

Bose - Einsteinova kondenzácia v ideálnom plyne

Kúkoľová Anna

12. jún 2013

Osnova

1. Rozdelenie elementárnych častíc
2. Základné vlastnosti kondenzátu
3. Chladienie BEC
4. Uskutočnenie prvého BEC

1. ROZDELENIE ELEMENTÁRNYCH ČASTÍC

- princíp identickosti či nerozlíšiteľnosti kvantových častíc rovnakého druhu
- z hľadiska kvantovo - mechanického popisu veľkého počtu identických kvantových objektov rozlišujeme:
 - Systémy fermionov
 - Systémy bosonov

1. ROZDELENIE ELEMENTÁRNYCH ČASTÍC

Štandardný model

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	? GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
name →	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	g gluon	
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson	

Gauge bosons

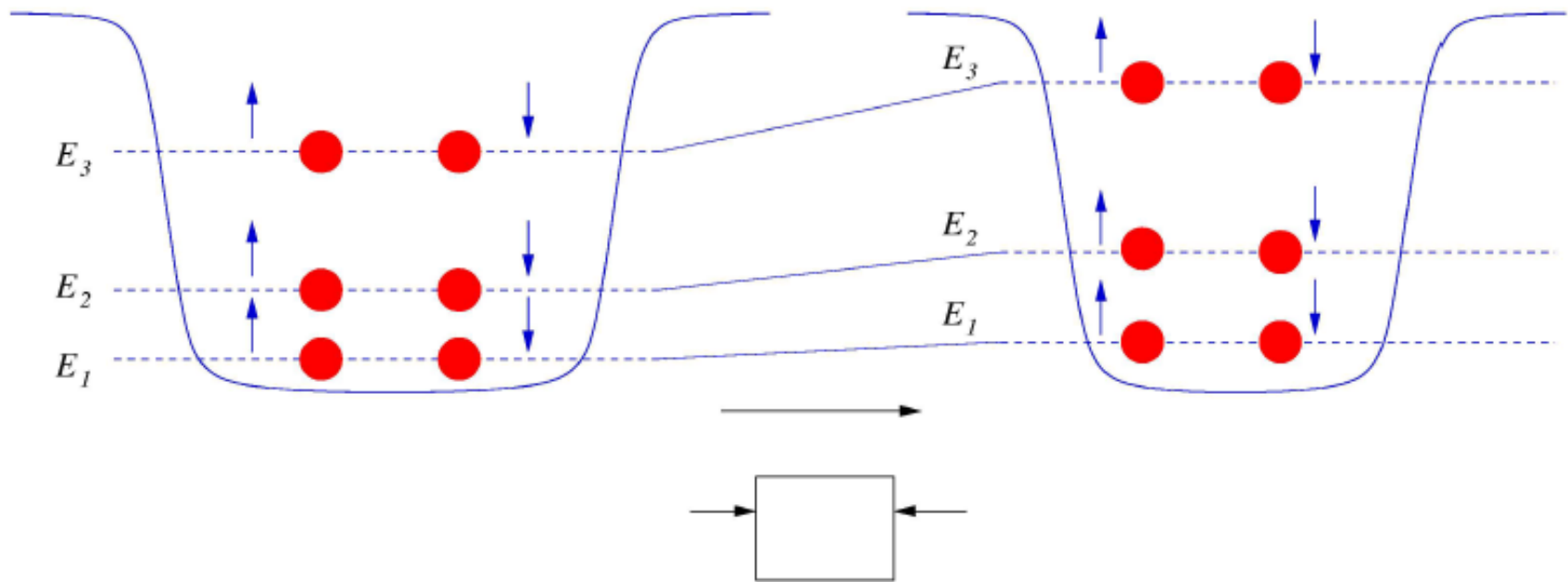
1. ROZDELENIE ELEMENTÁRNYCH ČASTÍC

Fermiony Bosony

- Enrico Fermi
- úplne antisymetrická vlnová funkcia
- poločíselný spin
- častice tvoriace látku
- riadia sa Pauliho vylučovacím princípom
- Fermi-Diracovo rozdelenie

1. ROZDELENIE ELEMENTÁRNYCH ČASTÍC

Fermiony



1. ROZDELENIE ELEMENTÁRNYCH ČASTÍC

Fermiony

- Enrico Fermi
- úplne antisymetrická vlnová funkcia
- poločíselný spin
- častice tvoriace látku
- riadia sa Pauliho vylučovacím princípom
- Fermi-Diracovo rozdelenie

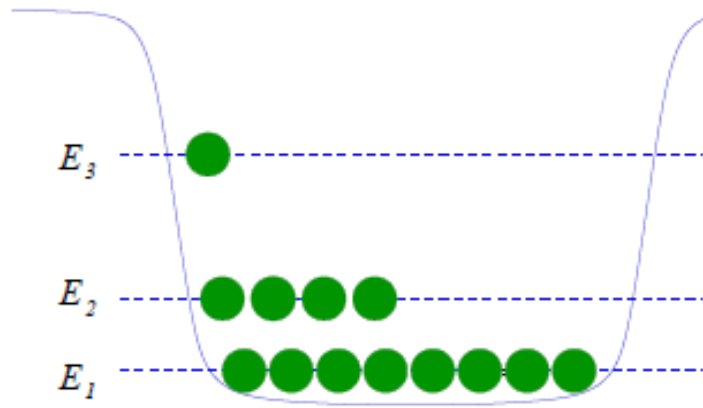
Bosony

- Satyendra Nath Bose
- symetrická vlnová funkcia
- celočíselný spin
- častice poľa – sprostredkujú interakciu
- neriadia sa Pauliho vylučovacím princípom
- Bose-Einsteinovo rozdelenie

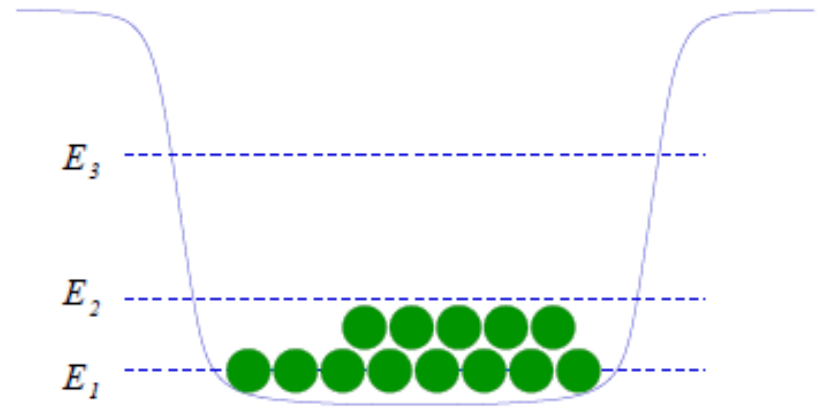
1. ROZDELENIE ELEMENTÁRNYCH ČASTÍC

Bosony

$T > 0$



$T = 0$



2. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI

- 1924 - teoretické počiatky - S. Bose - nová interpretácia vyžarovacieho zákona
 - Planck: žiarenie je súbor harmonických oscilátorov v tepelnej rovnováhe
 - Bose: žiarenie ako plyn nerozlíšiteľných nehmotných častíc
- za nízkych teplôt zvláštne vlastnosti:
 - tendencia zhlukovať sa = kondenzovať v najnižšom energetickom stave
 - Stredný počet bosonov v základnom stave
 - Hustota stavov
 - Kritická teplota
 - Tepelná kapacita

2. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI

Kritérium pre BE kondenzáciu

$$T < T_c$$

entropia S systému dosiahne minimálne hodnoty

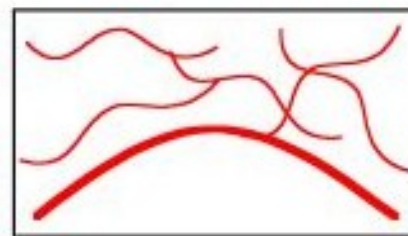
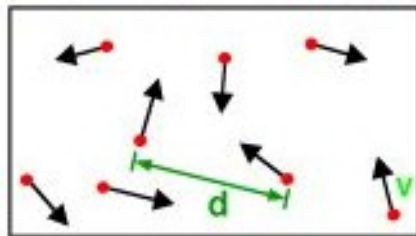
„zmrazené“ atómy = kvantový objekt makroskopických rozmerov = spoločný koherentný kvantový stav so spoločnou energiou

Vysoká teplota T

Rýchlosť častíc: v

Hustota: d^{-3}

„biliardové gule“



$T = T_c$

Bose-Einsteinova kondenzácia

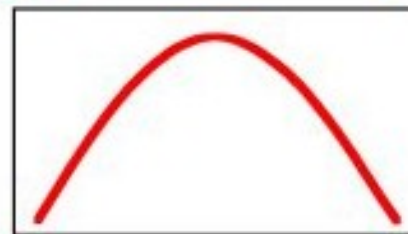
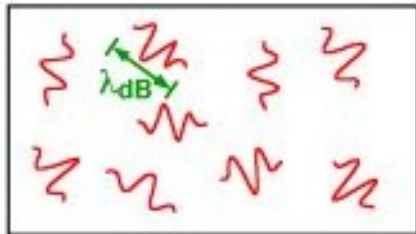
$$\lambda_{dB} \approx d$$

Nízka teplota T

De Broglieho vlnová

dĺžka $\lambda_{dB} = h/mv \approx 1/\sqrt{T}$

„vlnové kĺbko“



$T = 0$

Čistý BE kondenzát
kolektívne chovanie

2. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI

Stredný počet bosonov

- $E_1 = 0 \Rightarrow$ chemický potenciál $\mu(g, T) < 0$ z podmienky $E_n > 0$

- $\mu \ll 0$ & vysoké teploty T :

BE rozdelenie \rightarrow MB rozdelenie

$$f(E_n) = \frac{1}{e^{\frac{E_n - \mu}{k_B T}} - 1} \approx e^{\frac{\mu}{k_B T}} e^{-\frac{E_n}{k_B T}}$$

- $T \searrow$ & $\mu \rightarrow 0 \Rightarrow$ zvýšenie stredného počtu častíc v najnižších stavoch

- $T \leq T_c: \mu = 0$

- počet stavov $G(E)$:
$$G(E) = V \frac{4\pi}{3} \frac{(2mE)^{3/2}}{(2\pi\hbar)^3}$$

- počet $G(E, E+dE) = g(E)$: častica s hmotnosťou m pohybujúca sa voľne v objeme V (potenciálová jama):

$$g(E) = \frac{dG(E)}{dE} = \frac{Vm^{3/2}}{\sqrt{2}\pi^2\hbar^3} E^{1/2}$$

- množstvo excitovaných stavov je limitované
- počet častíc v základnom stave je neobmedzený

2. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI

Kritická teplota

- najvyššia teplota, do ktorej je ešte základný stav obsadený makroskopickým množstvom častíc

- N počet častíc, C_α konštanta, definícia T_c :
$$k_B T_c = \left(\frac{N}{C_\alpha \Gamma(\alpha) \zeta(\alpha)} \right)^{1/\alpha}$$

- pre $T < T_c$ integrujme stredný počet častíc v stave $g(E)$, integrál vyjde menší než je celkový počet častíc v systéme:

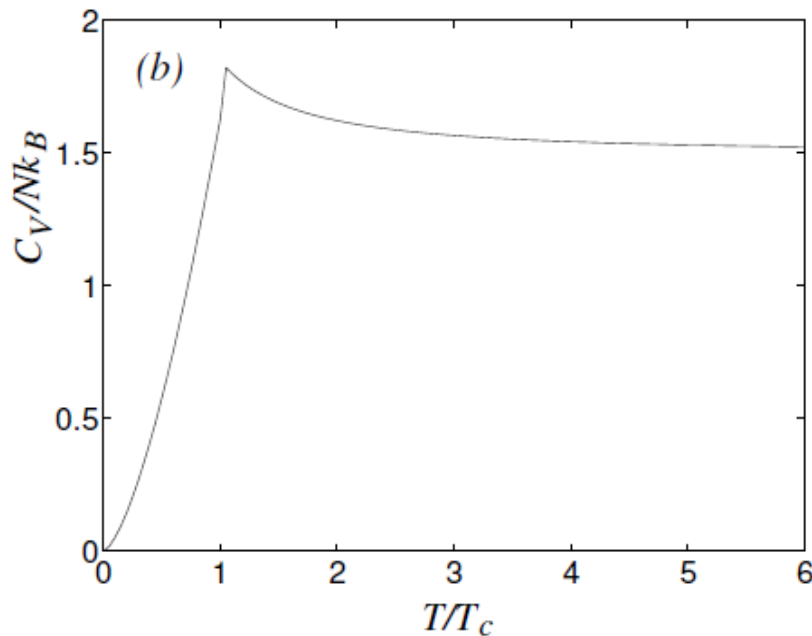
$$\int_0^\infty \frac{1}{e^{\frac{E}{k_B T}} - 1} g(E) dE < N$$

- **zvyšné častice sú v základnom stave systému** (integrál -pre spojité rozloženie, tj. pre excitované stavy s počtom N_{ex})

- počet kondenzovaných častíc:
$$N_0(T) = N - N_{ex} = N \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^\alpha \right]$$

2. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI

Tepelná kapacita



Častica v pravouhlej potenciálovej jame

V súlade s 3. termodynamickým zákonom:

→ $T < T_c$: C_V s teplotou rastie

→ $T > T_c$: C_V klesá k asymptotickej hodnote

V blízkosti T_c je priebeh $C_V(T/T_c)$ neobvyklý - priebeh sa lomí.

Podobnosť s kvapalným héliom - prechod z normálnej do supratekutej fáze (λ bod).

Tepelná kapacita:

$$\bar{E} \approx \alpha N k_B T \left[1 - \frac{\zeta(\alpha)}{2^{\alpha+1}} \left(\frac{T_c}{T} \right)^\alpha \right]$$

3. METÓDY CHLADENIA

- Laserové chladenie
- Chladenie odparovaním
- Adiabatická demagnetizácia

3. METÓDY CHLADENIA

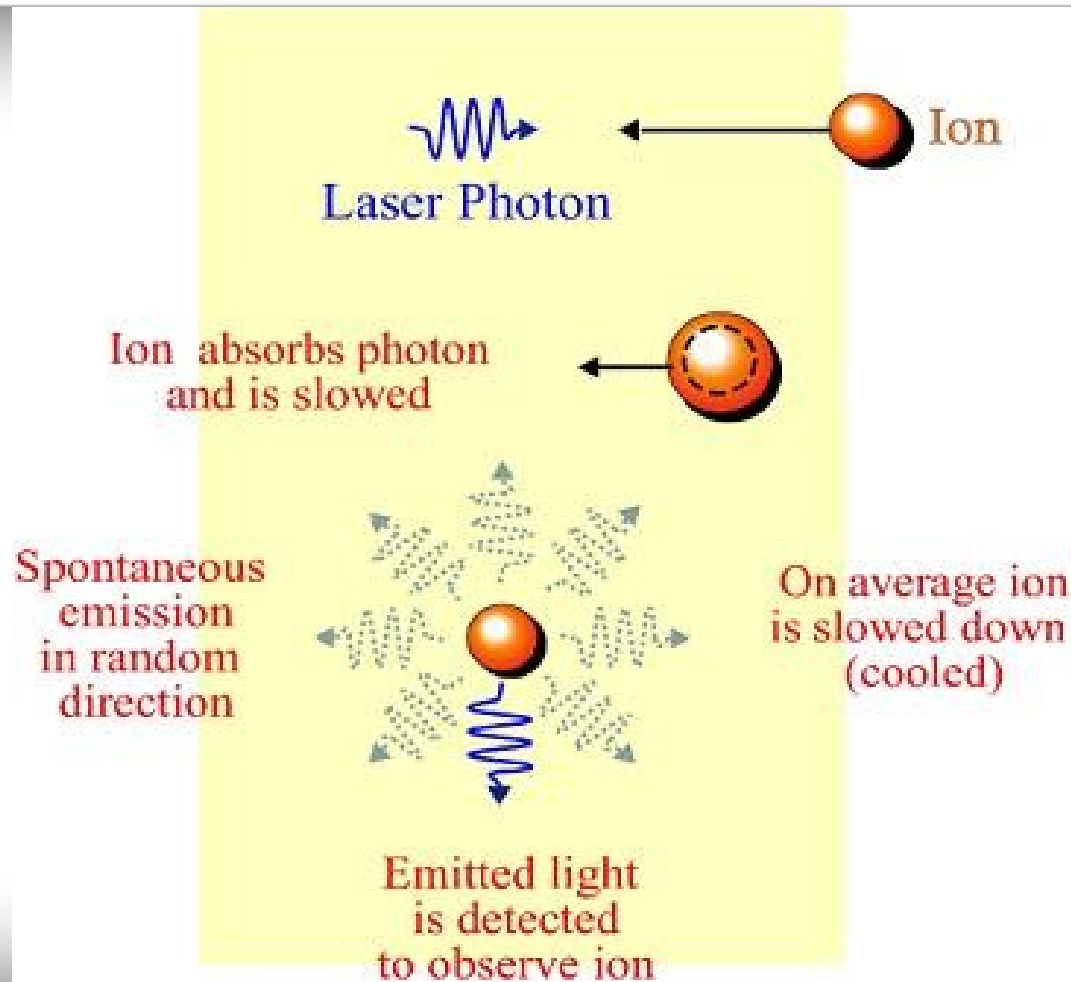
Laserové chladenie

1975 - prvá zmienka chladenia
plynov voľných
atómov pomocou laserov

Princíp:

Atóm, absorbujúci fotón, prevezme aj jeho
impuls. Následne dochádza k spontánnej
emisii => znižovanie rýchlosti atómov.

Dopplerov posun — atómy sú
ochladzované ak sa pohybujú proti
laserovému zväzku.



3. METÓDY CHLADENIA

Nobelova cena 1997

„rozvoj metód chladenia a záchyt atómov za pomoci laserového svetla“



Steven Chu

1/3 of the prize

USA



Claude Cohen-Tannoudji

1/3 of the prize

France



William D. Phillips

1/3 of the prize

USA

3. METÓDY CHLADENIA

Chladienie odparovaním

→ teploty rádovo v nanokelvinoch

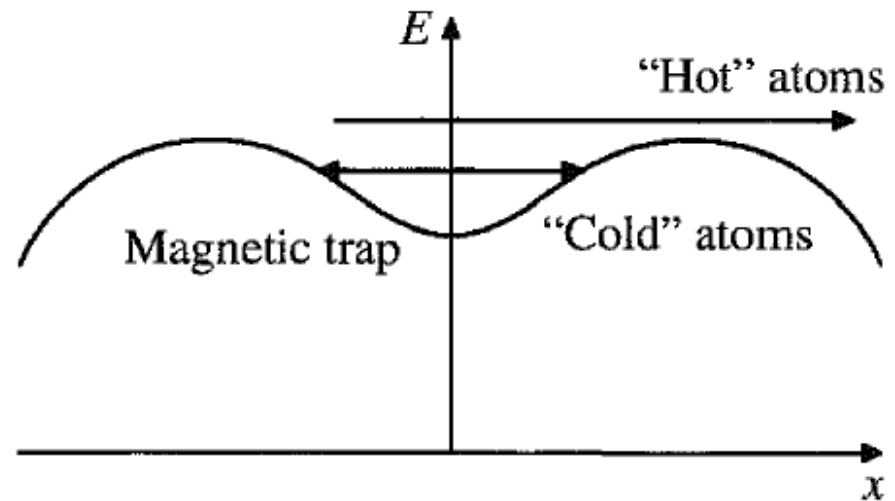
→ zmenami magnetického poľa sa reguluje

výška potenciálovej jamy:

- studené atómy sú uväznené v pasci
- atómy s vyššou energiou pascu opúšťajú
- atómy s najvyššou energiou tvoria paru

→ pokusy so spinovo polarizovaným atomárnym vodíkom

→ 1995 – metóda využitá pre alkalické atómy v pasci (prvá realizácia BEC)



3. METÓDY CHLADENIA

Adiabatická demagnetizácia

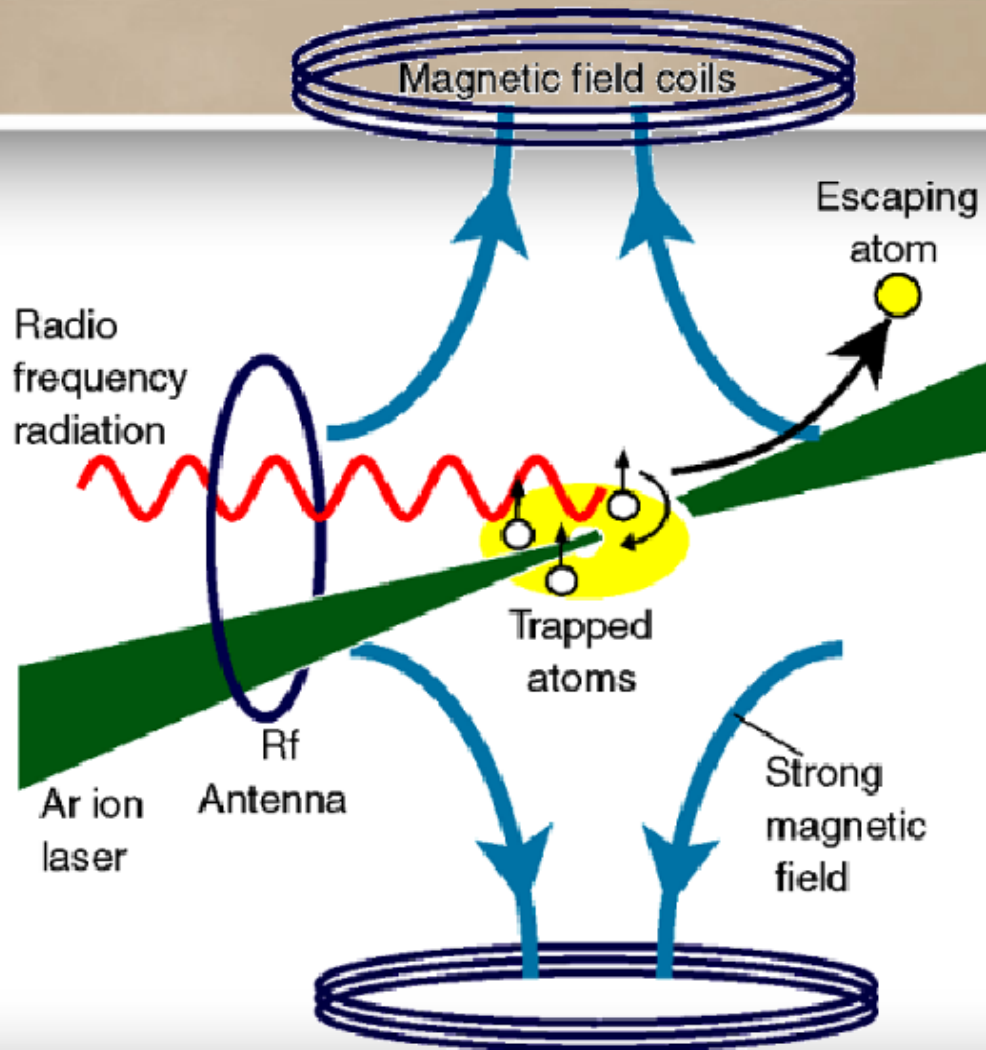
- sieť magnetických polí odstraňuje teplejšie atómy
- prudké zníženie tlaku => redukcia počtu atómov
- priebeh:
 1. izotermická magnetizácia (energia s magnetickým poľom klesá)
 2. následne adiabatická demagnetizácia (teplota a vnútorná energia klesajú)
- Ketterle 1995 (sodík) - 3 nK
- najnižšia dosiahnutá teplota: rádovo v pikoKelvinoch

4. USKUTOČNENIE PRVÉHO BEC

- BEC v plynoch alkalických atómov - jeden valenčný elektrón
 - nepárny jadrový spin
- vhodné stavy bosonového charakteru
- 1995 - prvý kondenzát (Cornell a Wieman, Colorado) – Rubídium ($T = 170$ nK)
 - Ketterle - Sodík
- pre veľké časti atómov pozorovali kolaps do najnižších kvantových stavov
 - kvantové efekty na makroskopickej úrovni
- os pasce - magnetické pole nulové → strata častíc (spiny častíc sa spontánne preklápali)
- Ketterle (MIT) – využitie silne repulzívneho laserového zväzku
- Wieman, Cornell (Boulder) – otáčajú sa magnetické pole

4. USKUTOČNENIE PRVÉHO BEC

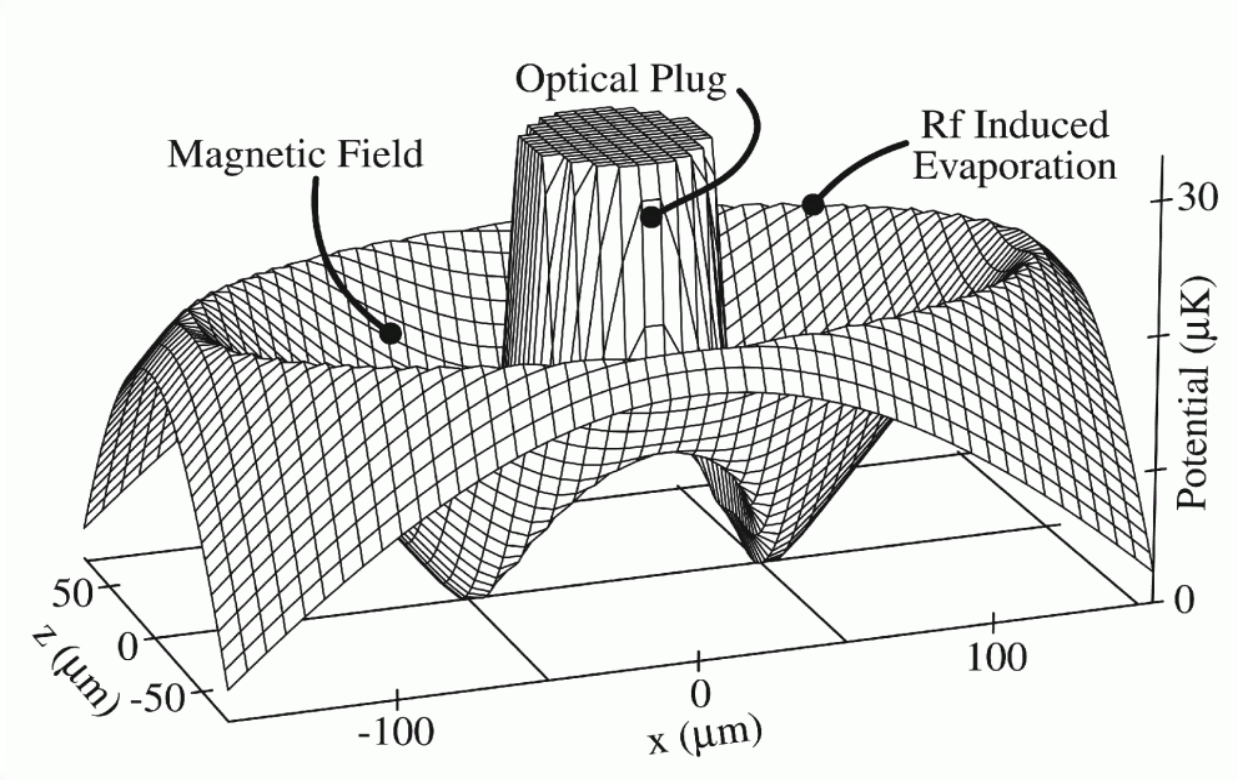
Magneto - optická pasca



4. USKUTOČNENIE PRVÉHO BEC

Magneto-optická pasca

W. Ketterle



4. USKUTOČNENIE PRVÉHO BEC

NOBELOVA CENA 2001

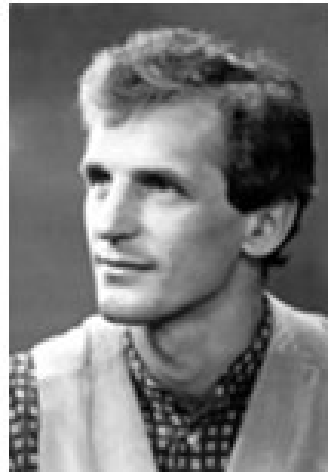
„za prínos k BEC a za fundamentálne štúdium vlastností kondenzátu“



Eric A. Cornell

1/3 of the prize

USA



**Wolfgang
Ketterle**

1/3 of the prize

Federal Republic of
Germany



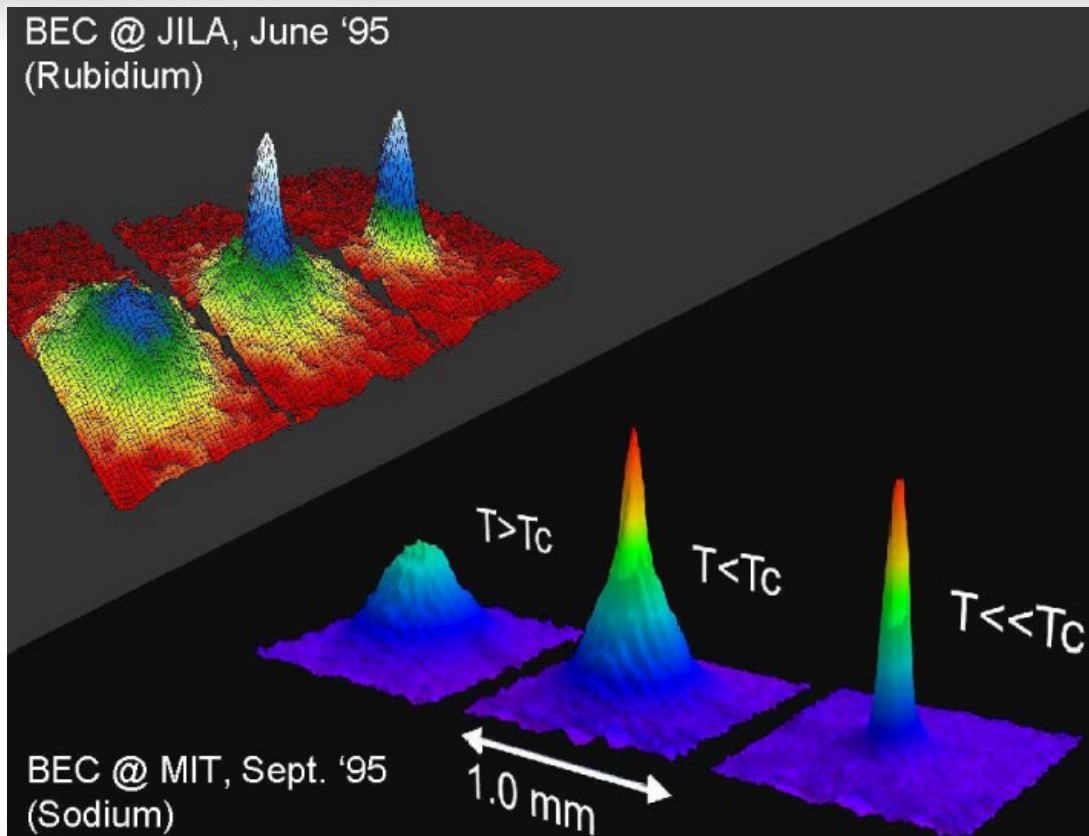
Carl E. Wieman

1/3 of the prize

USA

4. USKUTOČNENIE PRVÉHO BEC

Experimentálne zmeraný dvojrozmerný profil rýchlosti častíc pre BE kondenzát



Zobrazenie pomocou tieňa
vytvoreného rezonančným svetlom:

BEC v rubídiu (Cornell, Wieman)
BEC v sodíku (Ketterle)

Vľavo: rozloženie atómov v oblaku
pred kondenzáciou
Stred: na začiatku kondenzácie
Vpravo: úplná kondenzácia

výška peaku \propto počet atómov

snímky zachytené 6 ms po vypnutí sil

Ďalšie teoretické predpovede

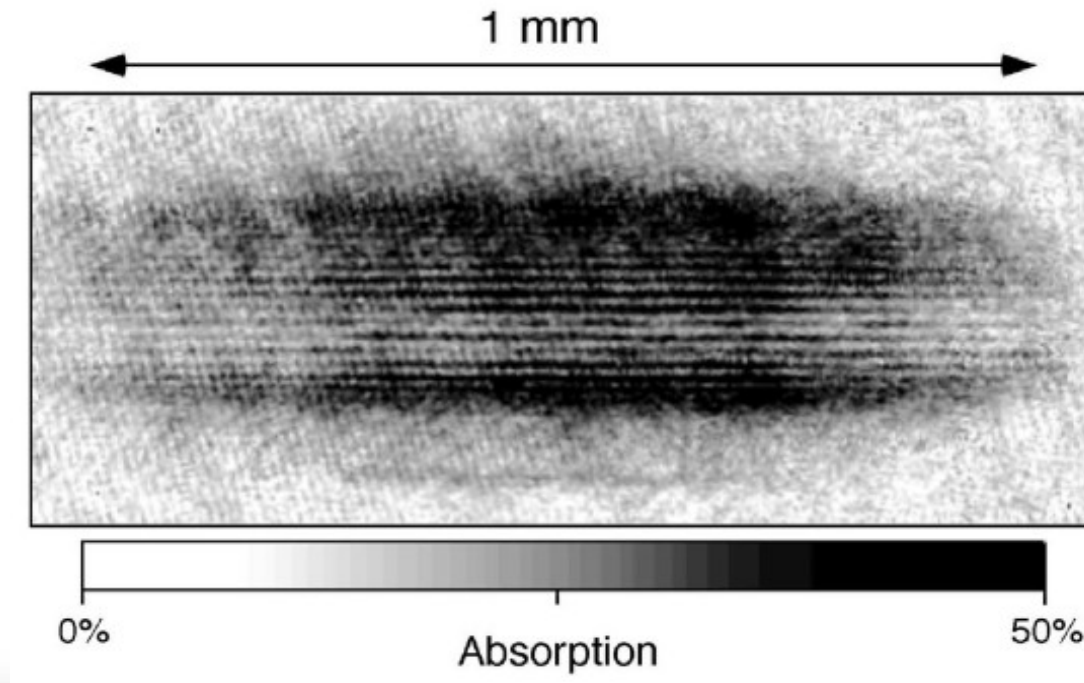
- Charakteristické vlastnosti BEC sú spôsobené interakciami medzi atómami
- Alkalické plyny (atómy slabo vzájomne odpudzované) - experimentálne výsledky v súlade s teoretickými predpoveďami
- Vďaka interakciám dochádza k fyzikálnym prejavom systému BE kondenzátu:
 - pozorovaná **interferencia** pri prekrytí dvoch kondenzátov
 - roztočením kondenzátu se naplno prejaví jeho makroskopický kvantový charakter — **kvantované víry** ako logický dôsledok kvantovacích podmienok

4. USKUTOČNENIE PRVÉHO BEC

Interferencia dvoch BE kondenzátov

Dôkaz koherencie

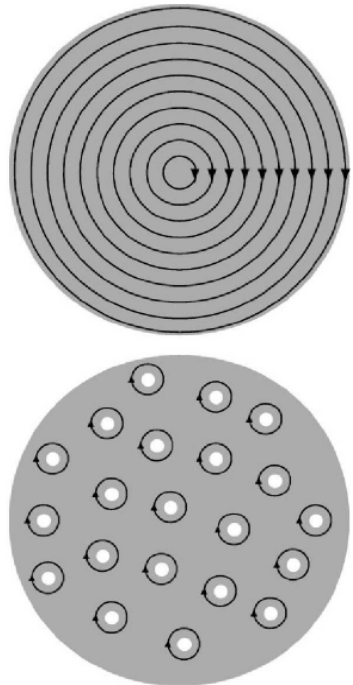
Dva kondenzáty boli vytvorené ochladením atómov sodíka v potenciálovej dvoj-jame. Po uvoľnení kondenzátu z pasce, sa kondenzát rozptýlil a začal prekrývať. Práve v oblastiach, kde došlo k prekrytiu, bol pozorovaný interferenčný obrazec.



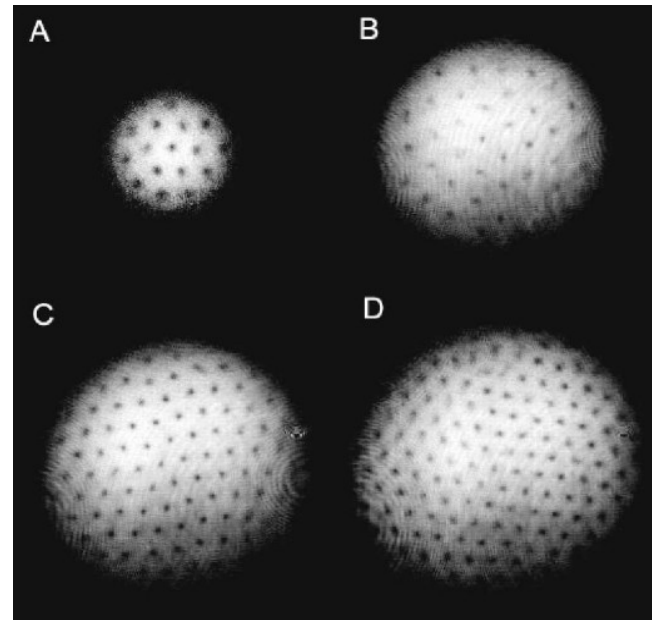
4. USKUTOČNENIE PRVÉHO BEC

Rotácia BE kondenzátu

Normálna kvapalina sa správa ako tuhé teleso. Supratekutina vytvára zoskupenie kvantovaných vírov.



Tok poľa pri rotácii normálnej kvapaliny a suprakvapaliny.



Vznik vírových zväzkov - usporiadanie do trojuholníkových štruktúr.

Ďakujem za pozornosť