

# Bose-Einstein-Kondensat

# Die Kapitel- und Einleitungsseite.

Die Übersicht dient der Orientierung.

## 1. Einleitung

## 2. Kühlung und Fallen

2.1 Bosonen und Fermionen (Wellen und Teilchen)

2.2 Die Temperaturskala

2.3 Laserkühlung

2.4 Laserfalle

2.5 Magnetfalle

2.6 Kondensationskühlung

## 3. Anwendungen

3.1. Atomlaser

## 4. Zusammenfassung

## 5. Diskussion

# Bose-Einstein-Kondensation

Wer war Bose?

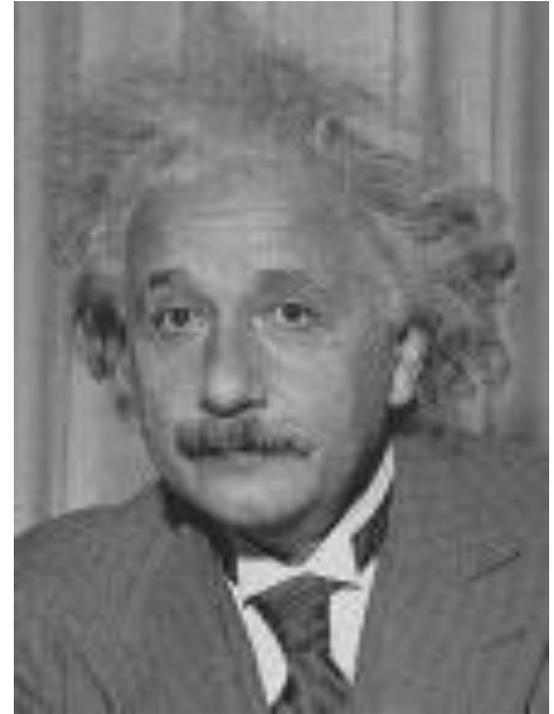
## Satyendra Nath Bose:

Indischer Physiker (1894 – 1974)

Sagte mit Einstein Bose-Einstein-Kondensation voraus. (1924)

Untersuchte, wann zwei Photonen identisch und wann sie unterscheidbar sind.

Nach Bose wurde die Teilchengruppe der Bosonen benannt.



# Bose-Einstein-Kondensation

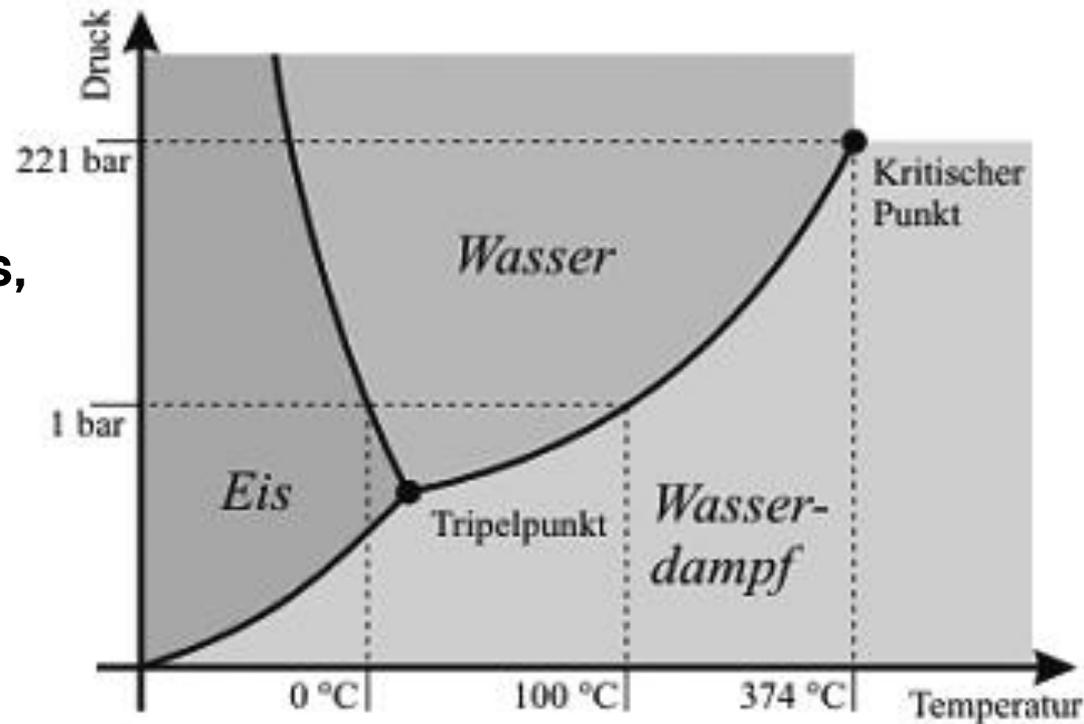
Was ist Kondensation?

## Phasenübergang:

Starke Veränderung der Eigenschaften eines Stoffes, bei nur geringfügiger Änderung eines äußeren Parameters.

## Kondensation:

Bestimmter Phasenübergang (klassisch: von gasförmig zu fest)



# Bose-Einstein-Kondensation

Fermionen !keine Bosonen!

Atome: **Elektronen, Protonen, Neutronen**  
Diese zählen zu den **Fermionen**.

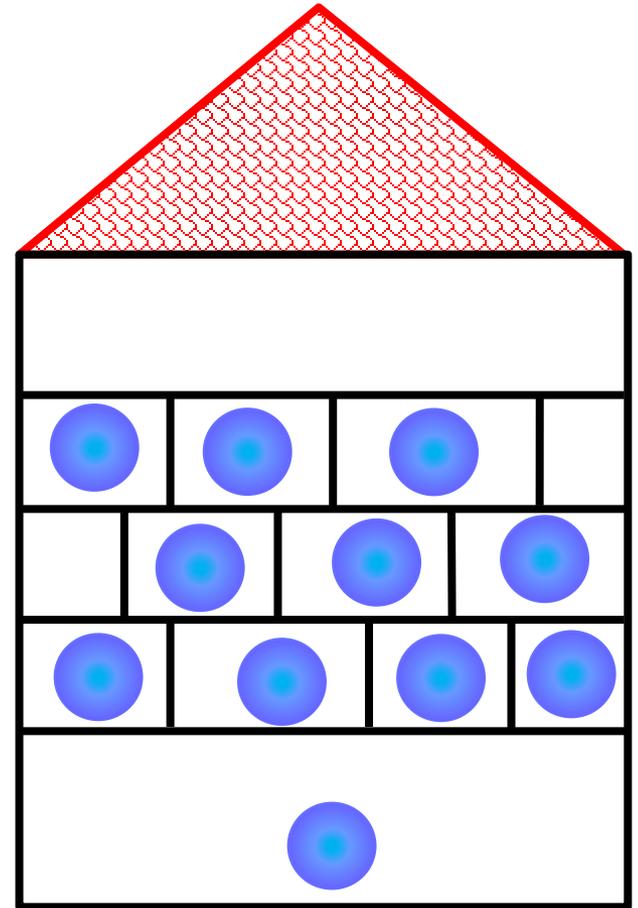
Wo ein Fermion ist,  
kann und darf kein anderes hin.

Fermionen verhalten sich wie  
„**Einzelgänger, Individualisten**“

Im Quantensystem:  
Energiezustand nur **einfach besetzt**.

Zusammengesetzte Teilchen: Z.B. **Atome** mit **ungerader** Anzahl  
von Protonen, Neutronen und Elektronen sind Fermionen.

Teilchenspin =  $\pm 1/2, 3/2, 5/2..$  ; **nicht ganzzahlig** Quelle: Gutenberg Universität Bonn



# Bose-Einstein-Kondensation

## Bosonen

Licht: Photonen

Diese zählen zu den Bosonen.

Wo ein Boson ist, kann und darf auch ein anderes Boson hin.

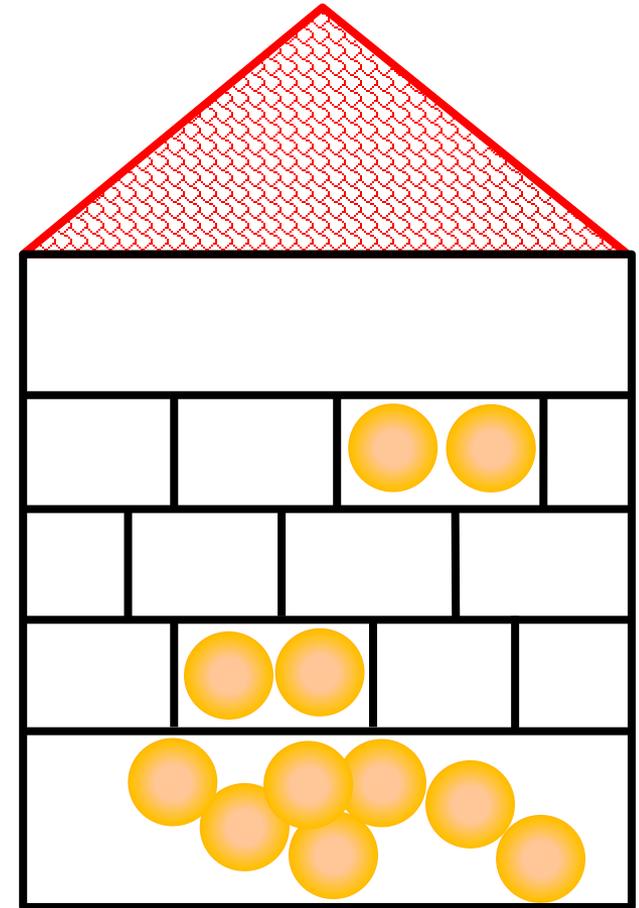
Bosonen verhalten sich wie „Gemeinschaftswesen“

Im Quantensystem:

Energiezustand kann **vielfach besetzt** sein.

Zusammengesetzte Teilchen wie **Atome** mit **gerader** Anzahl von Protonen, Neutronen und Elektronen.

Teilchenspin =  $\pm 1, 2, 3, 4..$  ; **ganzzahlig**



# Bose-Einstein-Kondensation

## Thermodynamik

Was entspricht der Temperatur eines Gases?

Kinetic Energies  
in a Gas

$$\langle E_k \rangle = \frac{3 \cdot k \cdot T}{2}$$

Temperatur  $\hat{=}$  Die mittlere kinetische Energie  $\langle E \rangle$  der Gasteilchen.

# Bose-Einstein-Kondensation

## Welle und Teilchen

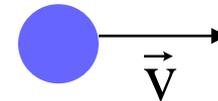
Welle



Ausbreitung im Raum  
Wellenlänge / Frequenz  
Energie  
Wellenpaket  
Phasen- und  
Gruppengeschwindigkeit

Beugung

Teilchen



Aufenthaltsort  
Impuls (Geschwindigkeit)  
Energie  
Ausdehnung

Photoeffekt

# Bose-Einstein-Kondensation

## Welle Teilchen Entsprechungen

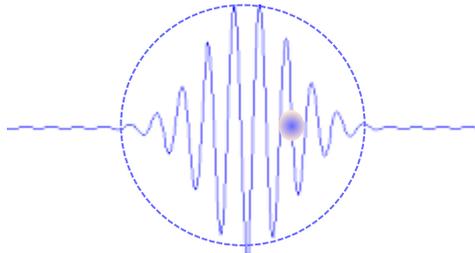
Welle

Gruppengeschwindigkeit

$$p = h/\lambda$$

$$E = h \cdot \nu$$

Wellenlänge  $\lambda$



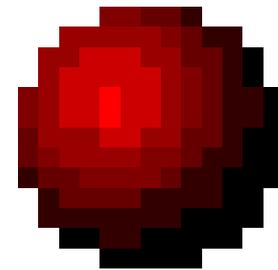
Teilchen

Geschwindigkeit

$$p = m \cdot v$$

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Durchmesser

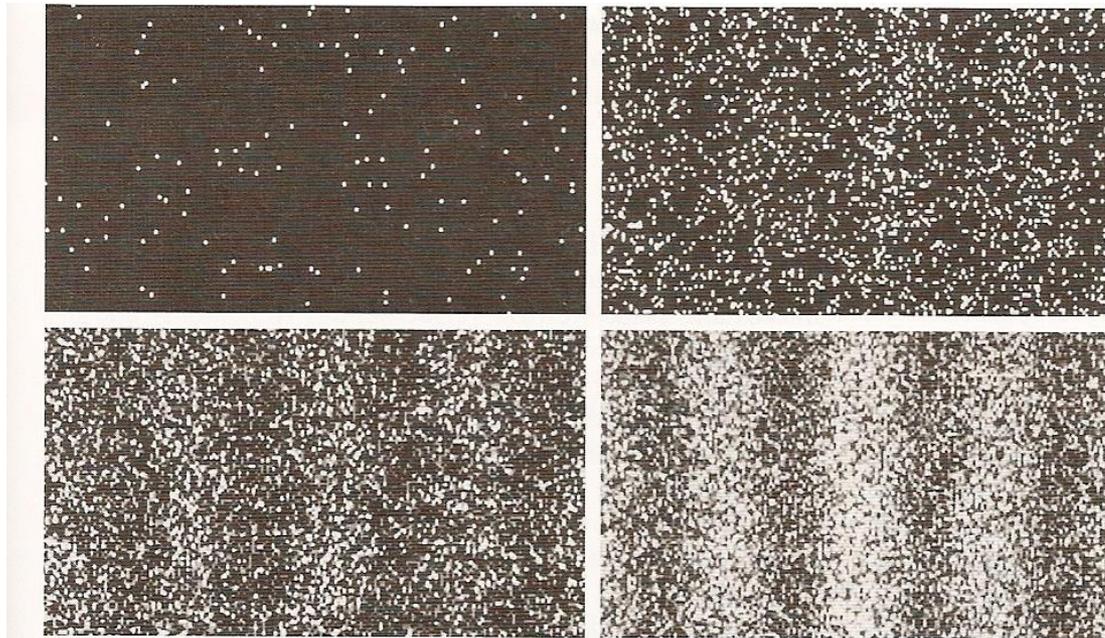


Wellengröße und Teilchengröße  
entsprechen sich.

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Beugung am Doppelspalt

**Lichtwellen und Elektronen** erzeugen am Doppelspalt Interferenzmuster



Quelle: Physik, Tipler,  
Spektrum-Verlag

Materieteilchen verhalten sich wie Wellen.

# Bose-Einstein-Kondensation

## Wellenlänge für Atome

$$\lambda_{\text{dB}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

### De-Broglie-Wellenlänge:

Jedem bewegten Teilchen kann entsprechend zu seinem Impuls eine Wellenlänge zugeordnet werden.

Für Gasatome gilt dann:

$$\langle E_k \rangle = \frac{3 \cdot k \cdot T}{2}$$

$$\langle \lambda \rangle_{\text{dB}} = \frac{h}{\langle p \rangle} = \frac{h}{m \langle v \rangle} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot \langle E_k \rangle}}$$

$$\langle \lambda \rangle_{\text{dB}} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \left( \frac{3 \cdot k \cdot T}{2} \right)}} = \frac{h}{\sqrt{3 \cdot m \cdot k \cdot T}}$$

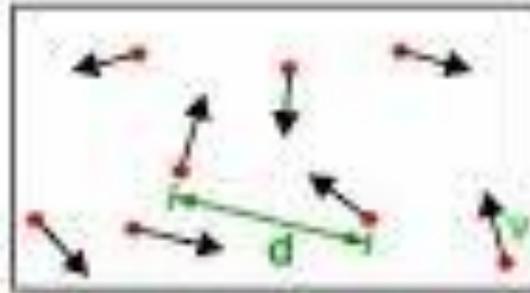
# Bose-Einstein-Kondensation

Teilchengröße ist temperaturabhängig

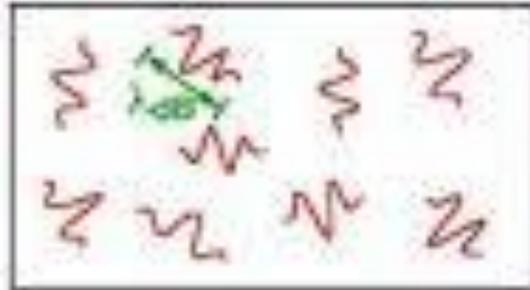
$$\langle \lambda \rangle_{dB} = \frac{h}{\sqrt{3 \cdot m \cdot k \cdot T}}$$

$$\langle \lambda \rangle_{dB} \propto \frac{1}{\sqrt{T}}$$

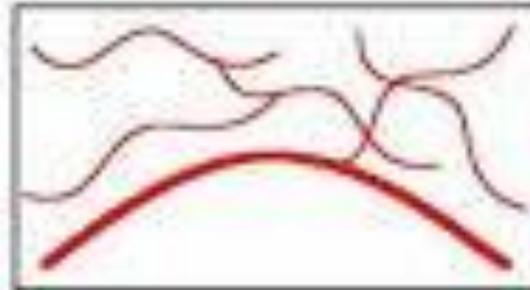
Je niedriger die Temperatur  
desto länger das  
Wellenpaket



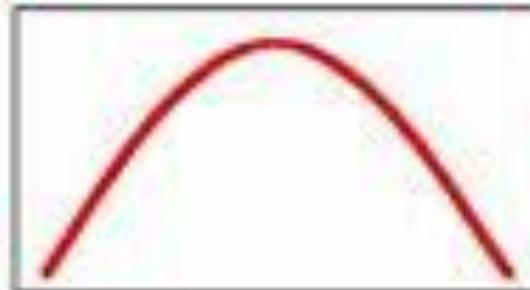
**High  
Temperature T:**  
thermal velocity  $v$   
density  $d^{-3}$   
"Billiard balls"



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



**T=T<sub>crit</sub>:**  
**Bose-Einstein  
Condensation**  
 $\lambda_{dB} \sim d$   
"Matter wave overlap"



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

# Bose-Einstein-Kondensation

Teilchengröße ist temperaturabhängig

$$\langle \lambda \rangle_{\text{dB}} = \frac{h}{\sqrt{3 \cdot m \cdot k \cdot T}}$$

Kritische Temperatur  $T_{\text{krit}}$  wenn  
Wellenlänge  $\approx$  Teilchenabstand

$$T_{\text{krit}} \approx \frac{h^2}{3 \cdot m \cdot k \cdot d^2}$$

$$\langle \lambda \rangle_{\text{dB}} \approx d$$

Teilchenabstand hängt von der Teilchendichte  $n$  ab.  
Die Wellenzüge überlappen, wenn im Volumen  $d^3$  ein  
Teilchen zu finden ist.

$$n_{\text{krit}} \approx \frac{1}{d^3} \rightarrow d \approx \frac{1}{\sqrt[3]{n_{\text{krit}}}} \rightarrow d^2 \approx \frac{1}{\sqrt[3]{n_{\text{krit}}^2}}$$

## Bose-Einstein-Kondensation

Teilchengröße ist temperaturabhängig

$$T_{\text{krit}} \approx \frac{h^2 \cdot \sqrt[3]{n_{\text{krit}}^2}}{3 \cdot m \cdot k}$$

Je höher die Teilchendichte umso weniger muss man kühlen

z.B.  $T_{\text{krit}} = 100 \text{ nK}$

Wird  $T_{\text{krit}}$  unterschritten:

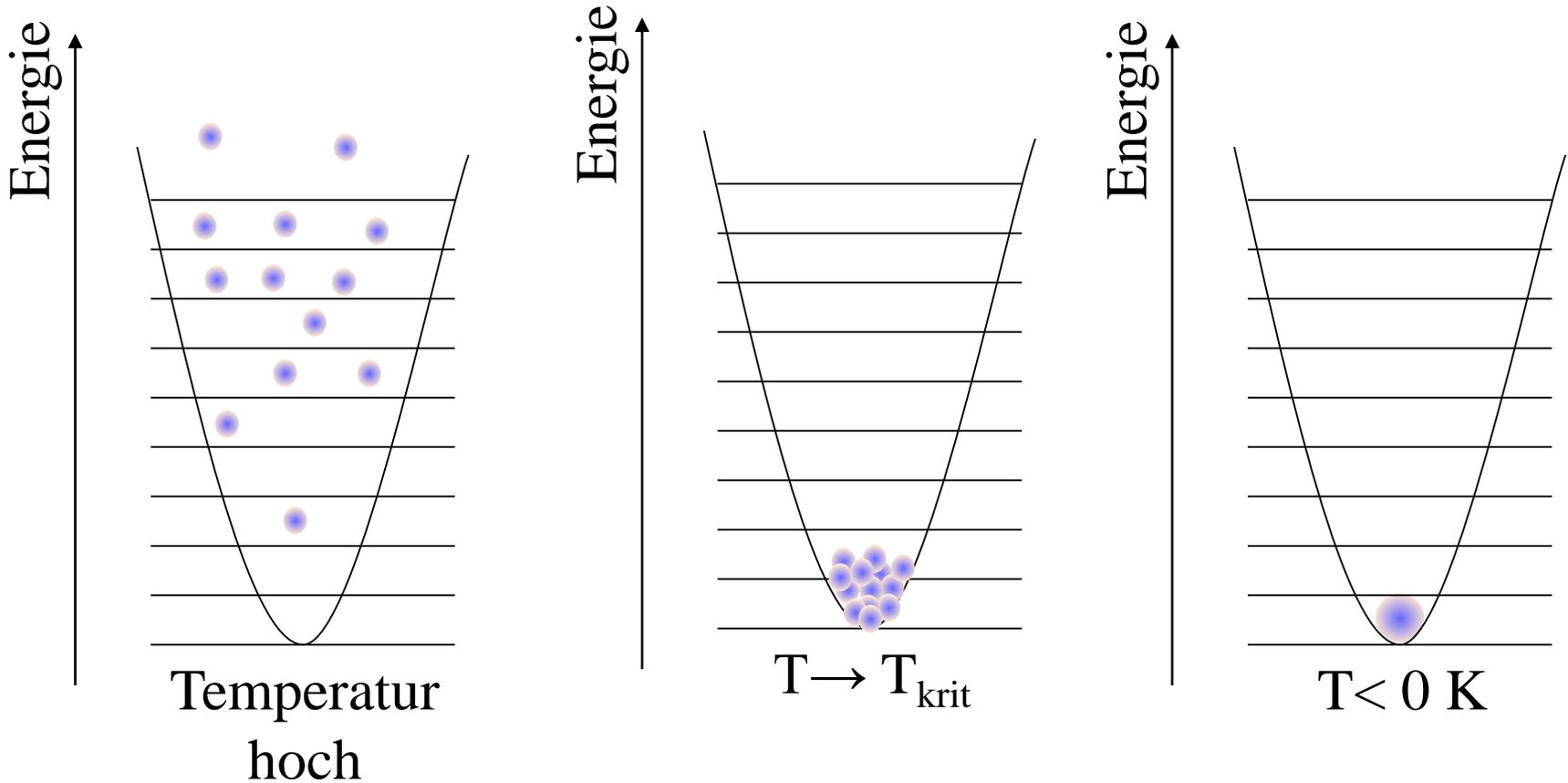
Wellen überlappen (interferieren).

Einzelwellen nicht mehr unterscheidbar.

Bose-Einstein-Kondensat hergestellt.

# Die Bose-Einstein-Kondensation

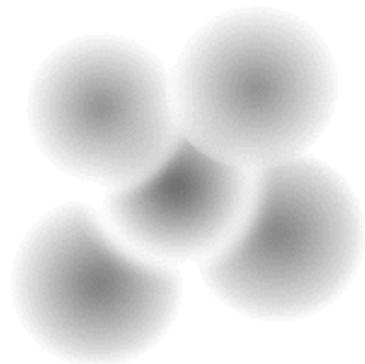
Bosonen in der Nähe des absoluten Nullpunktes



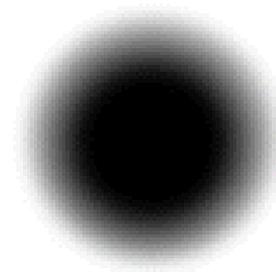
# Die Bose-Einstein-Kondensation

Bosonen in der Nähe des absoluten Nullpunktes

Schon vor Erreichen der kritischen Temperatur besetzen die Atome den Grundzustand.



Einige sehr kalte Atome



Einige Atome in einem  
Bose-Kondensat

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Motivation



Ziehen sie sich warm an!

Es geht um das kältestes Gas des Universums.

Kälter als das Universum selbst

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Kälter als kalt

Was ist hinreichend kalt?

Zur Veranschaulichung bauen wir uns ein sehr, ein wirklich sehr langes Thermometer!

Es soll ca. 600 km lang sein und von Strand von Hooksiel an der Nordseeküste bis in diesen Raum reichen.



# Die Bose-Einstein-Kondensation Kälter als kalt

Raumtemperatur  
300 K

Wasser wird fest  
273 K

Winter am Südpol  
213 K

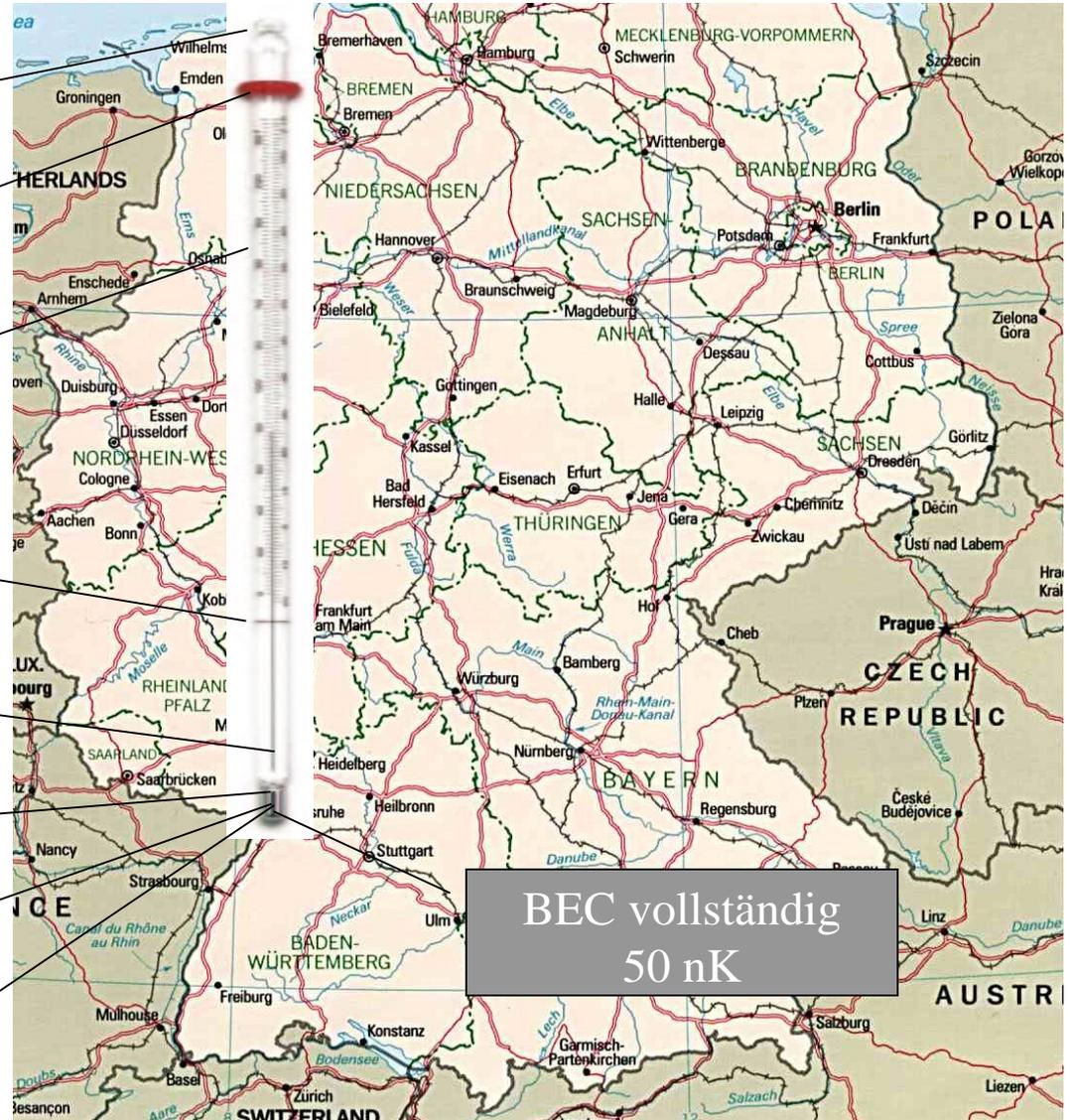
Luft wird flüssig  
77 K

Helium wird flüssig  
4 K

Universum  
2.7 K

He-Kühlung  
20 mK

BEC beginnt  
400 nK



Quelle: Internet

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Kühlung von Gasen

Mit guten klassischen Verfahren kommt man auf 20 mK.  
Auf unserem Thermometer war das im Gerthsen Hörsaal.

Die mittlere Bewegungsenergie der Gasteilchen ist ein Maß für die Temperatur.

Kühlung: Immer langsamere Bewegung der Gasteilchen

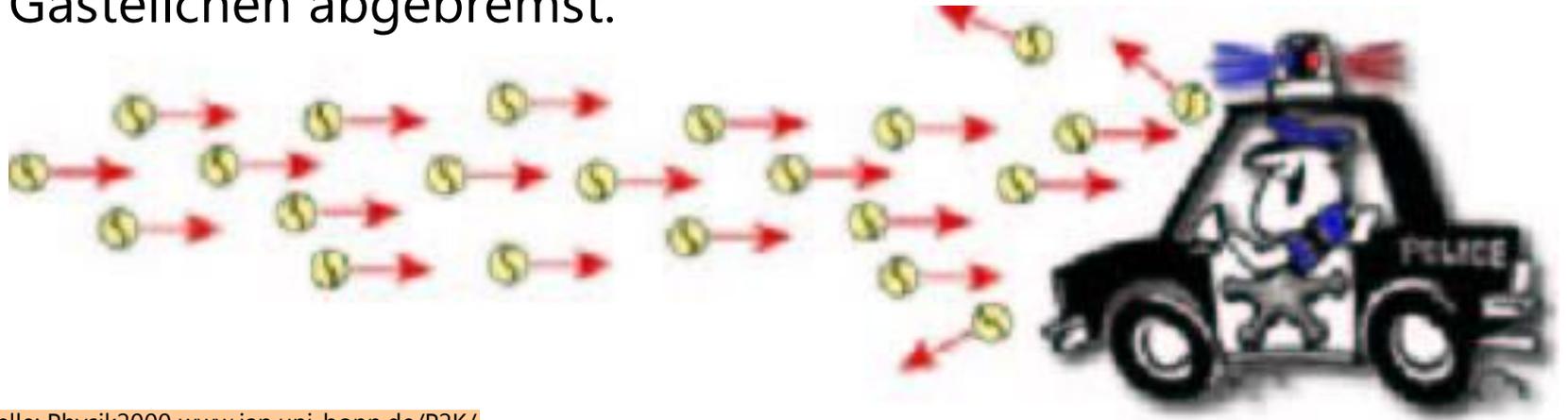
# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Laserkühlen: Das Verfahren

Mit Lasern brennt man Löcher, schweißt Metalle, schneidet man Keramik, brennt man Löcher in die Netzhaut.....Wie zum Teufel soll man mit Laserlicht kühlen können?

Licht bringt Energie in das zu kühlende Gas.  
Kühlung: Immer langsamere Bewegung der Gasteilchen.

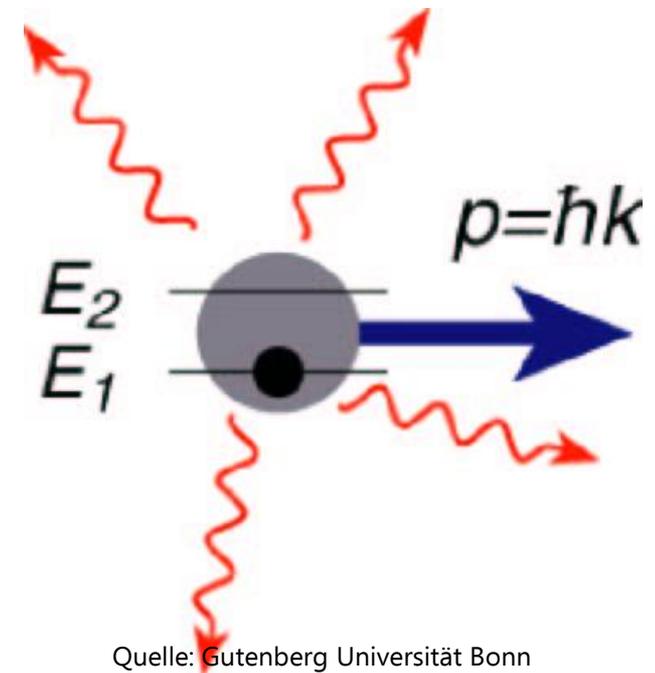
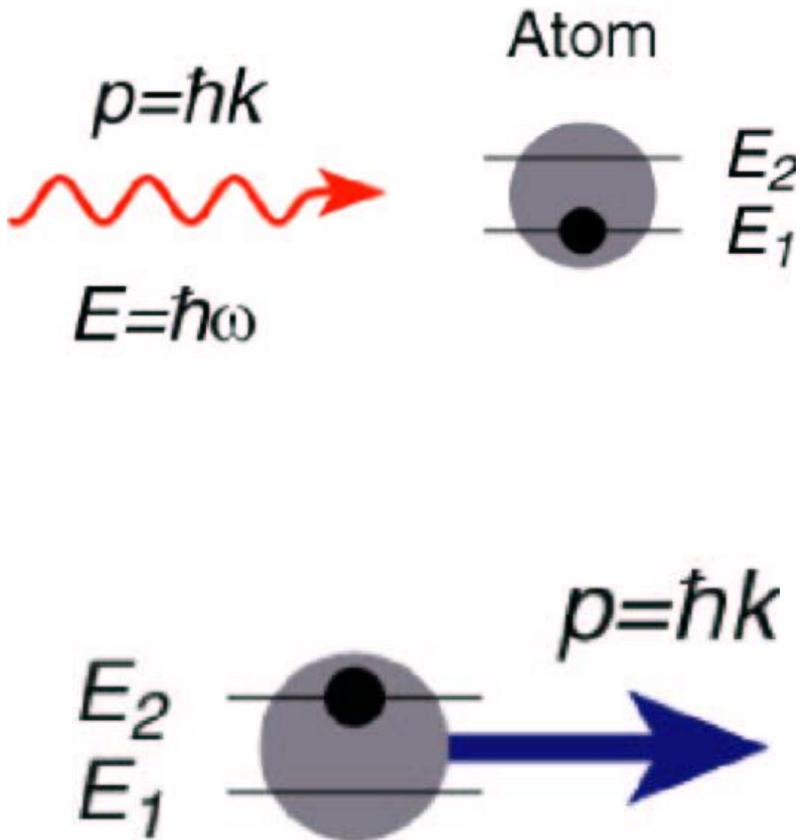
Die Laserstrahlung ist gerichtet; Damit wird zumindest ein Teil der Gasteilchen abgebremst.



# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Laserkühlen: Das Verfahren

Photonen tragen einen Impuls.



Quelle: Gutenberg Universität Bonn

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Laserkühlen: Problem 1. Die Intensität

Die Intensität muss stimmen!

Laser



Intensität zu hoch:  
Zu viele Photonen pro Zeiteinheit fegen die Atome weg.

Laser



Intensität zu niedrig:  
Die Bremse ist zu schwach.

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Laserkühlen: Problem 2. Die Frequenz

Die Lichtenergie (Frequenz) muss stimmen!

Laser



Wellenlänge falsch:  
Keine Absorption!

Laser



Wellenlänge richtig:  
Photonen werden absorbiert und können Atome bremsen.

# Die Bose-Einstein-Kondensation

Laserkühlen: Problem 3. Bremsen mit dem Dopplereffekt

Die Lichtenergie (Frequenz) muss zur Geschwindigkeit stimmen.

Wellenlänge falsch:

Atome, die auf den Laserstrahl zufliegen werden nicht gebremst

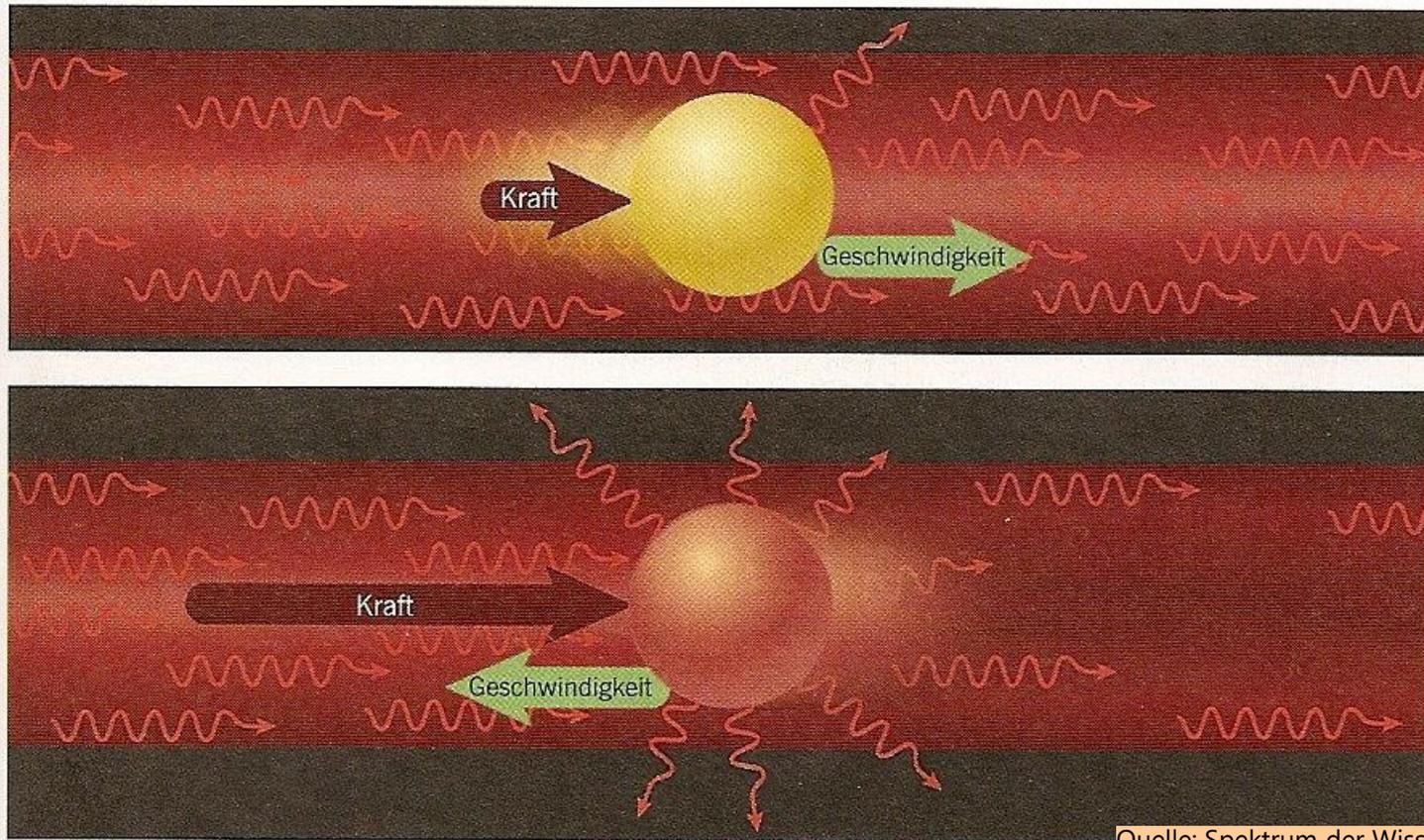
Wellenlänge richtig:

Atome, die auf den Laserstrahl zufliegen werden selektiv gebremst. Die übrigen z.B. bereits gebremste werden nicht beeinflusst.

# Die Bose-Einstein-Kondensation

Laserkühlen: Problem 3. Bremsen mit dem Dopplereffekt

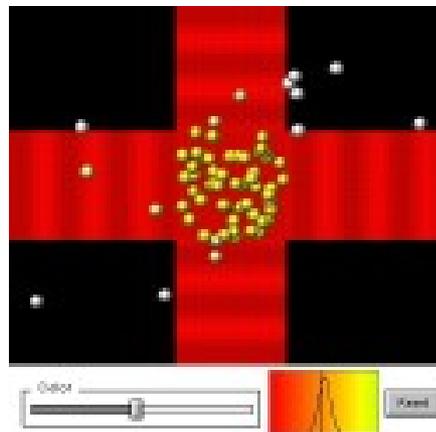
Die Erklärung



# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Laserkühlen: Die Laserfalle

Um möglichst viele Richtungen abzudecken wurden mehrere Laserstrahlen gekreuzt. Das Ergebnis ist eine optische Falle



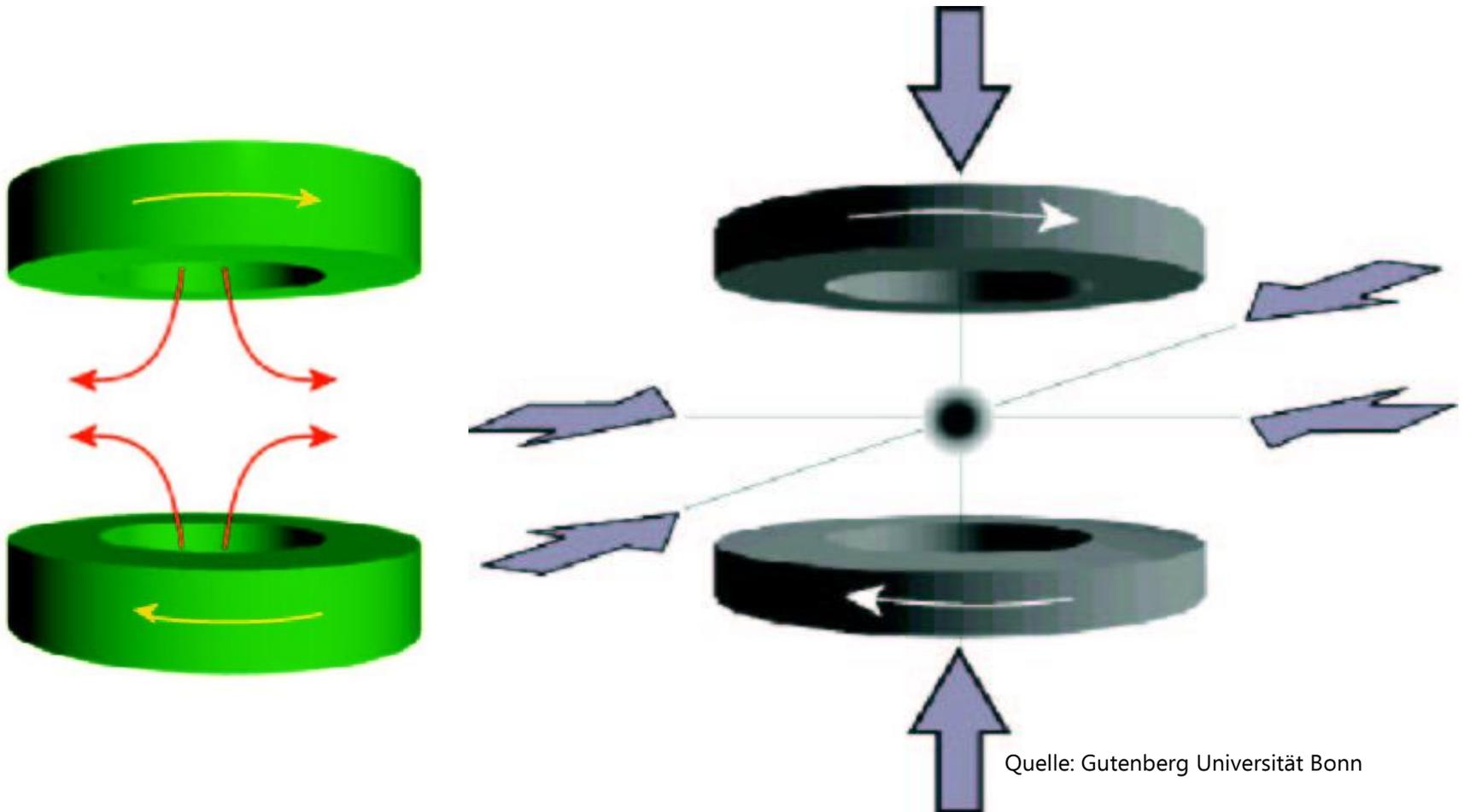
Im Kreuzungsbereich der Laserstrahlen werden die Atome, in ihrer Bewegung nach außen gebremst.

Atome, die sich auf den Kreuzungsbereich zu bewegen werden nur teilweise beeinflusst. (Abhängig von Richtung und Geschwindigkeit)

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Laserkühlen: Die magneto-optische Falle

Ein kleines Magnetfeld wird eingebaut.



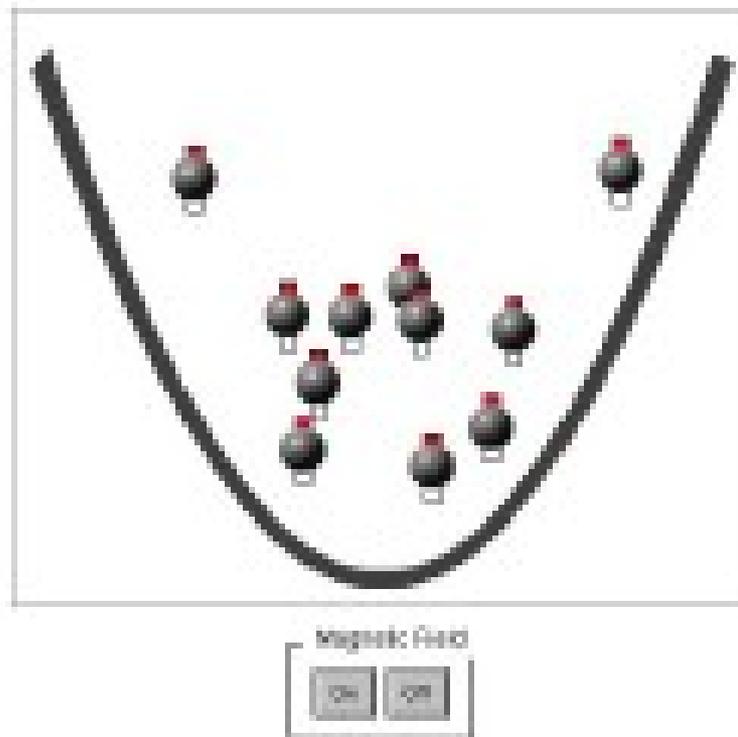
Quelle: Gutenberg Universität Bonn

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Magnetische Falle I

Atome haben ein schwaches magnetisches Moment.

Durch ein "topfförmiges Magnetfeld" kann man sie in einem bestimmten Raumbereich einschließen.



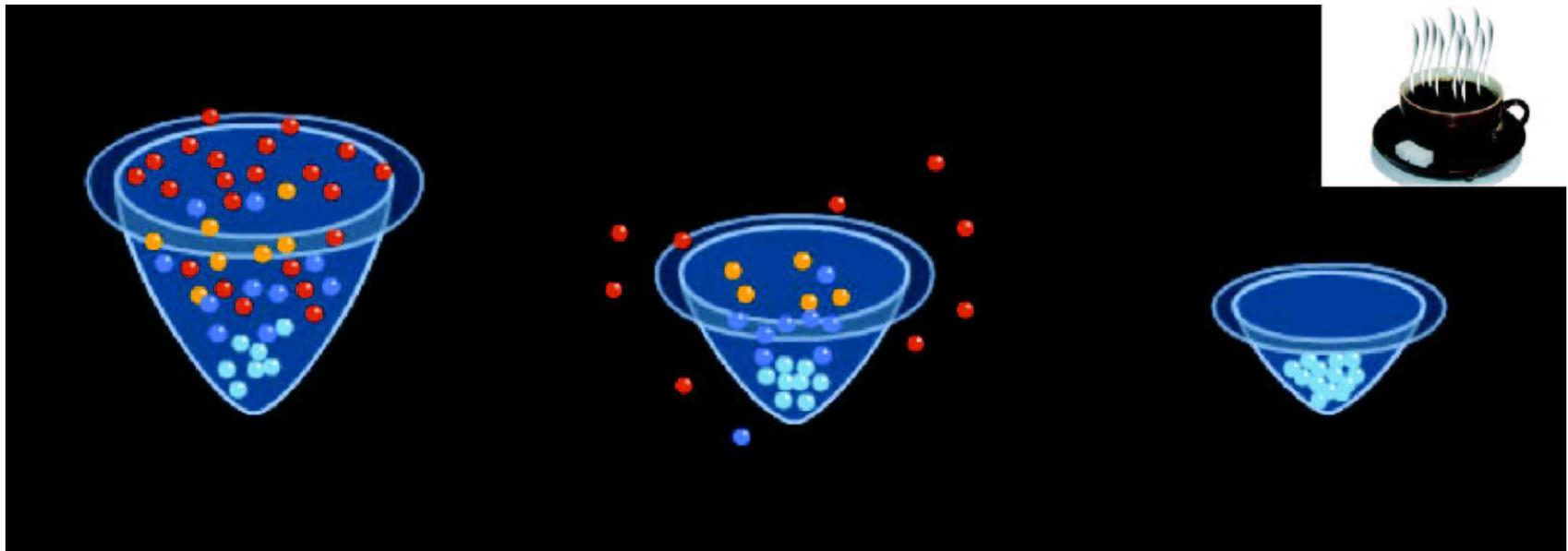
# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Verdampfungskühlen I

Kaffee wird immer kalt.

Der Kaffee verliert an seiner Oberfläche die schnellsten seiner Moleküle durch verdampfen.

Der zurückbleibende Rest hat eine kleinere durchschnittliche Geschwindigkeit.



# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Verdampfungskühlen II

Die Schnellen Atome müssen entweichen und nehmen überdurchschnittlich viel Energie aus dem System mit.

Die magnetische Falle ist oben offen.  
Die Höhe der Wände kann durch das Magnetfeld verändert werden.

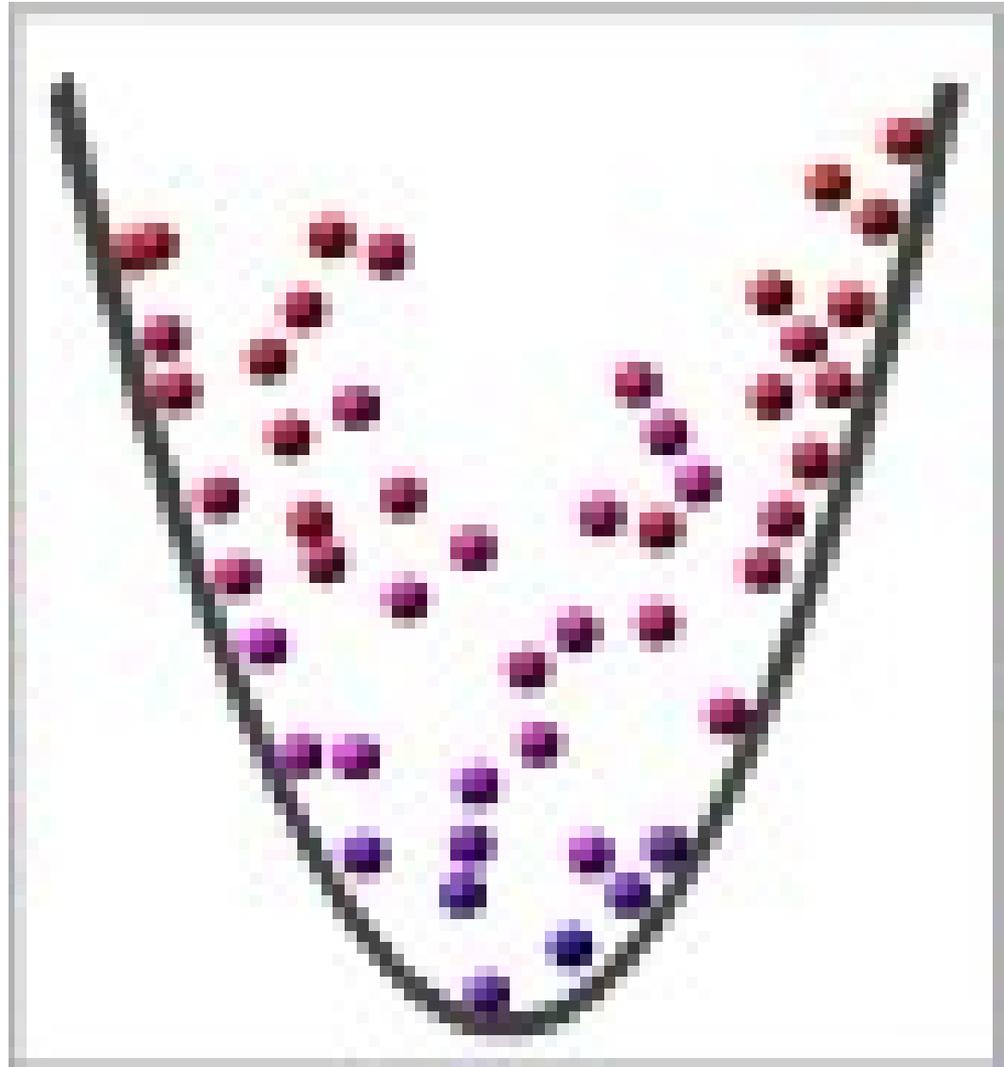
Macht man die Wände der magnetischen Falle gerade so hoch, dass die schnelleren Atome entweichen, bleiben nur die langsameren Atome zurück.

Der zurückbleibende Rest hat eine kleinere durchschnittliche Geschwindigkeit.

Das Gas wird kalt!

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Verdampfungskühlen II



# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Problem IV: Die Dichte

Ist die Dichte zu hoch verflüssigen oder verfestigen sich die Atome zur Flüssigkeit oder Festkörper

In diesem Fall Wechselwirken die Außenelektronen miteinander.  
(Paarbildung)

Folge: Aus Bosonen werden Fermionen.  
Kein Bose-Einstein-Kondensat.

Ist die Dichte zu niedrig haben die Atome zu große Abstände.

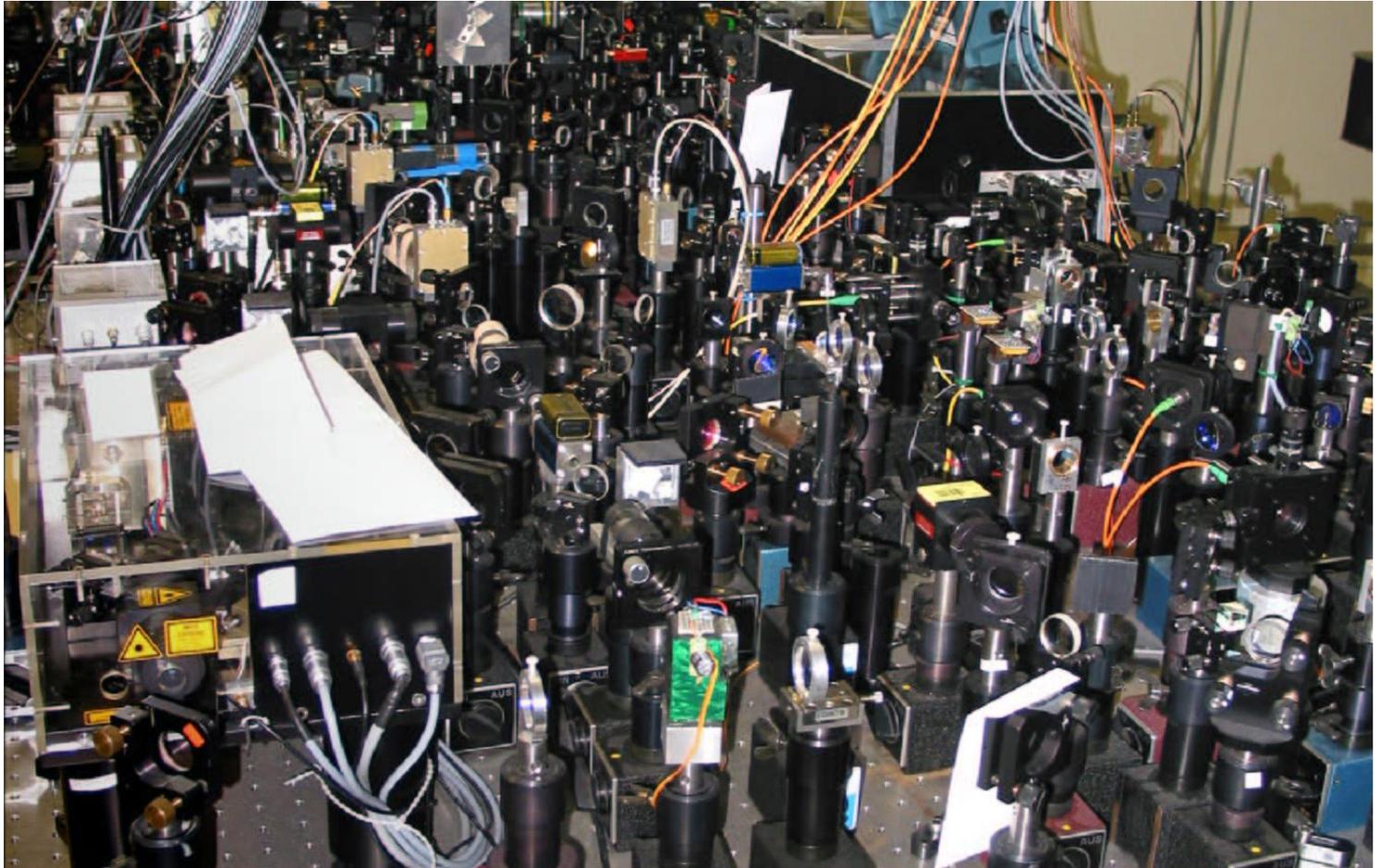
In diesem Fall sind die Abstände für die De-Broglie-Wellenlänge zu groß.

Folge: Keine Wechselwirkung  
Kein Bose-Einstein-Kondensation

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Der Aufwand I

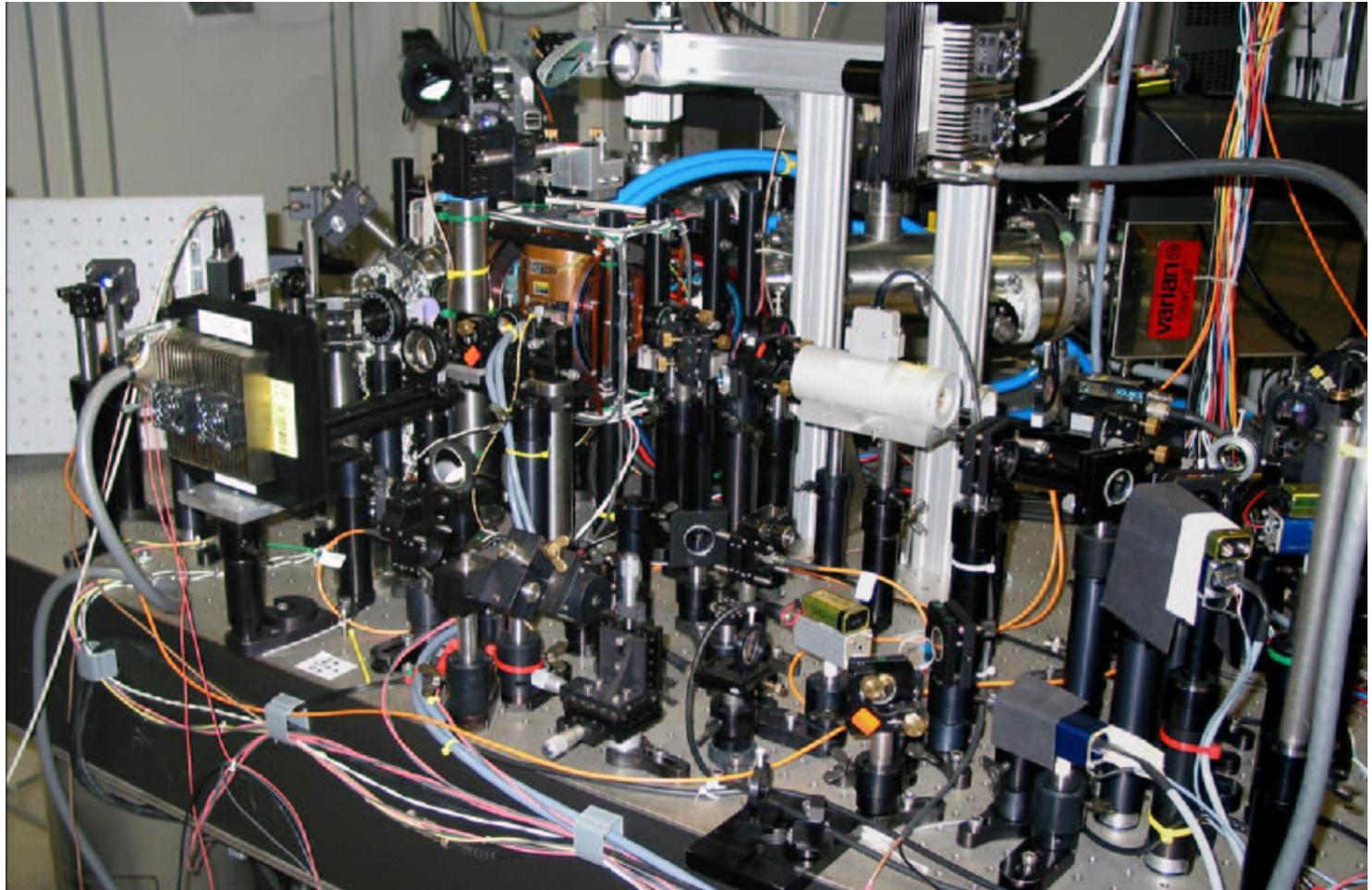
Aufwand all diese Parameter einzuhalten war enorm!



# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Der Aufwand II

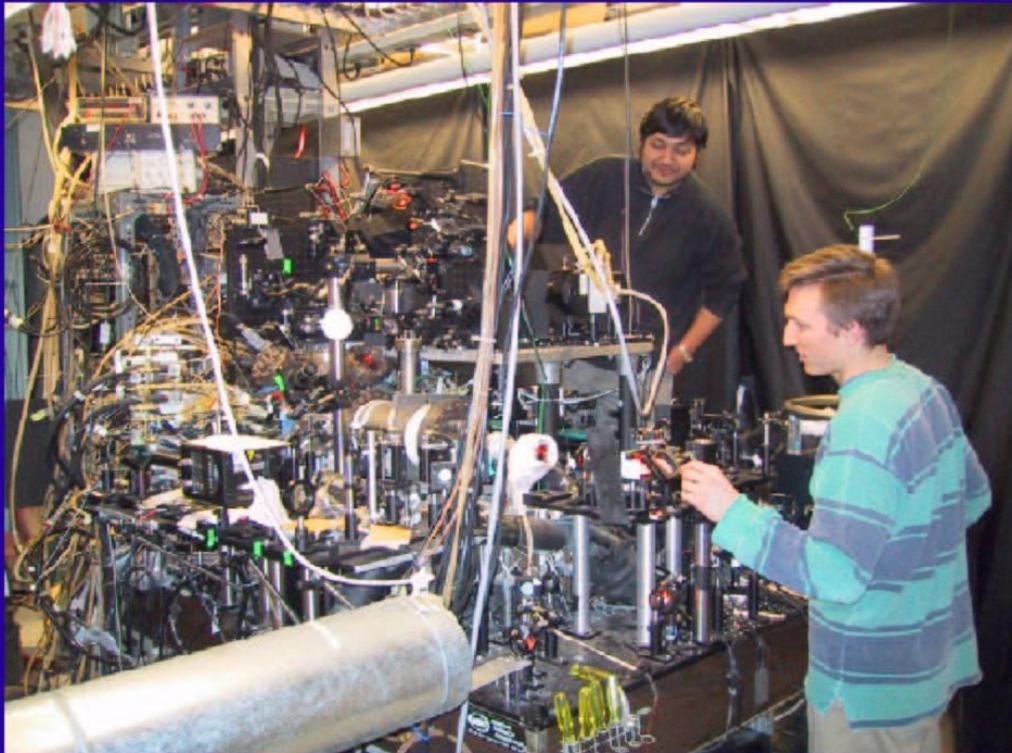
Der technische Aufwand war enorm!



# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Der Aufwand III

Die Ausdehnung der Anlage ist überschaubar.



BEC Apparatur am MIT

# Die Bose-Einstein-Kondensation

Wie sieht es aus?

Aufnahmetechnik:

Mit Laserbestrahlung bestrahlt und den Schatten des Auseinanderfliegens gefilmt und ausgewertet.

Magnetfeld abgeschaltet und Expansion durch vielfache Wiederholung ähnlich Stroboskopaufnahmen beobachtet.

# Die Bose-Einstein-Kondensation

So sieht es aus!

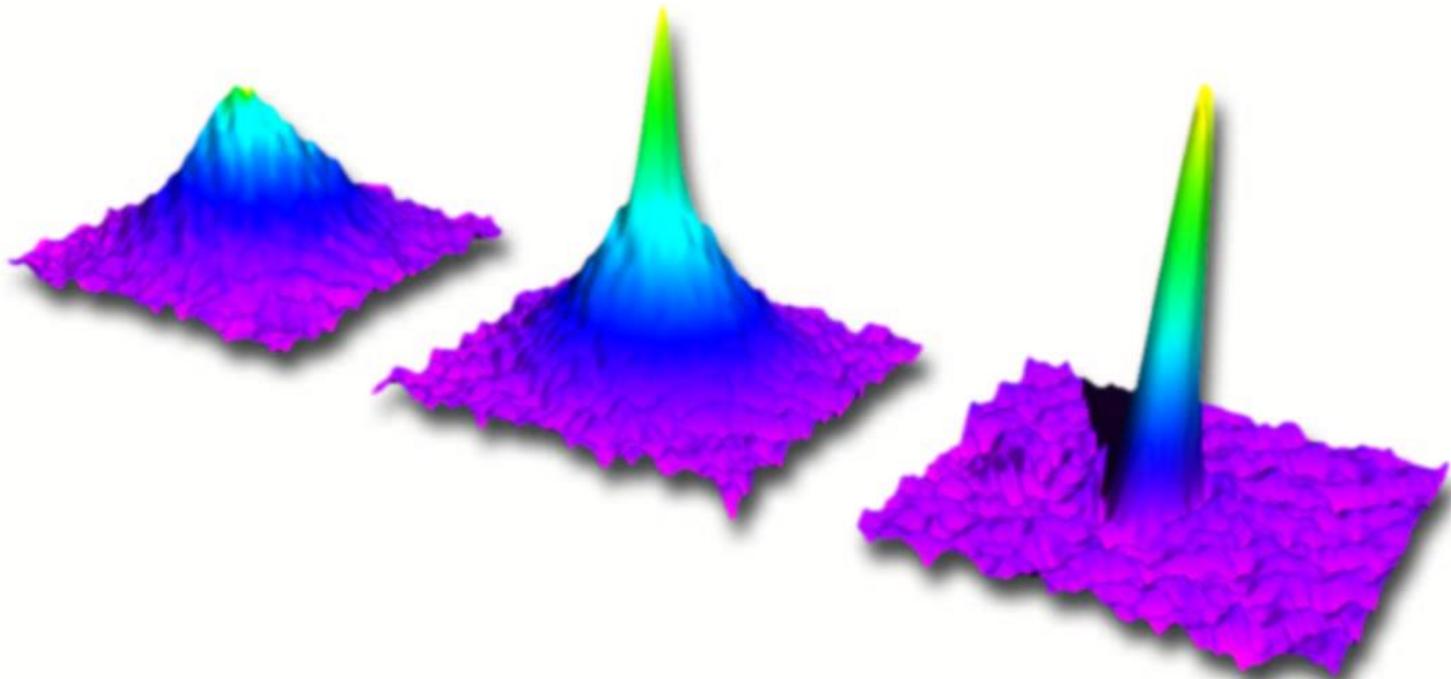


# Die Bose-Einstein-Kondensation

So stellt man es dar

Falschfarbendarstellung des BEC

Geschwindigkeitsverteilung: In der Mitte ist Minimum!



# Die Bose-Einstein-Kondensation

## "Anwendungen"

Was kann man mit einem BEC anfangen?

Riesiges Quantenobjekt – Verbindungsglied zwischen Quantenwelt und der makroskopischen Welt.

Beispiel:

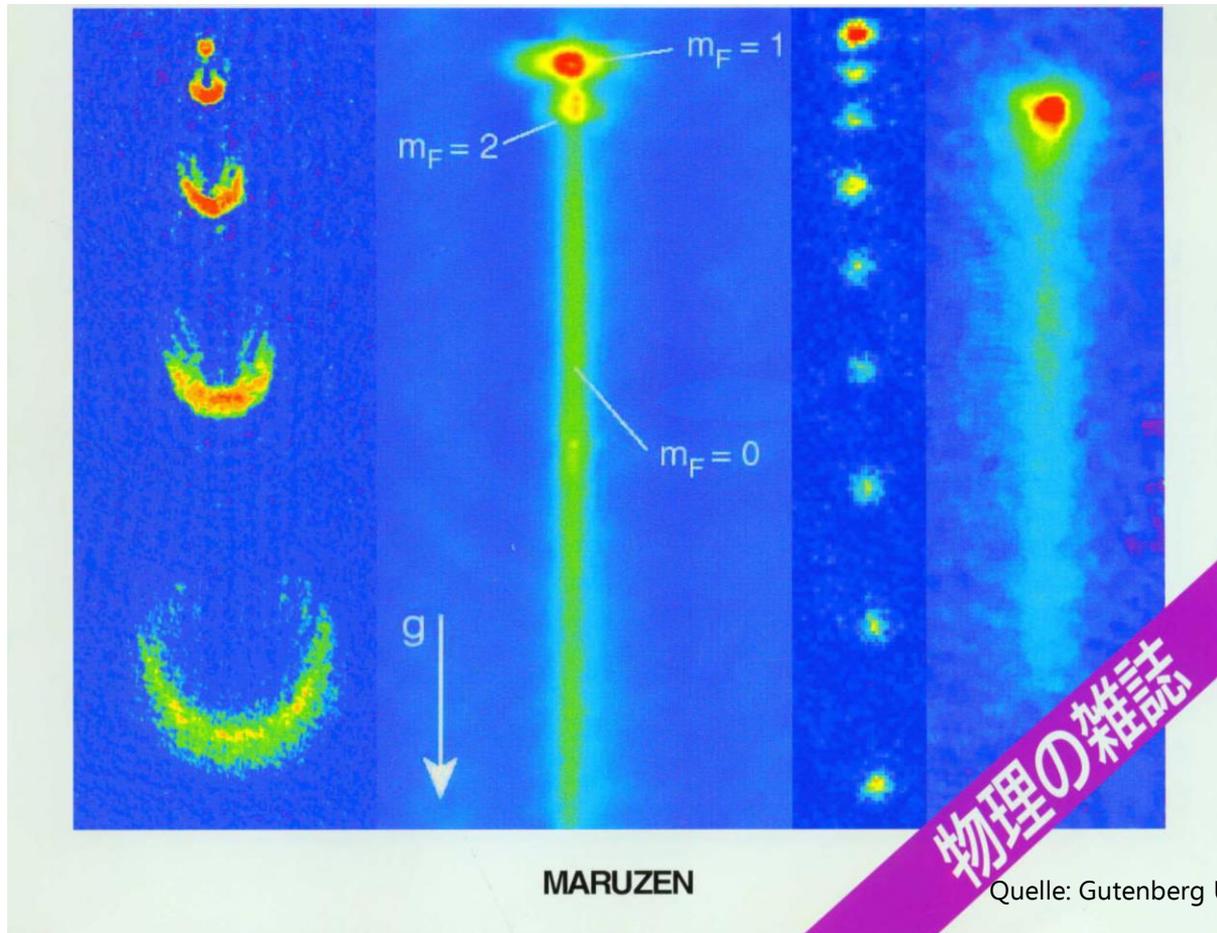
- $9 \cdot 10^7$  Natriumatome
- 1 mm Durchmesser
- Existenzzeit ca. 30 Sekunden

Objekt für Grundlagenforschung: handhabbares Objekt mit Wellen- und Quanteneigenschaften

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Anwendungen: Atomlaser

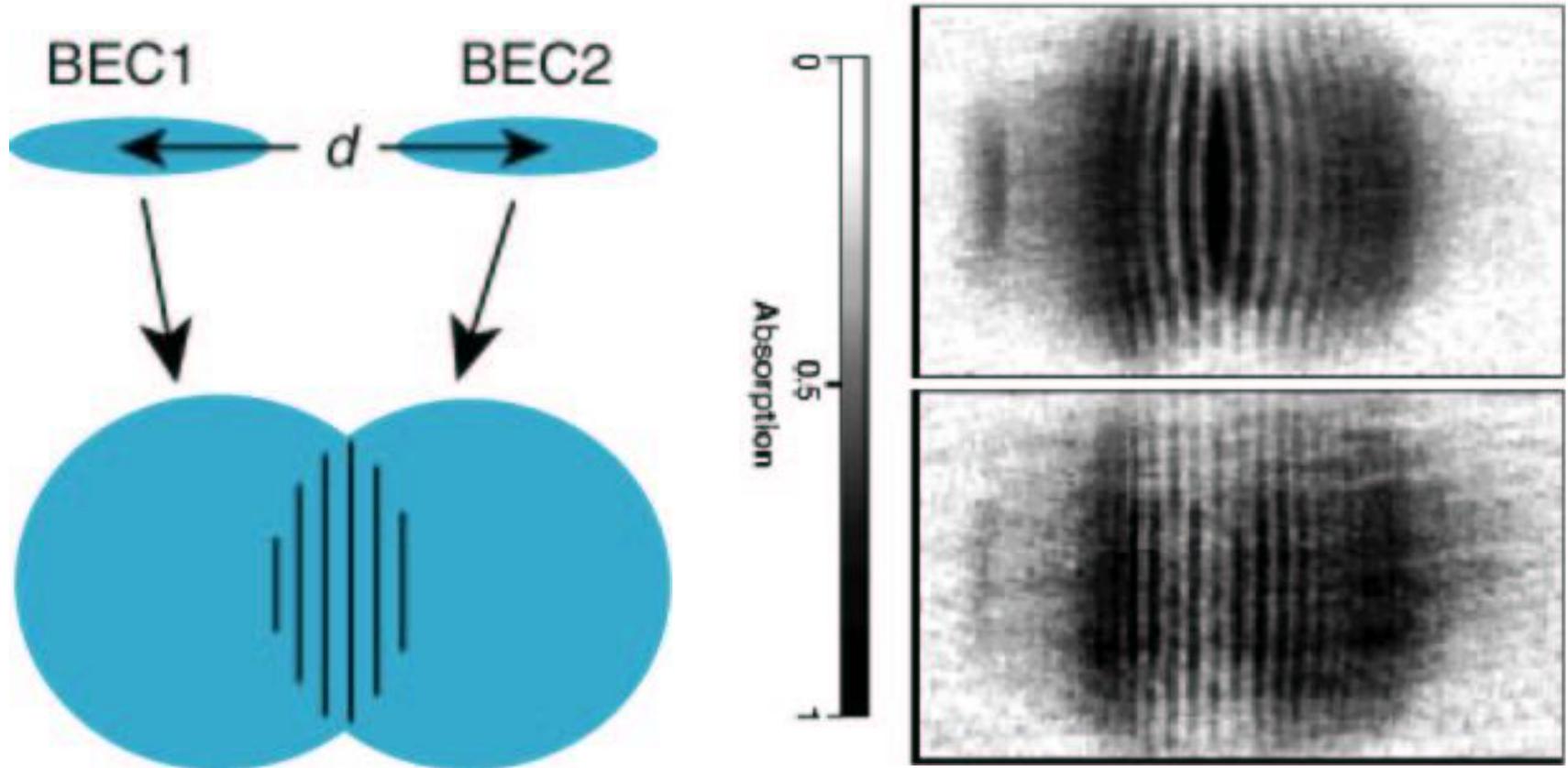
Atomlaser: Bose-Einstein-Kondensate, die sich bewegen.



# Die Bose-Einstein-Kondensation

Anwendung: Interferenz von Materiewellen

Interferenz von Atomwellen direkt beobachtbar



# Die Bose-Einstein-Kondensation

Verwandte Themen:

Superfluidität (Quantenflüssigkeiten)

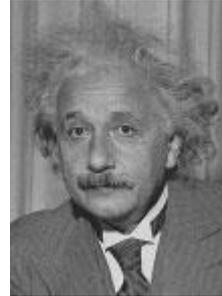
Drehimpulsquantelung (Quantenwirbel)

Lichtgeschwindigkeit herabsetzen

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Die Macher I

Vorhergesagt durch Bose und Einstein 1925



Erzeugt durch Carl E. Wieman; Eric A. Cornell Wolfgang Ketterle 1995/1996



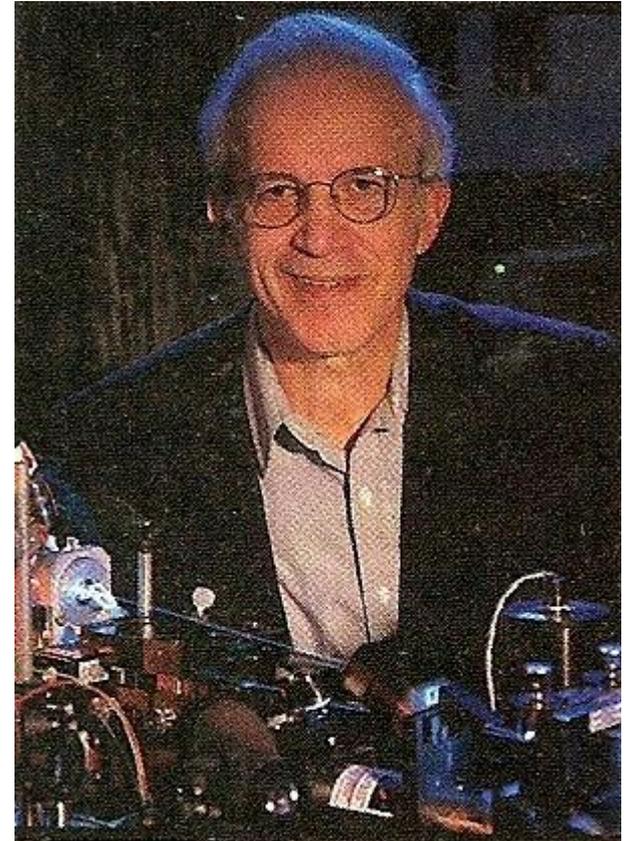
# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Die Macher II

Quelle: Spektrum der Wissenschaft 02/2006

Der Wasserstoff-Papst:  
Daniel Kleppner

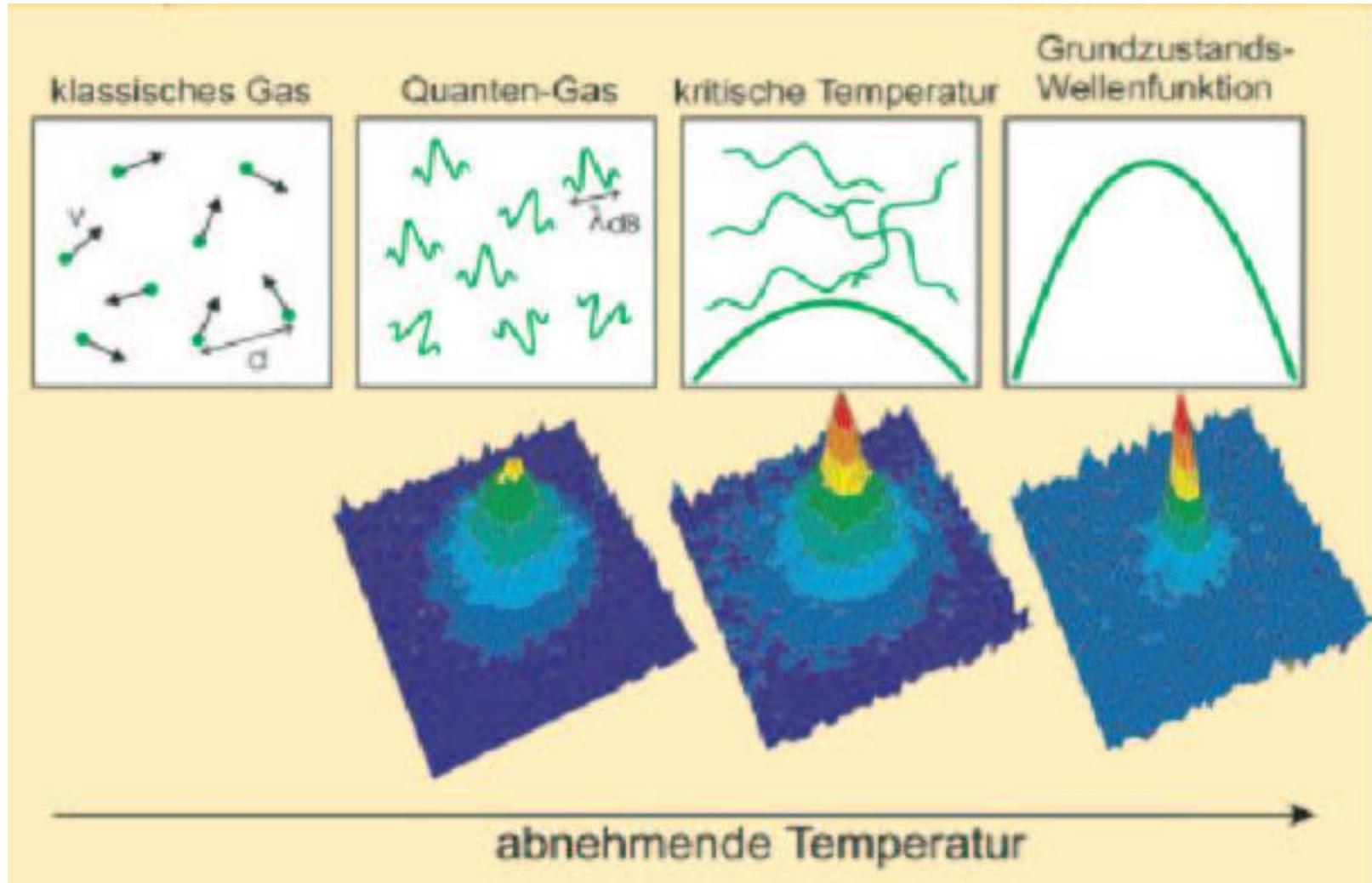
Seit 1976 an der Arbeit  
zum Nachweis der BEC



1998 schaffte seine Gruppe ein BEC mit Wasserstoff: "Es hat etwas länger gedauert"

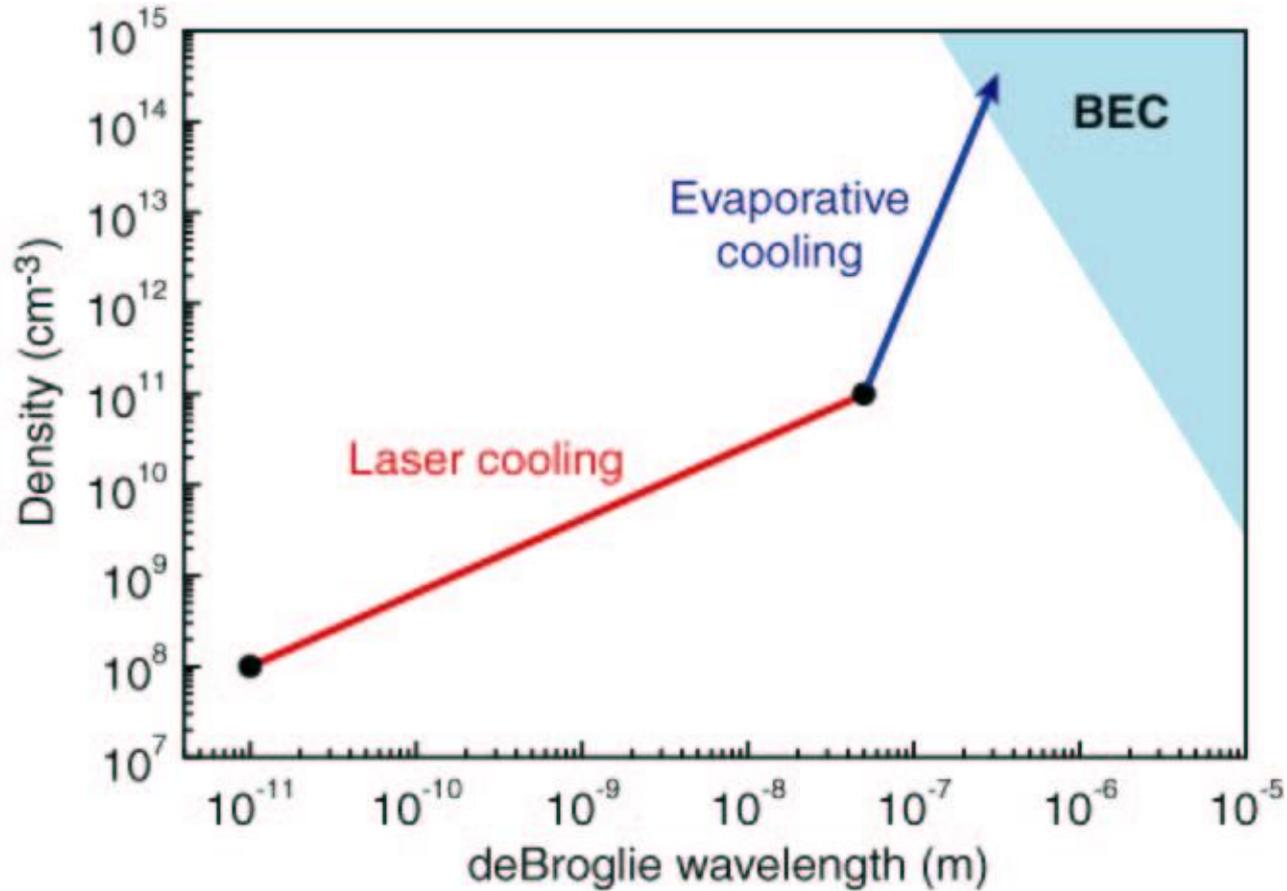
# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Zusammenfassung: Das Prinzip



# Die Bose-Einstein-Kondensation

Zusammenfassung: Druck und Temperatur



300 K

10  $\mu\text{K}$

500 nK



# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Abschluss

Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!

Noch Fragen? ... Dann jetzt!

# Die Bose-Einstein-Kondensation

## Nachschlag

Was passiert, wenn die Temperatur des Universiums weiter fällt und schließlich die Sprungtemperatur für BEC unterschreitet?

Wie hoch ist dann die Dichte des Universums?

Kann man BEC auch mit Photonen machen?

Falls ja – wie?