Kühlung: Na $240\mu\text{K}$
- Sub-Doppler Kühlung :
Polarisationsgradienten Kühlung Na $2.4\mu\text{K}$
- Raman Kühlung: Na 100nK
- tiefere Temperaturen: Evaporative Kühlung, Expansions Kühlung



- 1 Motivation
- 2 Physikalische Grundlagen des Kühlungsprozesses
- 3 Doppler-Kühlung
- 4 Sub-Doppler-Kühlung
- 5 Evaporative Kühlung
- 6 Anwendungen**

Bose-Einstein-Kondensat

- extremer Aggregatzustand eines Systems ununterscheidbarer Teilchen
- Phasenraumdichte

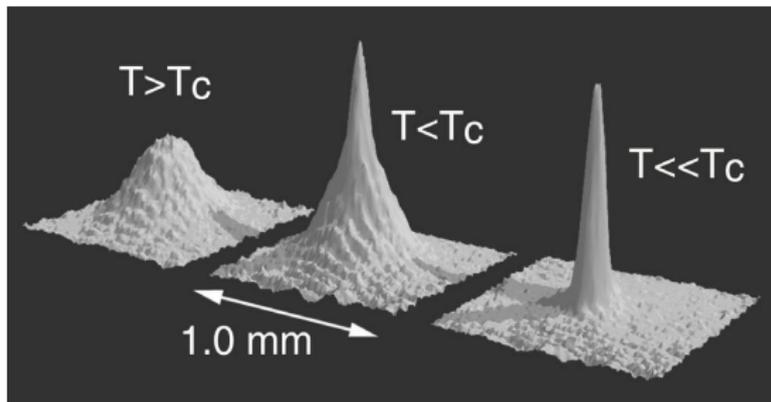
$$n\lambda_{dB}^3 \leq 1 \quad \text{mit} \quad \lambda_{dB}^3 = \frac{h^3}{2\pi m k_B T}$$

- kritische Temperatur

$$T_C = \frac{\hbar^2}{2\pi k_B m} \left(\frac{n}{(2S+1) \cdot 2.61} \right)^{2/3}$$

- Natrium: $T_C \approx 100\text{nK}$

Bose-Einstein-Kondensat: Ergebnisse



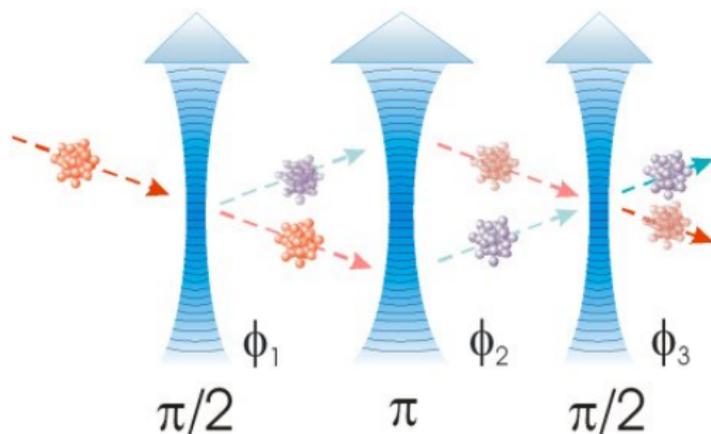
McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology, 9th Edition, Bose-Einstein condensation, W. Ketterle

Atomlaser

Test

<http://www.mpq.mpg.de/atomlaser/>

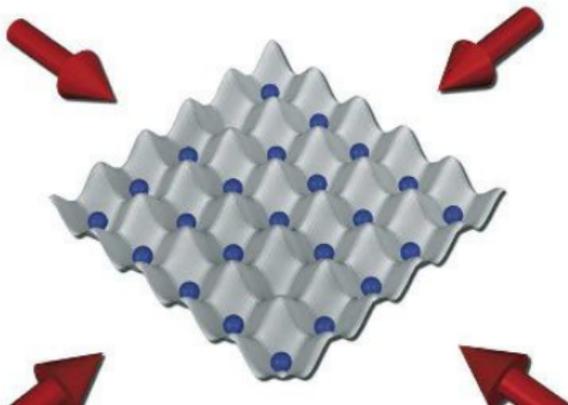
Atominterferometer



<http://www.iqo.uni-hannover.de/>

- präzise Messung der Feinstrukturkonstante und der Erdbeschleunigung

Ultrakalte Gase in optischen Gittern



I. Bloch, Quantum coherence and entanglement with ultracold atoms in optical lattices, NATURE 453, 1016-1022

- nützlich für Quanteninformation, Festkörperphysik

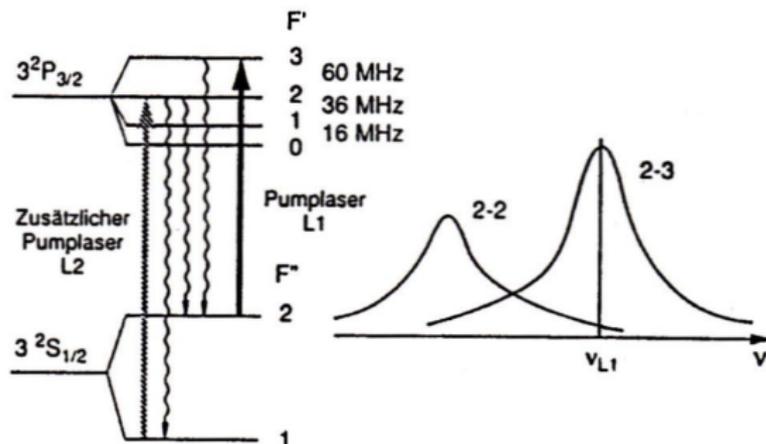
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Abbremsen atomarer Strahlen: Probleme

- schon angesprochen: Doppler-Effekt

Abbremsen atomarer Strahlen: Probleme

- schon angesprochen: Doppler-Effekt
- weiteres Problem: optisches Pumpen eines anderen Hyperfeinstruktur-Übergangs



Maxwell-Boltzmann-Verteilung

Maxwell-Boltzmann-Verteilung

$$f(|\vec{v}|) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

Maximalwert

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$$

Wahrscheinlichste Geschwindigkeit

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} dv v f(|\vec{v}|) = \sqrt{\frac{8k_B}{\pi}} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

rms-Geschwindigkeit

$$v_{rms} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{3k_B} \sqrt{\frac{T}{m}}$$