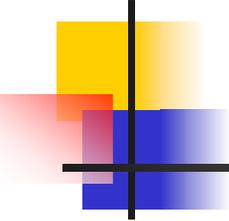


Bose Einstein Kondensation



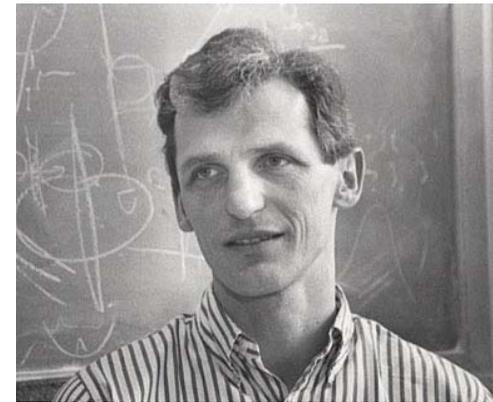
Nobelpreis 2001

Eric Cornell, Carl Wieman

(Joint Institute for Laboratory
Astro-Physics in Boulder, Colorado)

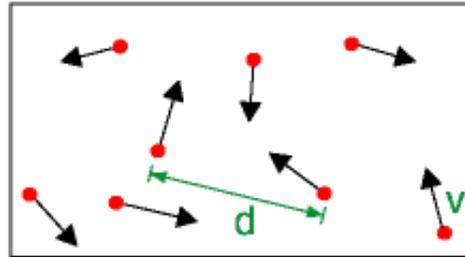
Wolfgang Ketterle

(MIT in Cambridge, Massachusetts)

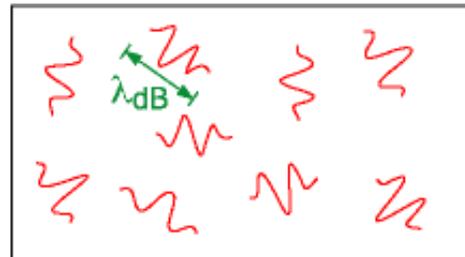


Abkühlung von magnetisch eingeschlossenen Metalldämpfen auf so niedrige Temperaturen dicht am absoluten Nullpunkt, daß diese Gase in einen vorher nie gesehenen Zustand versetzt wurden, ein sogenanntes **Bose-Einstein Kondensat (BEC)**.

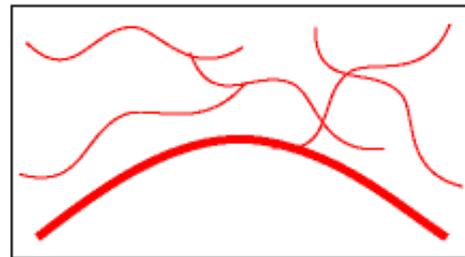
Was ist ein BEC?



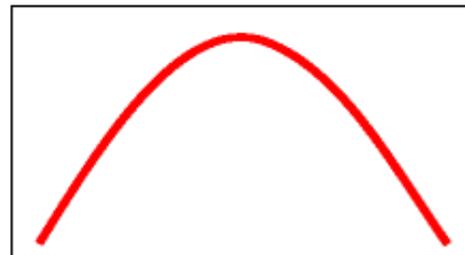
High Temperature T:
thermal velocity v
density d^{-3}
"Billiard balls"



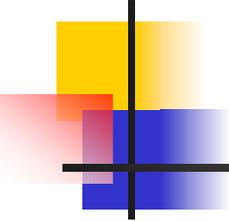
Low Temperature T:
De Broglie wavelength
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$
"Wave packets"



T = T_{crit}:
Bose-Einstein Condensation
 $\lambda_{dB} \approx d$
"Matter wave overlap"



T = 0:
Pure Bose condensate
"Giant matter wave"



Bosonen in harmonischer Falle

Harmonisches Fallenpotential:

$$V(r) = \frac{1}{2} m \omega_0^2 r^2 \quad \text{mit} \quad \omega_0 = 2\pi \times 100 \text{ Hz}$$

Energieniveaus eines idealen Gases in der Falle:

$$E = \left(n_x + n_y + n_z + \frac{3}{2} \right) \hbar \omega_0 \quad \text{mit} \quad n_\alpha \text{ ganze Zahlen}$$

Wellenfunktion des Kondensats (Grundzustand):

$$\Psi_0(r) \propto \exp\left[-\frac{r^2}{2a^2} \right] \quad \text{mit} \quad a = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega_0}}$$

Die Wellenfunktion hat eine Ausdehnung von der Grösse a (ca. $1 \mu\text{m}$)

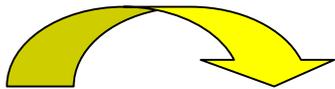
Bosonen in harmonischer Falle

Räumliche Ausdehnung des n -ten Niveaus:

$$m\omega_0^2 \langle r^2 \rangle \sim E(n) \sim n\hbar\omega_0$$

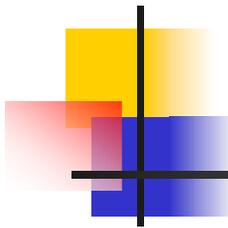
Bei der Temperatur T sind die Atome in der Falle bis zum Niveau n angeregt:

$$n \sim \frac{k_B T}{\hbar\omega_0}$$



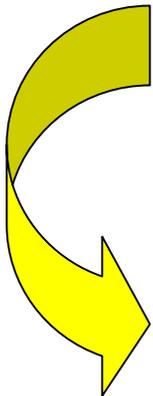
Die räumliche Ausdehnung der „Normalkomponente“ des Gases ist:

$$R \sim \sqrt{\frac{n\hbar}{m\omega_0}} \sim a \sqrt{\frac{k_B T}{\hbar\omega_0}} \gg a$$



Das Kondensat

$$\begin{aligned}n &= n_0 + \int_0^\infty dn_x \int_0^\infty dn_y \int_0^\infty dn_z \frac{1}{\exp[(n_x + n_y + n_z)\hbar\omega_0 / k_B T] - 1} \\&= n_0 + \left(\frac{k_B T}{\hbar\omega_0}\right)^3 \times \int_0^\infty dx \int_0^\infty dy \int_0^\infty dz \frac{1}{\exp[x + y + z] - 1} \\&= n_0 + \left(\frac{k_B T}{\hbar\omega_0}\right)^3 \zeta(3)\end{aligned}$$



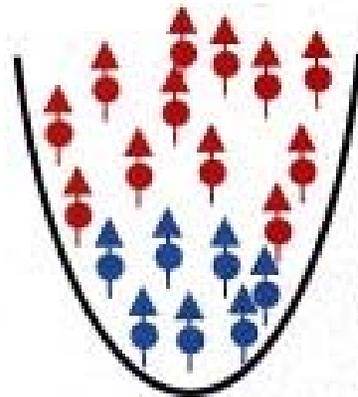
Kritische Temperatur:

$$k_B T_c = \hbar\omega_0 \left(\frac{n}{\zeta(3)}\right)^{1/3}$$

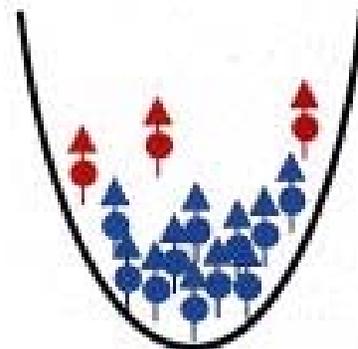
Kondensat-Dichte:

$$n_0(T) = n \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^3\right)$$

Das Kondensat (Cartoon)

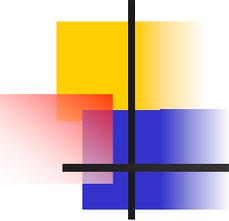


$T > T_c$
Gaussian
distribution



$T < T_c$
Ground-state
peak





Wie kühlt man Atome?

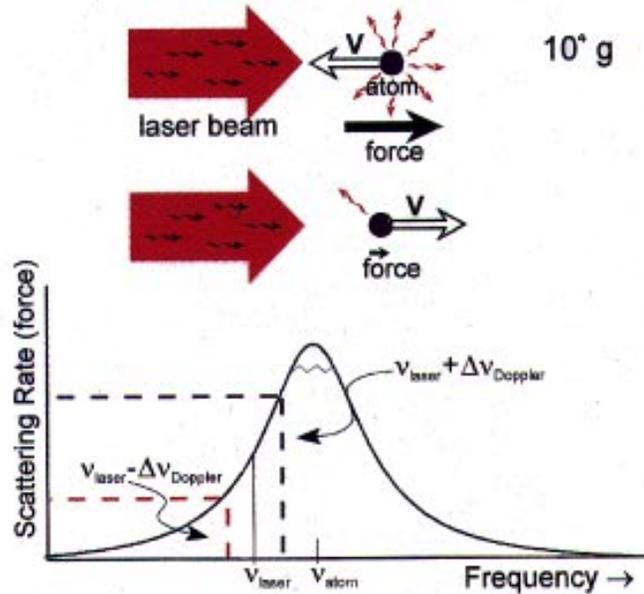
- Laserkühlung
 - Impuls der Photonen
 - Dopplereffekt
- Verdampfungskühlung
 - "Latente Wärme"
 - Elektron-Spin-Resonanz

Eine recht anschauliche Erklärung der Kühlmechanismen mit java applets findet sich im Ineternet unter der Adresse:

<http://www.Colorado.EDU/physics/2000/index.pl>

Laserkühlung

Radiation Pressure force



Cooling (slowing)

Doppler Shift $\implies \Delta \nu$ depends on v
 $\implies F(v)$

Trapping

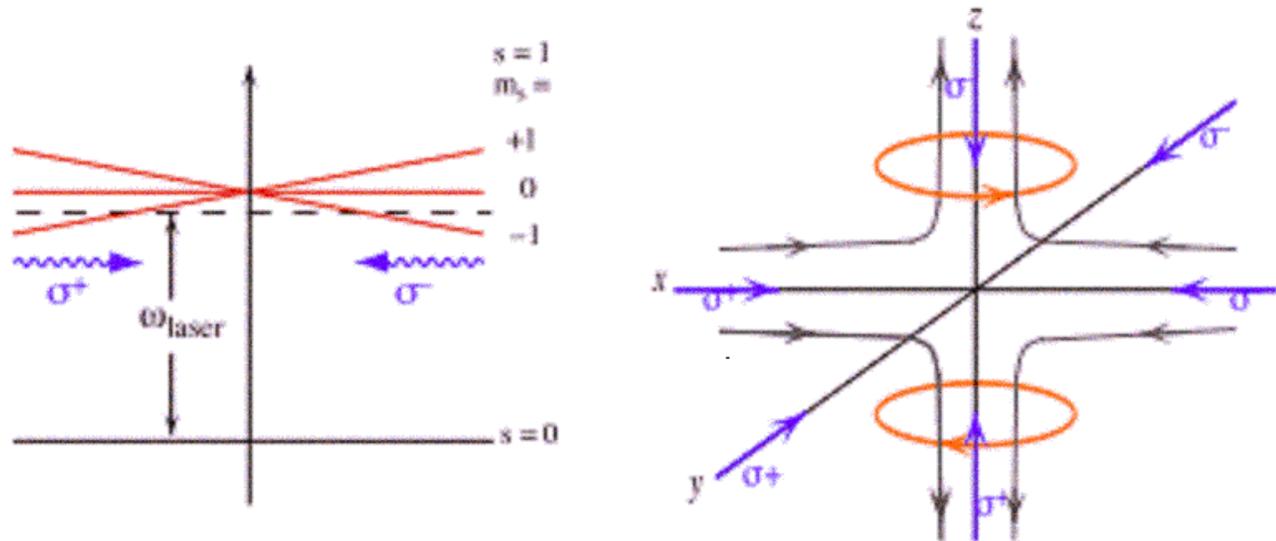
Zeeman shift, $B(x)$ $\implies \Delta \nu$ depends on x
 $\implies F(x)$

The diagram shows a potential well represented by a black U-shaped curve. Two red arrows point towards the center of the well, indicating the trapping force.

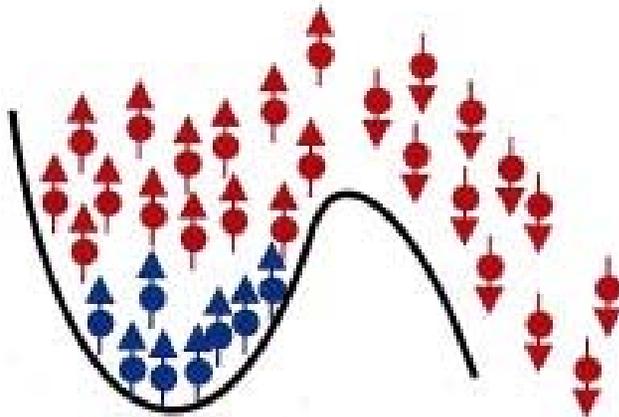
Magneto-optische Falle

Wenn die Atome hinreichend langsam sind kann man sie in eine magneto-optische Falle laden.

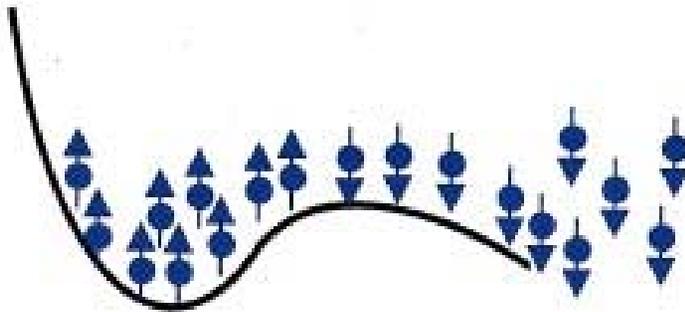
Eine magneto-optische Falle verwendet eine Kombination von magnetischen Feldern und Laserstrahlen um eine ortsabhängige Kraft zu erzeugen, die zum Zentrum der Falle gerichtet ist.



Verdampfungskühlung



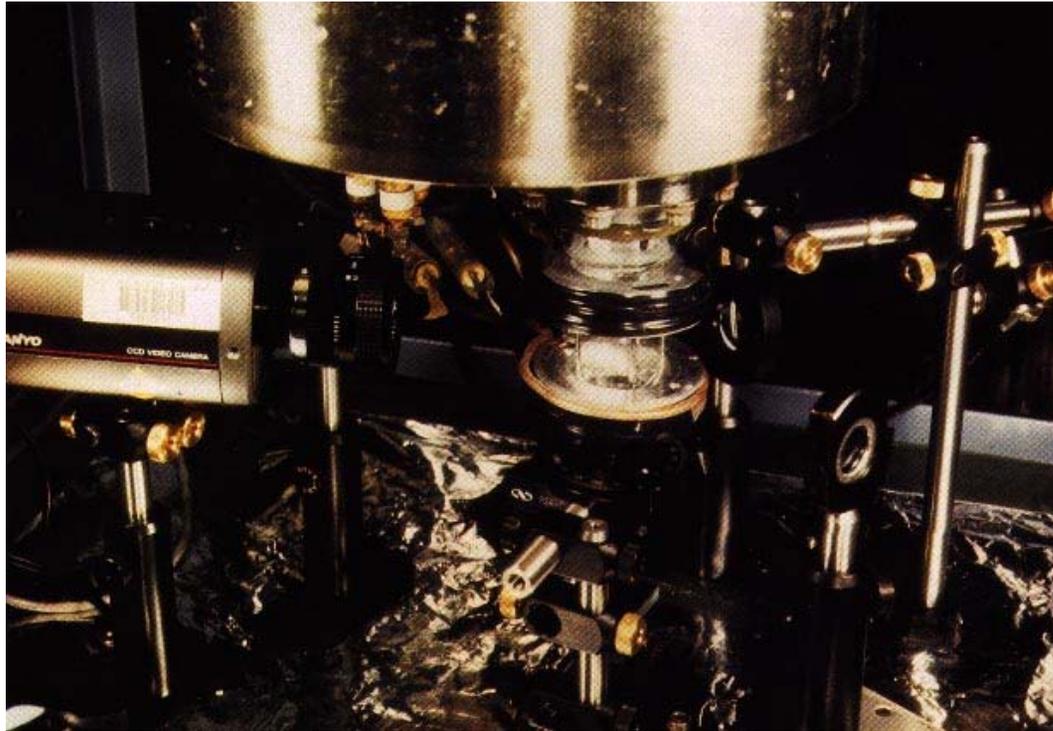
Evaporate hottest atoms



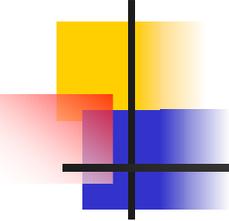
Sample cools as lip is lowered



Wie beobachtet man BEC?



- Flugzeit-Absorptionsmessung
- Phasenkontrastmessung



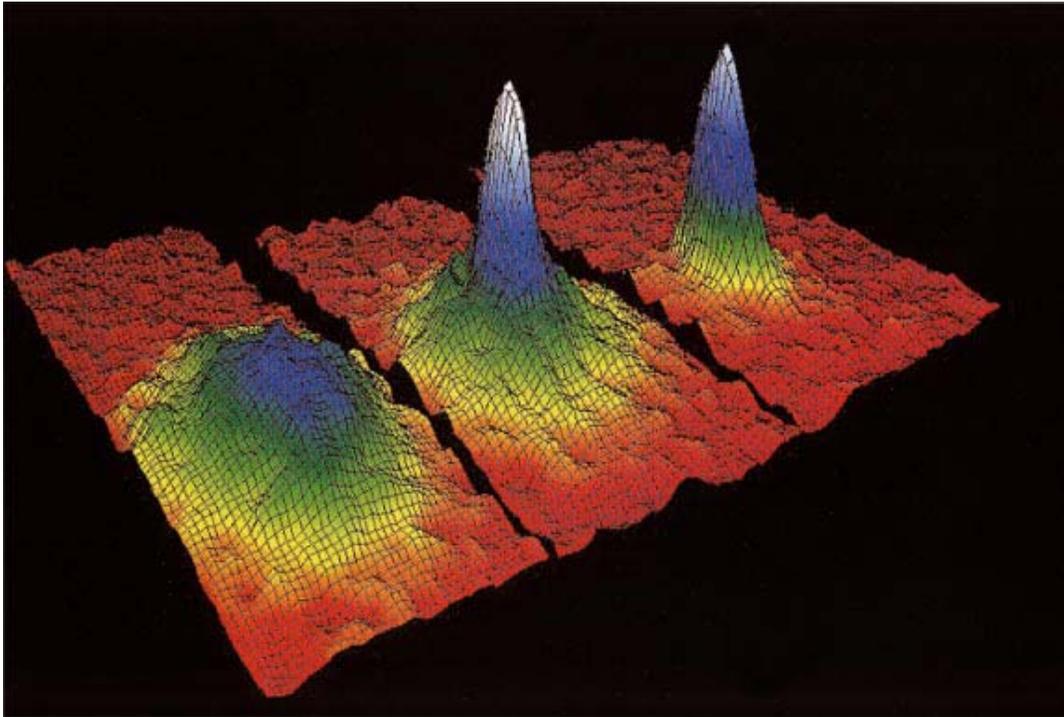
Flugzeit-Absorptionsmessung

Kondensat zu klein um es optisch aufzulösen.

Verwende ein „Vergrößerungsglas“:

- Falle ausschalten führt zur Expansion der Atomwolke.
- Absorptionsmessung: Schatten charakterisiert die Dichteverteilung in der expandierten Atomwolke.
- Flugzeitmessung: Die gemessene Dichteverteilung entspricht der Geschwindigkeitsverteilung vor der Expansion.
- In einem harmonischen Potential sind Geschwindigkeitsverteilung und Dichteverteilung zueinander proportional.

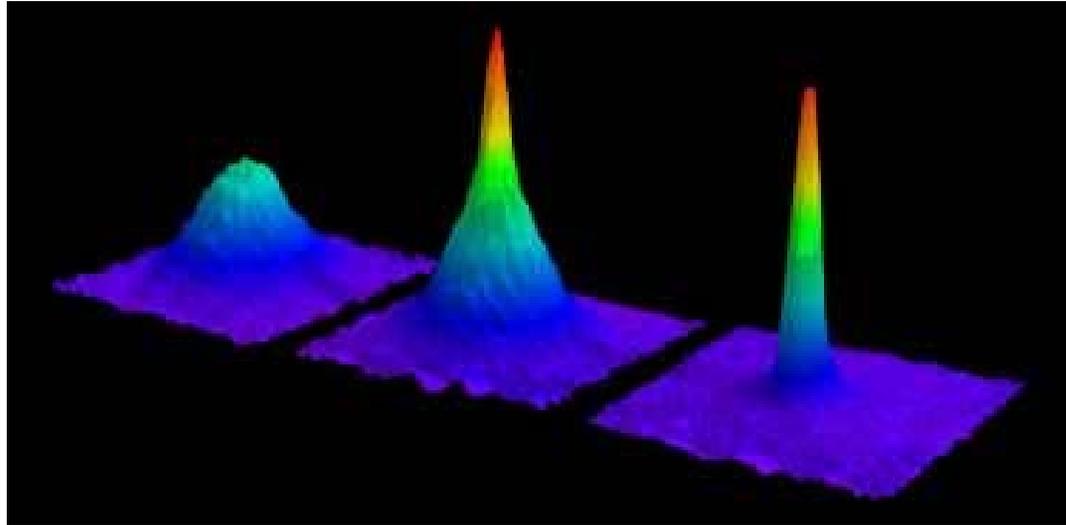
Geschwindigkeitsverteilung



Rubidium

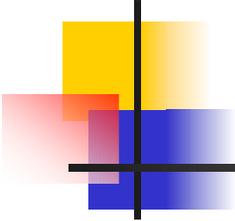
- Thermische Wolke ist isotrop
- Kondensatwolke ist elliptisch

BEC in Natrium

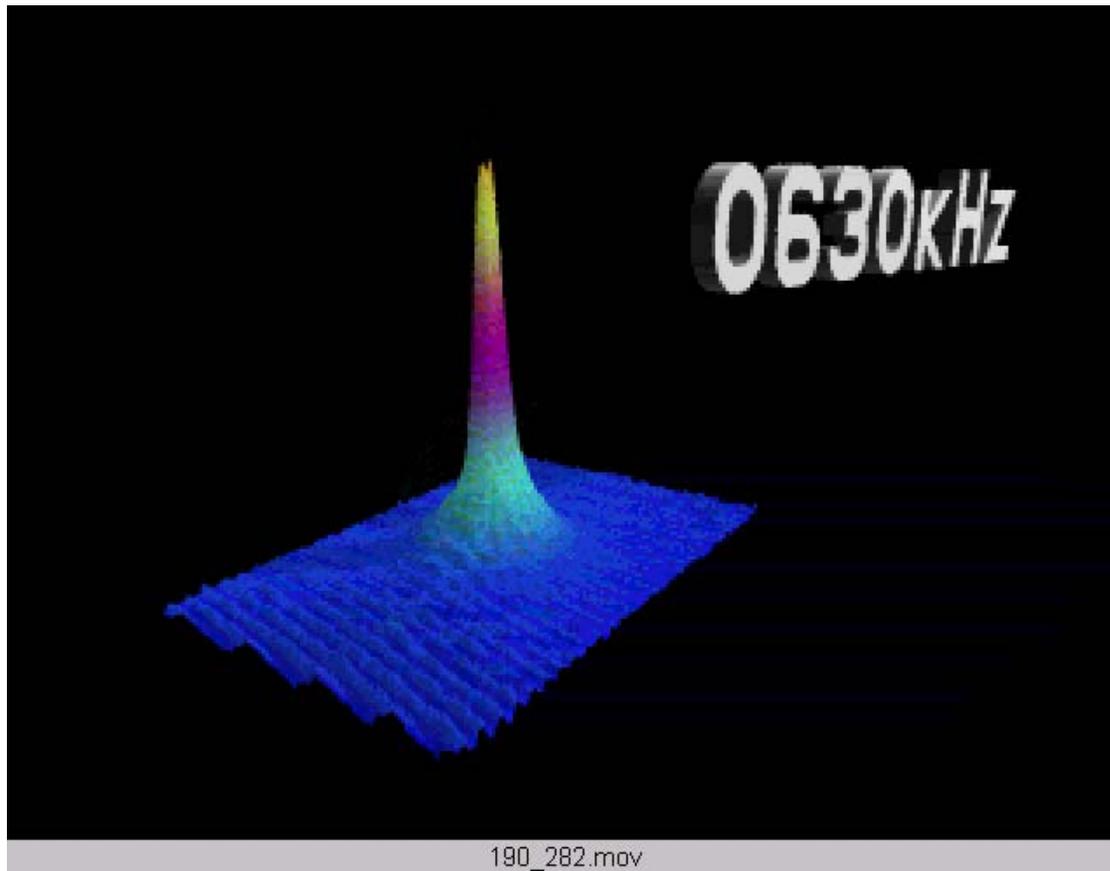


Messungen der Ketterle Gruppe am MIT, September 1995

Das Kondensat enthält etwa 500 000 Atome.

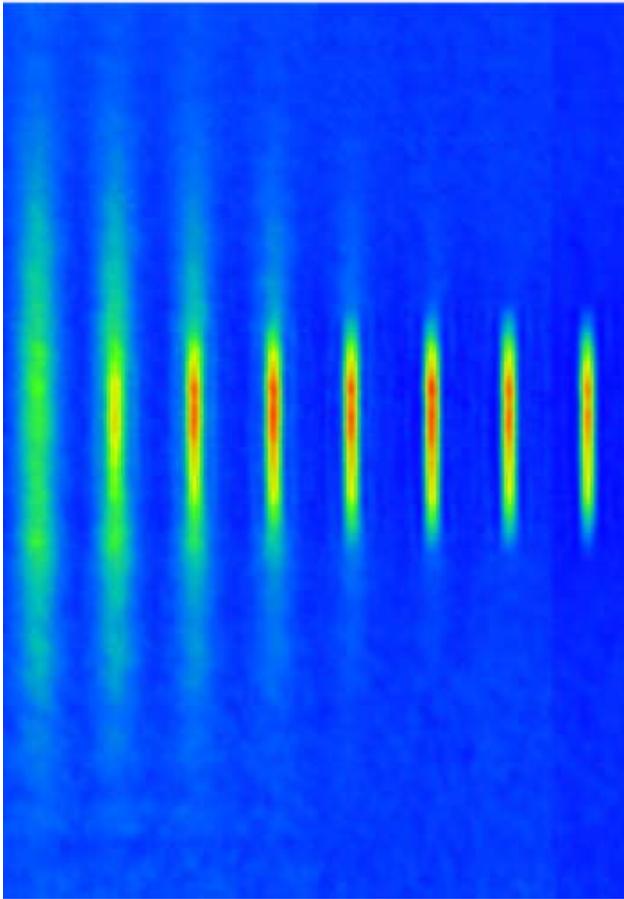


MIT Daten Animation



<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-2-8-299>

Phasenkontrast-Aufnahmen

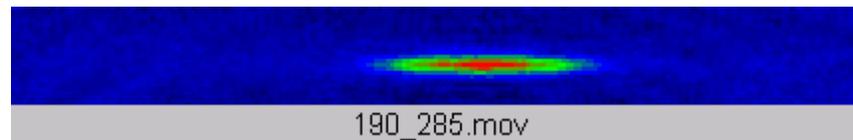


Die gestreute Lichtintensität ist ein Maß für die Dichte der Atome.

Links: Gasphase

Rechts: Kondensat

Kollektive Anregungen im BEC



D. S. Durfee and W. Ketterle, *Optics Express* **8**, 299 (1998)

<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-2-8-299>

Atom Laser

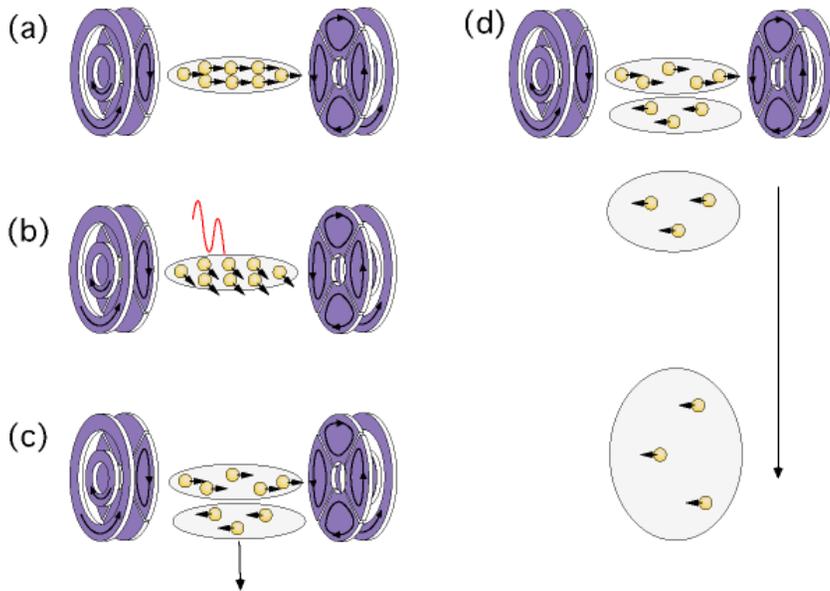
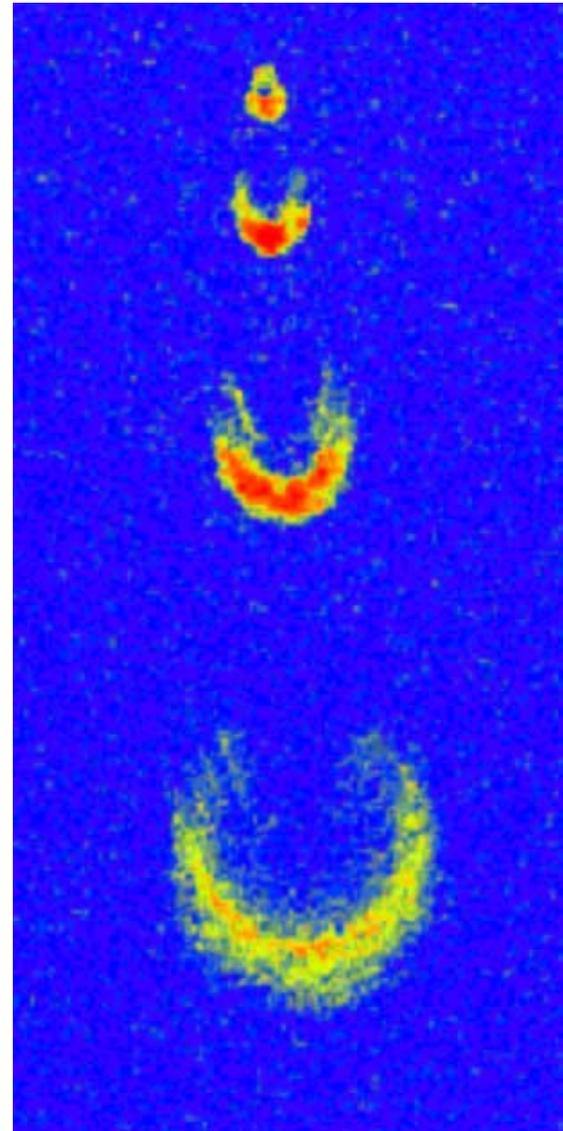
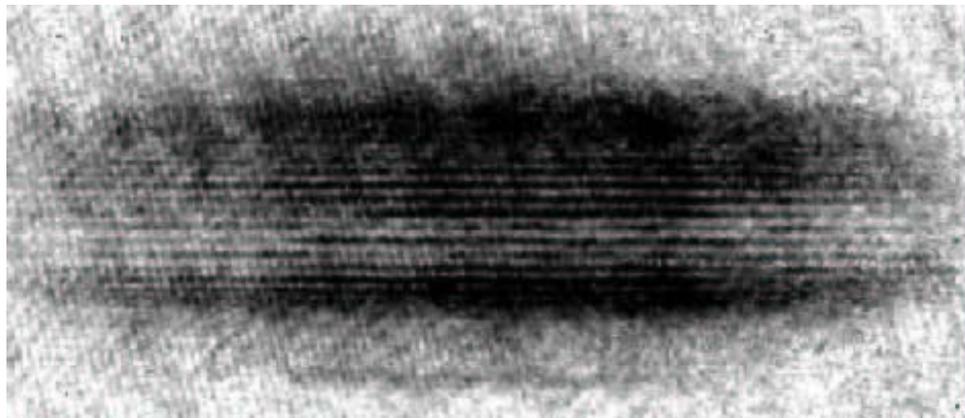
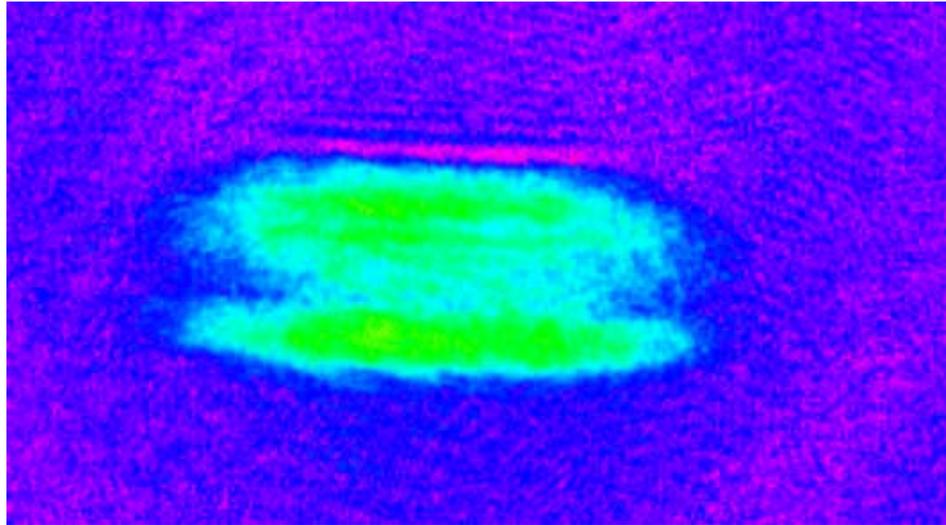
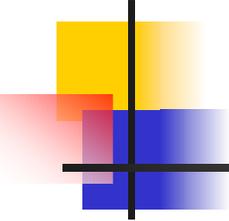


Fig. 10. The rf output coupler. Figure (a) shows a Bose condensate trapped in a magnetic trap. All the atoms have their (electron) spin up, i.e. parallel to the magnetic field. (b) A short pulse of rf radiation tilts the spins of the atoms. (c) Quantum-mechanically, a tilted spin is a superposition of spin up and down. Since the spin-down component experiences a repulsive magnetic force, the cloud is split into a trapped cloud and an out-coupled cloud. (d) Several output pulses can be extracted, which spread out and are accelerated by gravity.



Interferenz von Kondensaten





Literaturhinweise

Einführende Artikel:

W. Ketterle, Physikal. Blätter **52**, 573 (1996)

E. Cornell, J. Res. Natl. Stand. Technol. **101**, 419 (1996)

D. S. Durfee and W. Ketterle, Optics Express **8**, 299 (1998)

Übersichtsartikel (relativ anspruchsvoll):

W. Ketterle et al.; ArXiv:cond-mat/9904034

Vorträge im Internet: Man kann sich auch Wolfgang Ketterle's Vortrag am ITP direkt im Internet anhören:

<http://online.itp.ucsb.edu/online/lecture/ketterle>