

Bose Einstein Kondensation: Physik im Bereich von Picokelvin

Steyr, Nov 2007

Robert E. Zillich*
Diana Hufnagl, Dominik Kriegner, Michael Bergmair[‡]

*Institut für Theoretische Physik, Johannes Kepler Universität, Linz, Austria
[‡]CD Laboratory of Surface Optics, Johannes Kepler Universität, Linz, Austria

November 21, 2007

Outline

- 1 Übersicht und Einführung
 - Bosonen
 - Historischer Überblick
 - Theorie der BEC
- 2 Superfluides Helium-4 und Berechnungsmethoden
 - Helium-4
 - Computational Physics: Quanten Monte Carlo
- 3 Kalte Bose Gase
 - Erzeugung von ultrakalten Gasen
 - Messen von BEC
 - Effekte in BEC: Highlights

“Physik im Bereich von Picokelvin”

Cooling Bose-Einstein Condensates Below 500 Picokelvin

**A. E. Leanhardt,* T. A. Pasquini, M. Saba, A. Schirotzek, Y. Shin,
D. Kielpinski, D. E. Pritchard, W. Ketterle**

Spin-polarized gaseous Bose-Einstein condensates were confined by a combination of gravitational and magnetic forces. The partially condensed atomic vapors were adiabatically decompressed by weakening the gravito-magnetic trap to a mean frequency of 1 hertz, then evaporatively reduced in size to 2500 atoms. This lowered the peak condensate density to 5×10^{10} atoms per cubic centimeter and cooled the entire cloud in all three dimensions to a kinetic temperature of 450 ± 80 picokelvin. Such spin-polarized, dilute, and ultracold gases are important for spectroscopy, metrology, and atom optics.

(Science, **301**, 1513 (2003))

Motivation

BEC ist interessantes, sehr aktives Forschungsgebiet – wie andere auch!

Warum ein Vortrag über Bose-Einstein Kondensation (BEC)?

- Arbeitsgebiet von Kollegen und mir an der JKU
- Österreich-Bezug: z.b. Gruppe von Prof. Rudi Grimm (Institute for Experimental Physics at the University of Innsbruck and Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI) of the Austrian Academy of Sciences.)
- BEC in Schule?
→ Lehramts-Diplomarbeit von Joachim Seitl (2006, Betr. Helga Böhm)

Eine lange Geschichte

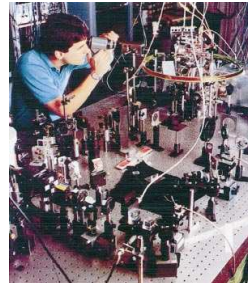
von Bose's Photonen und
Einstein's idealem Gas mit
"falscher" Statistik 1924



bis zu ultrakalten verdünnten
Gasen seit 1995 (Nobelpreis
2001)



Satyendra Nath Bose



(JILA)

Bose "falsche" Zählstatistik?



Was passiert hier drin?

Wichtige Begriffe

Definitionen

- De Broglie Wellenlänge: ein Quantenteilchen mit Impuls p hat eine Wellenlänge

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}$$

- Temperatur: die Wellenlänge, die der mittleren thermischen Geschwindigkeit der Atome entspricht, ist

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T}}$$

⇒ längere Wellenlänge bei niedrigeren Temperaturen

- N ... Anzahl der Teilchen
- (Teilchen-)Dichte $n = \frac{N}{V}$... Anzahl der Teilchen pro Volumen V

Schlagworte

Schlagworte:

- BEC ist eine **Phase**: "Kondensation (auch) im Impulsraum"
- BEC ist ein makroskopischer Quantenzustand ("wie ein einziges Atom"): der niedrigste Quantenzustand ist **makroskopisch besetzt**
- BEC ist "**new form of matter**": in sehr verdünntem ultrakalten Gas

	solid	Cornell(JILA)	Hulet(Rice)	Ketterle(MIT)
n (in $\#/cm^3$)	10^{22}	$2.5 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{10}$	10^{14}
T (in K)	-	$170nK$	$200\mu K$	$2\mu K$

⇒ Wechselwirkungen zwischen Atomen können in 1. Näherung vernachlässigt werden: fast *ideales Gas*
 (aber BEC tritt auch in superfluiden Helium auf)

Bose's Zählstatistik

Bose/Fermi Statistik \neq "ununterscheidbar"
Bose/Fermi Statistik \Rightarrow "ununterscheidbar"

Distribution of N objects in p different boxes (n_i in i -th box)

distinguishable $\rightarrow \frac{N!}{\prod_{i=1}^p n_i!}$ ways to distribute them

bosons \rightarrow one and only one way of distributing them for a given set of $\{n_i\}$

Difference important if $N \gtrsim p$ (degeneracy condition)
 \rightarrow Bosons show tendency to cluster

Simple rule of thumb

BEC occurs when degeneracy condition $N \sim p$ is satisfied with p taken to be the number of thermally accessible states (energy $\lesssim k_B T$)

Beispiel: $N=p=2$ a) 50% in same state; b) 66% in same state

Bose und Fermi Symmetrie

Quantenmechanik mit Bose & Fermi Symmetrie:

Die Schrödinger Gleichung für N Teilchen (Koordinaten $\{\mathbf{r}_i\}$)

$$H\Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N; t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N; t)$$

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \sum_{i=1}^N \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{r}_i^2} + \sum_{i < j} V(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) = \sum_{i=1}^N V_{\text{ext}}(\mathbf{r}_i)$$

Die Schrödinger Gleichung kennt keine Bosonen und Fermionen.
(daher 1. Quantisierung unelegant)

→ wir brauchen zusätzliche Bedingung...

Bose und Fermi Symmetrie

Bosonen

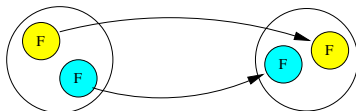
Photonen, etc.; gerade Anzahl von Fermionen

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_i \dots, \mathbf{r}_j \dots, \mathbf{r}_N) = \Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_j \dots, \mathbf{r}_i \dots, \mathbf{r}_N)$$

Fermionen

Elektron, Proton, Neutron; ungerade Anzahl von Fermionen

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_i \dots, \mathbf{r}_j \dots, \mathbf{r}_N) = -\Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_j \dots, \mathbf{r}_i \dots, \mathbf{r}_N)$$



Was ist BEC?

Illustration von Bose-Einstein Kondensation (BEC):

Notwendige Bedingung:

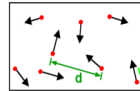
Wenn De Broglie Wellenlänge

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T}} \gtrsim \text{mittlerer Teilchenabstand,}$$

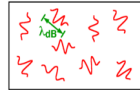
dann überlappen die Teilchenwellen

⇒ BEC Phasenübergang bei *kleiner* Temperatur T / *grosser* Dichte n

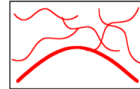
What is Bose-Einstein condensation (BEC)?



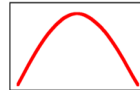
High Temperature T:
 thermal velocity v
 density d^3
 "Billiard balls"



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



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



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

(Ketterle group, MIT)

Zeittafel: BEC in verdünnten Gasen

≤1925 Bose & Einstein

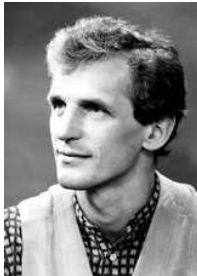
- 1952 Schrödinger: "The densities are so high and the T is so low [...] that the van der Waals corrections are bound to coalesce with the possible effects of degeneration, and there is little prospect of ever being able to separate the 2 kinds of effects."
- 198x jahrzehntelange BEC Versuche an spin-polarisiertem Wasserstoff (aber erst 1998 geschafft)
- 1994 S. Chu (Nobel prize 1997): "I am betting on Nature to hide Bose condensation from us. The last 15 years she's been doing a great job."
- 1995 endlich BEC! W. Ketterle et al., MIT und E. A. Cornell, C. E. Wieman et al., JILA, Univ. of Colorado
- 1997 S. Chu(!), C. Cohen-Tannoudji, W. D. Phillips: Nobel prize for laser trapping and cooling of atoms

Nobel Prize in Physics 2001

“for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates”
(nobelprize.org)



Eric A. Cornell
JILA
University of Colorado



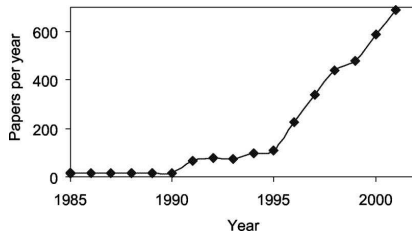
Wolfgang Ketterle
MIT



Carl E. Wieman
JILA
University of Colorado

BEC heute

seit 1995: Gebiet der BEC stark expandiert:



(Ketterle RMP 2002, by searching ISI database with keywords "Bose" and "Einstein")

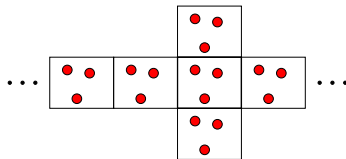
... und in 2006: 1009 Artikel

aber vergleiche: paper Inflation

journal	2001	2006	ratio
Phys. Rev. A	0.46m	0.73m	1.59
Phys. Rev. B	1.42m	1.95m	1.37

Theorie der homogenen BEC im Schnelldurchlauf

homogene Systeme werden in der Regel durch periodisch Randbedingungen eines Volumen V beschrieben:



⇒ der Impuls \mathbf{p} ist eine gute Quantenzahl (aber diskret).

⇒ freies Atom mit \mathbf{p} hat Energie $\epsilon_{\mathbf{p}} = \frac{\hbar^2 \mathbf{p}^2}{2m}$.

wir betrachten *nicht-wechselwirkenden* Atome: **ideales Gas** (verdünntes Gas!)

Theorie der homogenen BEC im Schnelldurchlauf

Quantenstatistik des Idealen Gases (grosskanonisches Ensemble):

die mittlere Anzahl der (bosonischen!) Atome mit Impuls \mathbf{p} berechnet sich zu

$$N_{\mathbf{p}} = \frac{ze^{-\epsilon_{\mathbf{p}}/k_B T}}{1 - ze^{-\epsilon_{\mathbf{p}}/k_B T}} = \frac{e^{-(\epsilon_{\mathbf{p}} - \mu)/k_B T}}{1 - e^{-(\epsilon_{\mathbf{p}} - \mu)/k_B T}}$$

die "Fugazität" $z = e^{\mu/k_B T}$ ist bestimmt durch die **Bedingung**

$$\sum_{\mathbf{p}} N_{\mathbf{p}} = N$$

Es gibt ∞ viele Impulse $\mathbf{p} \implies N_{\mathbf{p}} \ll N?$

Theorie der homogenen BEC im Schnelldurchlauf

Thermodynamischer Limes:

- $N \rightarrow \infty$ und $V \rightarrow \infty$ sodass die Dichte $n = \frac{N}{V}$ constant ist.
- aus Summe wird Integral

$$\sum_{\mathbf{p}} \rightarrow \frac{V}{h^3} \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3}$$

- Bei sinkender T , kann aber Bedingung $\frac{V}{h^3} \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} N_{\mathbf{p}} = N$ nicht mehr erfüllt werden.
- Spezialbehandlung für $\mathbf{p} = 0$ = Zustand mit *niedrigster* Energie $\epsilon_{\mathbf{p}=0} = 0$.
W'keit, dass Atom Impuls $\mathbf{p} = 0$ hat, ist

$$N_0 = \frac{z}{1-z}$$

Wenn $z \rightarrow 1$, dann explodiert $N_0 \implies$ **Bedingung** kann erfüllt werden.

makroskopische Besetzung von N_0 ! $N_0 = O(N)$ ($N_{\mathbf{p}} \ll N$ für alle $\mathbf{p} \neq 0$)

BEC des idealen Gases tritt auf falls ($\lambda = \sqrt{2\pi\hbar^2/mk_B T}$)

$$\lambda^3 n = \left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^3 > 2.612$$

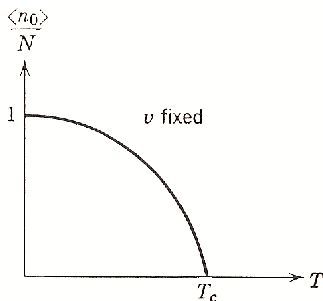
Temperaturabhängigkeit von N_0

Aus $\lambda^3 n \Rightarrow 2.612$ erhalten wir kritische Temperatur T_c :

$$\frac{N_0}{N} = \begin{cases} 0 & \lambda^3 n \leq 2.612 \\ 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{3/2} & \lambda^3 n > 2.612 \end{cases}$$

BEC in endlicher Wolke kalter Atome: $V_{\text{ext}}(\mathbf{r}) \neq 0$
analoge Rechnung. . .

$$\frac{N_0}{N} = \begin{cases} 0 & T > T_c \\ 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^3 & T \leq T_c \end{cases}$$



1 Übersicht und Einführung

- Bosonen
- Historischer Überblick
- Theorie der BEC

2 Superfluides Helium-4 und Berechnungsmethoden

- Helium-4
- Computational Physics: Quanten Monte Carlo

3 Kalte Bose Gase

- Erzeugung von ultrakalten Gasen
- Messen von BEC
- Effekte in BEC: Highlights

Das Original: BEC in Helium-4

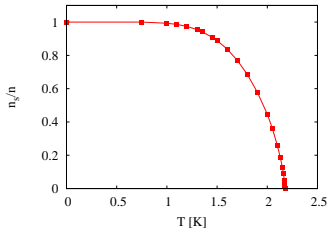
- ^4He = Bose Teilchen — wie viele andere Atome auch
- ^3He = Fermi Teilchen — wie viele andere Atome auch
- + He ist einziges Element, dass bei $T = 0$ nicht gefriert
(Edelgas \Rightarrow schwache Wechselwirkung; geringe Atommasse)
- aber flüssiges Helium ist kein verdünntes Gas \Rightarrow sehr nicht-ideal

Historie:

- 1907 H Kamerlingh Onnes verflüssigt ^4He
- 1938 P. L. Kapitsa: **Superfluidität** von ^4He unter 2.17K
- 1938 Bose Symmetrie verantwortlich für Superfluidität?
- 1972 D. D. Osheroff, D. M. Lee, and R. C. Richardson: Superfluidität von ^3He unter 1mK
- 2004 Kim & Chan: ist festes Helium auch superfluid??

Eigenschaften von Helium-4

- superfluidity for $T < T_\lambda = 2.17\text{K}$ (Lambda transition): zero viscosity (genauer: 2-fluid model)



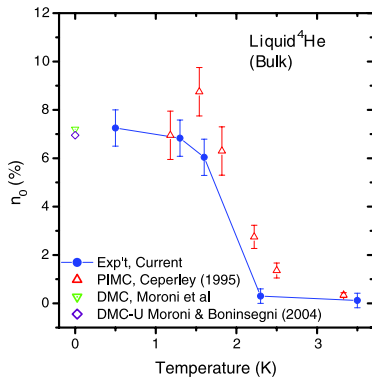
experimental superfluid fraction

- “creeping”: superfluides He fließt Wände hoch
- sehr hohe Wärmeleitfähigkeit \Rightarrow kocht nicht
- He bleibt flüssig fuer $T \rightarrow 0$ (ausser bei hohem Druck)
- Helium kann mit sehr hohem Reinheitsgrad erzeugt werden

BEC in Helium-4

weil flüssiges Helium dicht ist ($n = 2.210^{22} \text{cm}^{-3}$)

⇒ bei $T = 0$ nicht 100% kondensiert (wie ideales Gas), sondern nur ca. 7-8%:

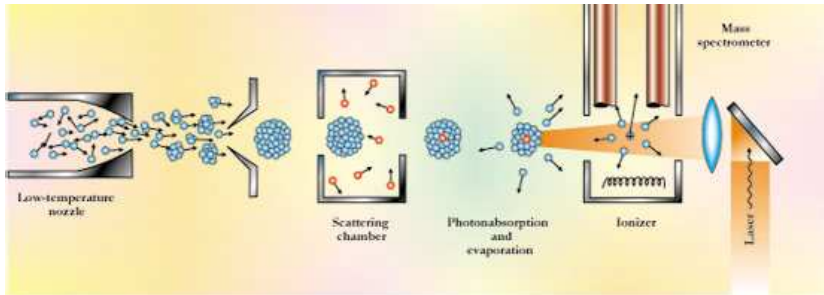


(Glyde, Eur. Phys. J. (2007))

BEC-Anteil von ^4He sehr schwer zu messen: inelastische Neutronen Streuung; final state effects (weil so dicht)

Heliumtröpfchen

kalte Wolke verdünnten Gases ↔ mikroskopisches Tröpfchen superfluiden Heliums



from: J. P. Toennies, A. F. Vilesov, and K. B. Whaley, *Physics Today* **54**, 31 (2001)

Heliumtröpfchen

Heliumtröpfchen haben praktische Anwendung: Spectroskopie von Atomen, Molekülen, cluster

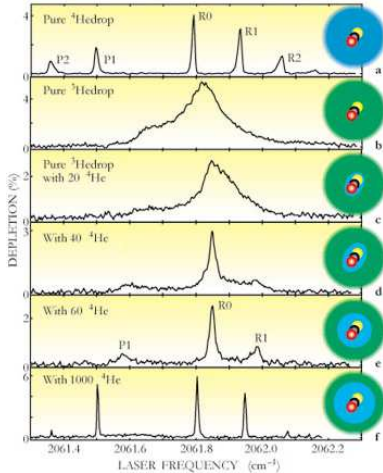
Vorteil von Matrixspektroskopie in He (statt Ar,...)

- kalt: $T \approx 0.4\text{K} \Rightarrow$ keine oder wenige Rotationszustände angeregt
- He bleibt flüssig + schwache Wechselwirkung \Rightarrow Spektrum nur leicht verändert
- bei $T \approx 0.4\text{K}$ ist ^4He superfluid \Rightarrow ditto

Wieviel Kondensat in Heliumtröpfchen?

\rightarrow J. Mayrhofer mit Quanten Monte Carlo Simulationen, Altix4700, JKU

Molekül (OCS) in superfluidem ^4He und normalfluidem ^3He



OCS molecule in pure ^4He and ^4He - ^3He mixtures:

- 1 sharp lines for (bosonic) ^4He
- 2 collapsed spectrum for (fermionic) ^3He

→ temperature: 0.4K/0.15K

from: J. P. Toennies, A. F. Vilesov, and K. B. Whaley,
 Physics Today **54**, 31 (2001)

Influence of Bose symmetry

- superfluidity \Rightarrow sharp features in molecule spectra
- Bose statistics \Rightarrow superfluidity
- **.NOT.** Bose statistics \Rightarrow **.NOT.** sharp features in molecule spectra?

Influence of Bose symmetry

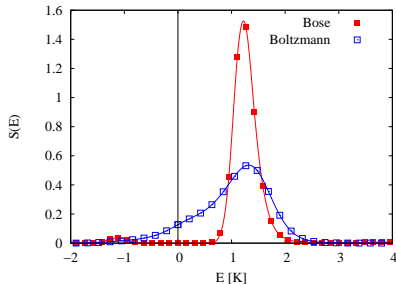
- superfluidity \Rightarrow sharp features in molecule spectra
- Bose statistics \Rightarrow superfluidity
- **.NOT.** Bose statistics \Rightarrow **.NOT.** sharp features in molecule spectra?

Pfad Integral Monte Carlo Simulation in Collaboration mit UC Berkeley, California:

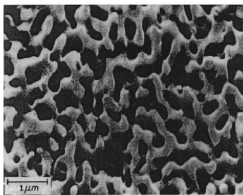
For $\text{LiH-}^4\text{He}_N$, $N = 20$, we compare the rotational spectrum for $J = 0 \rightarrow 1$ for **bosonic** (true) ^4He and (fictitious) **Boltzmann** ^4He :

- **Bose**: single(?) excitation
- **Boltzmann**: additional lower energy excitations

(REZ and K. B. Whaley, J. Phys. Chem. (2007))



Helium in nanoporösem Material



300 nm pore glass [L. D. Gelb, Langmuir **14** (1998)]

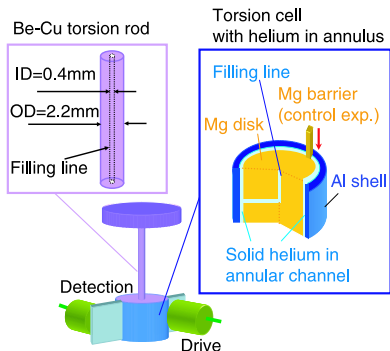
in homogenem, isotropen Helium: Phasenübergang zu BEC und zu Superfluidität bei selben T ("lambda transition")

gilt das auch für He in (nano)porösem Material? (Vycor, Gelsil)
fragmentiertes BEC

→ Kooperation mit Matthias Troyer, Nikolay Prokof'ev, Lode Pollet, ETH, Zürich

“Supersolid” Helium?

Kim and Chan, Penn State Univ.:



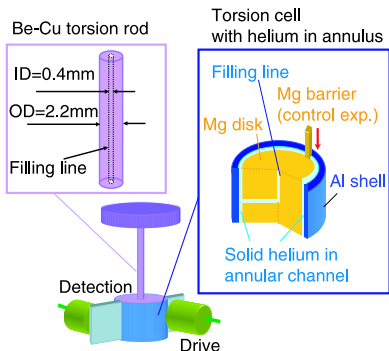
(E. Kim, M. H. W. Chan, Science **305** 1941 (2004))

Interpretation:

1-2% des gefrorenen Helium ist superfluid!!

“Supersolid” Helium?

Kim and Chan, Penn State Univ.:



(E. Kim, M. H. W. Chan, Science **305** 1941 (2004))

Interpretation:

1-2% des gefrorenen Helium ist superfluid!!

Aber:

Keine Bestätigung durch Theorie

mögliche Erklärungen (auch weiterer Experiment):

Defekte in Helium?

- Punktdefekte (Löcher)? **Nein**
- Lineare Defekte (Dislokationen)?
→ Kooperation mit Matthias Troyer, Nikolay Prokof'ev, Lode Pollet, ETH, Zürich
- Planare Defekte (Korngrenzen)?

Stark T -abhängige
Elastizitätskonstante?

Einschub: Berechnungsmethoden

Die Schrödinger Gleichung für N Teilchen

$$H\Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N; t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N; t)$$

- Diese partielle Differentialgleichung in $3N$ Koordinaten ist praktisch unlösbar mit “brute force”: z.b. $N = 10^6$ Atome in BEC
- nehme z.b. 100 Gitterpunkte für jede Koordinate $\Rightarrow 100^{3N} = 10^{6000000}$ Gitterpunkte
- Die Kunst der theoretischen Physik ist, Näherungsmethoden zu entwickeln, die den Kern des Problems erfassen (mindestens qualitative, moeglichst aber auch quantitativ).
Beispiel: “Gross-Pitaevskii Gl.” für BEC in verdünnten kalten Gasen
- Hirnschmalz!

Quanten Monte Carlo – Computational Physics

Motivation für Monte Carlo Simulationen:
Gibt's funktionierende brute force Methode?

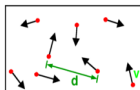


Grundidee:

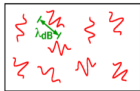
- Berechnung eines hochdimensional Integral, z.b.
 $\int d^3r_1 \dots d^3r_N |\Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N)|^2 \dots$,
nochmal Vergleich mit Diskretisierung+Trapezregel:
100 Gitterpunkte für jede Koordinate $\Rightarrow 100^{3N} = 10^{6000000}$ Gitterpunkte
- benutze Zufallskonfigurationen $(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N)$ statt Gitter! \rightarrow "Monte Carlo"
- zufällige $(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N)$ werden durch Markovketten erzeugt (Metropolis method, M²R²T)
- wähle $(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N)$ nicht ganz zufällig, sondern vorzugsweise dort wo $|\Psi(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N)|^2$ gross ist

Feynman's Idee: Pfadintegrale

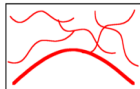
What is Bose-Einstein condensation (BEC)?



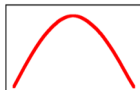
High Temperature T:
 thermal velocity v
 density d^{-3}
 "Billiard balls"



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

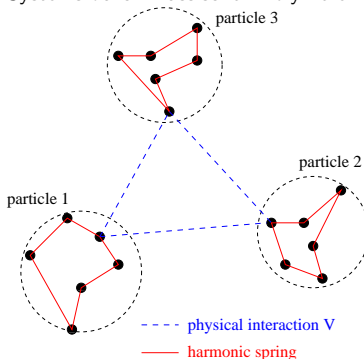


T = T_{crit}:
 Bose-Einstein Condensation
 $\lambda_{dB} = d$
 "Matter wave overlap"



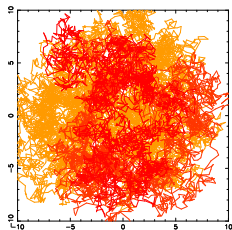
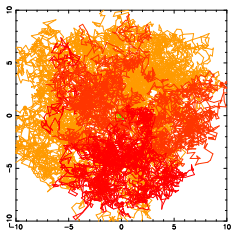
T=0:
 Pure Bose condensate
 "Giant matter wave"

exakte Darstellung eines quantenmechanischen Systems durch klassische "Polymere":

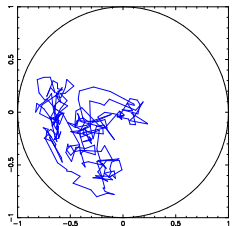
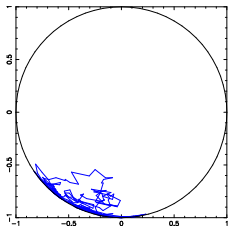


Bose Symmetrie: Polymere verbinden sich zu längeren Polymeren

Snapshot from Path Integral Monte Carlo simulation



OCS-He₆₄
 $\beta = 3.2\text{K}^{-1}$
 $P = 256$
longer chains
⇒ lighter color



orientation path
of molecule

1 Übersicht und Einführung

- Bosonen
- Historischer Überblick
- Theorie der BEC

2 Superfluides Helium-4 und Berechnungsmethoden

- Helium-4
- Computational Physics: Quanten Monte Carlo

3 Kalte Bose Gase

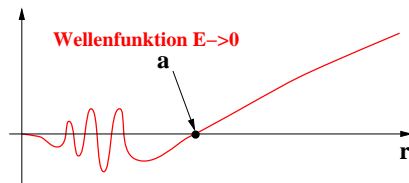
- Erzeugung von ultrakalten Gasen
- Messen von BEC
- Effekte in BEC: Highlights

Atomphysik

BEC Experimente sind angewandte Atomphysik

- magnetische und optische Fallen: Zeeman Effekt; hyperfine interaction
- Wechselwirkung bei niedriger Energie: Streulänge a

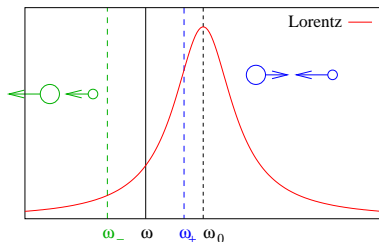
- **Wellenfunktion** als Funktion des Abstandes (Atom 1: $r = 0$; Atom 2: r)
- Wichtigkeit, dass Atom 2 näher als $r = a$ kommt, ist klein
⇒ Atom 1 und 2 sind effektive 2 harte Kugeln mit Radius $a/2$
- Ausnahme: Resonanz! $a \rightarrow \infty$



Cooling: Laser Cooling

“Laser” & “cooling”?

- Sei $\hbar\omega_0$ die Energie eines elektronischen Übergangs des Atoms (z.B. $s \rightarrow p$). Linienbreite!
- Sei ω Frequenz des Lasers, $\omega < \omega_0$
- Doppler Effekt:
 - (a) Atom bewegt sich gegen Laser $\Rightarrow \omega$ vergrößert
 - (b) Atom bewegt sich mit Laser $\Rightarrow \omega$ verkleinert
- im Fall (a) ist die Absorptionswahrscheinlichkeit erhöht, im Fall (b) verringert
- mehr Atome (Fall (a)) verlieren Energie, weil Photon Impuls uebergibt
- spontane Emission: isotrop verteilt

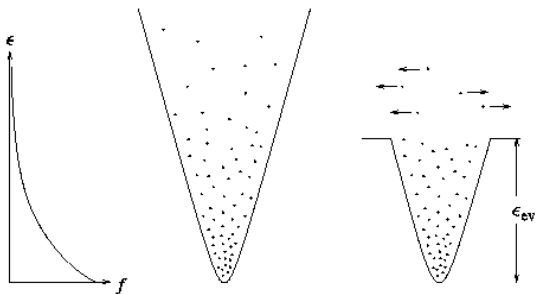


Realisierung durch 6 Laser: +x, -x, +y, -y, +z, -z

Cooling: Evaporative Cooling

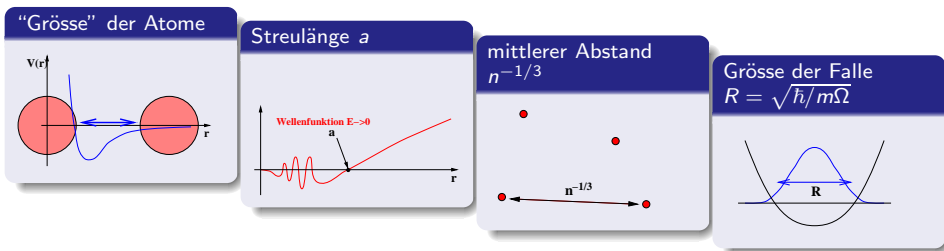
Kühlung durch Verdampfung:

- letzter Schritt in der Kühlsequenz
- entfernen der Atome mit hoher Energie



Längenskalen

BECs in magneto-optischen Fallen sind durch 4 Skalen gekennzeichnet:

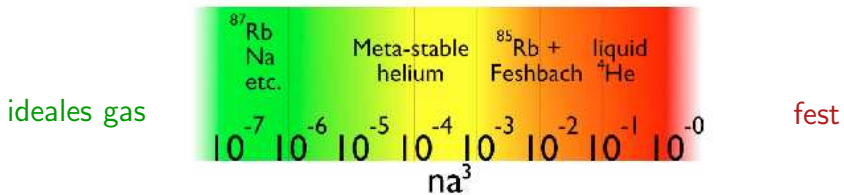


→ Herausforderung für Theoretiker!

bei kleiner Dichte ($na^3 \ll 1$) kann man das N -Teilchenproblem durch eine *nicht-lineare* 1-Teilchen Schrödinger (“Gross-Pitaevskii Gl.”) nähern

Längenskalen

grosser Bereich an effektiven Dichten na^3 :



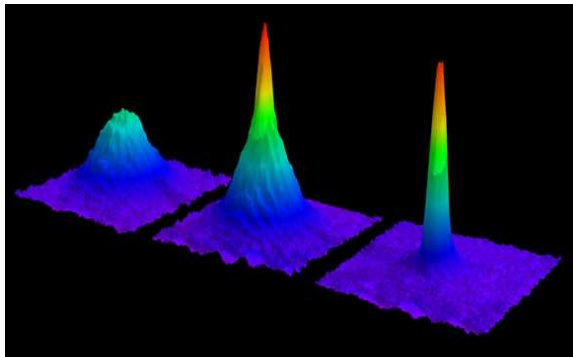
(J. L. Dubois, H. R. Glyde, PRA **68**, 033602 (2003))

Wie erkennt man BEC?

Movie
(Ketterle group, MIT)

Wie erkennt man BEC?

Impulsverteilung bei $T > T_c$, $T < T_c$, $T \ll T_c$:

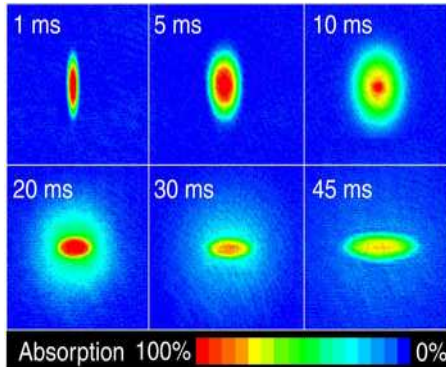


(Ketterle group, MIT)

Wie entstehen solche Aufnahmen?...

Imaging des BEC Dichteprofiles

Abschalten der Magnetfalle \rightarrow Expansion des Gases \rightarrow Laserabsorption: integrierte Dichte entlang Laserrichtung:

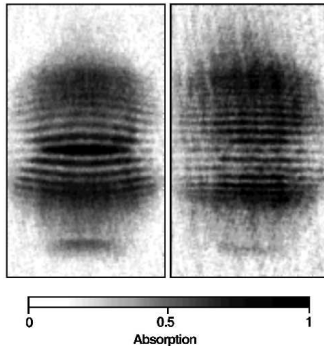


(Ketterle group, MIT)

Effekt I: Interferenz

Laser: kohärentes Licht \Rightarrow Interferenz Effekte

BEC: makroskopischer Quantenzustand = kohärent \Rightarrow Interferenz Effekte!



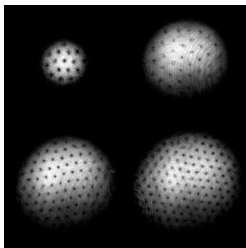
(M. R. Andrews et al., Science **275**, 637 (1997))

Effekt II: Vortices – quantisierte Wirbel

klassische Hydrodynamik: jeder Wirbel ist erlaubt; insbes. Rotation als ganzes

Quantenmechanik: Wirbel sind quantisiert:

$$\oint \mathbf{v} d\mathbf{l} = 2\pi \frac{\hbar}{m} j, j \text{ ganzzahlig}$$



(J. R. Abo-Shaeer et al., Science **292**, 476 (2001))

→ Berechnung von BEC in rotierender trap in Seminar

und vieles andere mehr:

- Atom Laser
- Feshbach Resonanzen in BEC: Streulänge $a \rightarrow \infty$
- BEC in optischen Gittern (durch Laser-Interferenzmuster) – Supersolidität?
- BEC in 2D und 1D
- Dipolar BEC
- Kalte Fermi Gase: BEC \longleftrightarrow BCS (Supraleitung)
- Kalte Fermi Gase: Superfluidität analog zur Hochtemperatur-Supraleitung
- ...

Zusammenfassung

- Geschichte
- Grund(lage) für BEC im homogenen idealen Gas
- Helium: starke Wechselwirkung
- Experiment — Computational Physics: Quanten Monte Carlo — Theorie
- Experimentell: Cooling von ultrakalten Gasen
- Auswahl von interessanten Effekten in BEC
- BEC in Schule: Lehramts-Diplomarbeit von Joachim Seidl (2006, Betr. Helga Böhm)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!