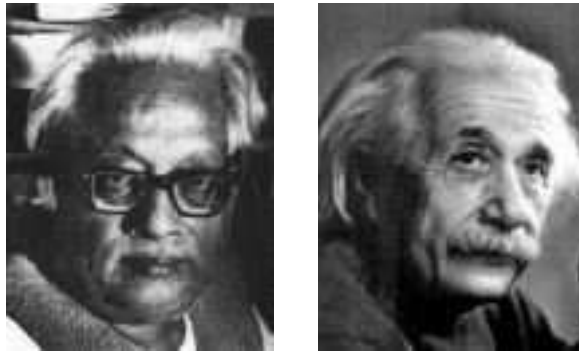


# *Kondensat Bosego Einsteina*



Michał Poradziński

Warszawa, 19 grudnia 2005

# *Plan*

- Statystyka Bosego Eisteina  
(wzór, warunki kondensacji)
- Doświadczalna realizacja kondensatu
- Aktualne badania i ewentualne zastosowania
- Podsumowanie

# Statystyka Bosego

Średnia liczba obsadzeń stanu jednocząstkowego:

$$\langle n_{\{k\}} \rangle = \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon_{\{k\}} - \mu}{k_B T}} - 1} = \frac{ze^{-\beta\varepsilon_{\{k\}}}}{1 - ze^{-\beta\varepsilon_{\{k\}}}}$$

$$\langle n_{\{k\}} \rangle \geq 0 \Rightarrow \mu \leq 0, z - \text{aktywność}, z = e^{\beta\mu}$$

$$\text{Liczba cząstek: } N = \sum_k \frac{ze^{-\beta\varepsilon_{\{k\}}}}{1 - ze^{-\beta\varepsilon_{\{k\}}}}$$

Weźmy  $V, N \rightarrow \infty$

$$\frac{1}{v} = \frac{4\pi}{h^3} \int_0^\infty dp p^2 \frac{1}{z^{-1} e^{\beta p^2/2m} - 1} + \lim_{\infty} \frac{1}{V} \frac{z}{1-z}$$

Musieliśmy wyodrębnić stan  $p = 0$

Obsadzenie stanu podstawowego

$$\lambda^3 \frac{\langle n_0 \rangle}{V} = \frac{\lambda^3}{v} - g_{\frac{3}{2}}(z)$$

gdzie  $\lambda = \sqrt{2\pi\hbar^2/mkT}$ ,  $v = V/N$

$$g_{\frac{3}{2}}(z) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{z^l}{l^{\frac{3}{2}}}, \text{ funkcja rosn\u0105ca, ograniczona, } z \in [0, 1],$$

$$g_{\frac{3}{2}}(1) = \zeta\left(\frac{3}{2}\right) = 2,612\dots$$

Jeśli:

$$\frac{\lambda^3}{v} > g_{\frac{3}{2}}(1)$$

to  $\frac{\langle n_0 \rangle}{V} > 0$  czyli skończony ułamek liczby cząstek zajmuje poziom o  $\mathbf{p} = 0$ , co jest znane jako **kondensacja Bosego Einsteina**.

Średnia liczba cząstek obsadzających stan podstawowy

$$\langle n_0 \rangle = N \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^{\frac{3}{2}} \right)$$

$$T_c = \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B} \left( \frac{1}{vg_{\frac{3}{2}}(1)} \right)^{\frac{2}{3}} - \text{temp. krytyczna}$$

Czy kondensacja zachodzi w 2D?

$$\frac{1}{v} = \frac{2\pi}{h^2} \int_0^\infty dp p \frac{1}{z^{-1} e^{\beta p^2/2m} - 1} + \lim_{\infty} \frac{1}{V} \frac{z}{1-z}$$

Podstawiam  $x = \frac{\beta p^2}{2m}$

$$\frac{1}{v} = \frac{2\pi}{h^2} \frac{m}{\beta} \int_0^\infty dx \frac{1}{z^{-1} e^x - 1} + \lim_{\infty} \frac{1}{V} \frac{z}{1-z}$$

Całka wybucha dla  $z = 1$ , ale czy  $\langle n_0 \rangle \sim N$  ?

$$\text{Weźmy: } n_0 = \langle n_0 \rangle / V = \frac{z}{1-z} \Rightarrow z = \frac{1}{1 + \frac{1}{n_0 V}}$$

$$n = \frac{1}{v} = \frac{2\pi}{h^2} \frac{m}{\beta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} z^n + \lim_{\infty} \frac{1}{V} \frac{z}{1-z} > \text{const} \frac{1}{1 + \frac{1}{n_0 V}} + n_0$$

$$n_0 < 1/2(-C + n - 1/V + \sqrt{(C - n + 1/V)^2 + 4n/V}) \xrightarrow{v \rightarrow 0} 0$$

Nie następuje kondensacja

# Doświadczalna realizacja

1995 - Eric Cornell, Carl Wieman (University of Colorado w Boulder), Wolfgang Ketterle (MIT)

2001 - Nagroda Nobla





Eric Cornell, Carl Wieman, Wolfgang Ketterle

Pierwsze doświadczenia -  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^7\text{Li}$ .

Ich struktura poziomów energetycznych jest niezwykle użyteczna z punktu widzenia laserowych technik chłodzenia.

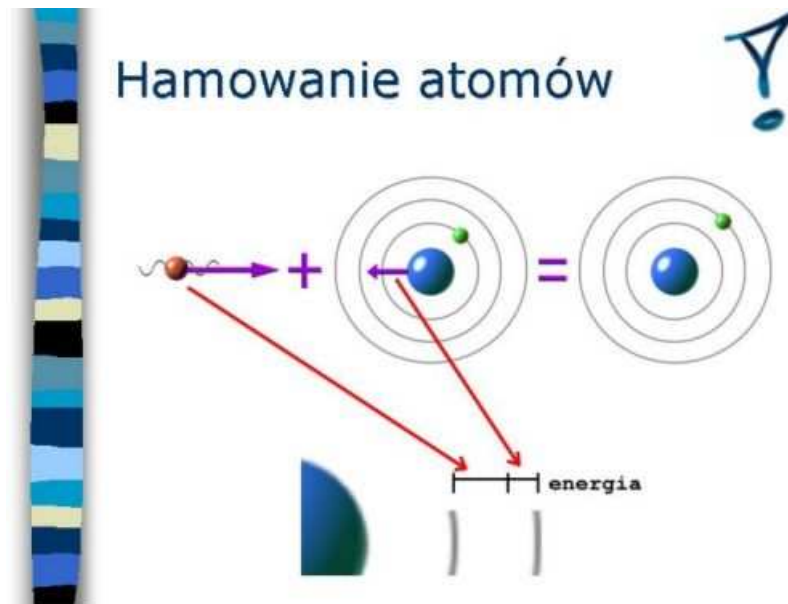
Trzeba zejść poniżej  $T_c$ .

Gęstość atomów mała, aby zmniejszyć prawdopodobieństwo trójciałowych zderzeń, prowadzących do powstawania molekuł, na których mógłby rozpocząć się proces skraplania gazu.

Kondensat jest zatem silnie przechłodzonym gazem.

## Etapy chłodzenia

- Chłodzenia dopplerowskie.  
Trzy pary przeciwbieżnych wiązek laserowych - melasa optyczna.



- Pułapka magnetooptryczna (MOT)  
Niejednorodne pole magnetyczne + wiązki laserowe

$\langle v \rangle$  kilkaset m/s  $\searrow$  kilkanaście cm/s.

$T \approx 500 \text{ K} \searrow 40 \mu\text{K}$

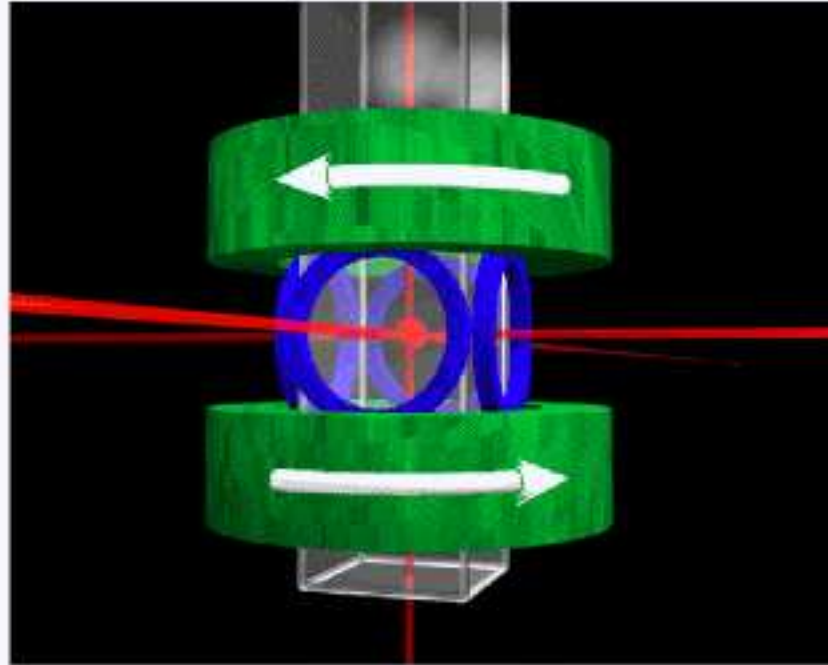
Za mało

Musimy wyeliminować emisję spontaniczną

- Polaryzacja atomów  
Tylko te o spinach równoległych do pola magnetycznego są przez nie pułapkowane .
- Pułapkowanie atomów w polu magnetycznym.
- Dalsze chłodzenie poprzez wyciąganie z układu atomów najbardziej energetycznych  $T \searrow$  kilka nK

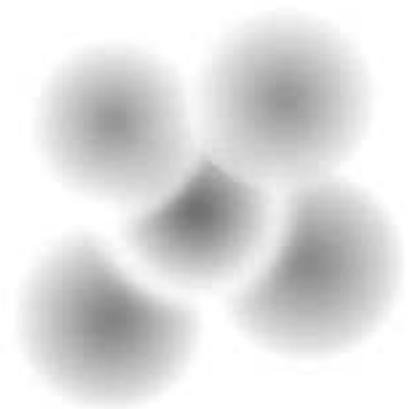
## BEC Apparatus

↑ vacuum pump  
and Rb source

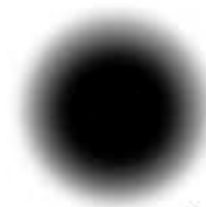


$\lambda \sim$  średnia odległość między atomami.

Wszystkie atomy opisywane tą samą funkcją falową .

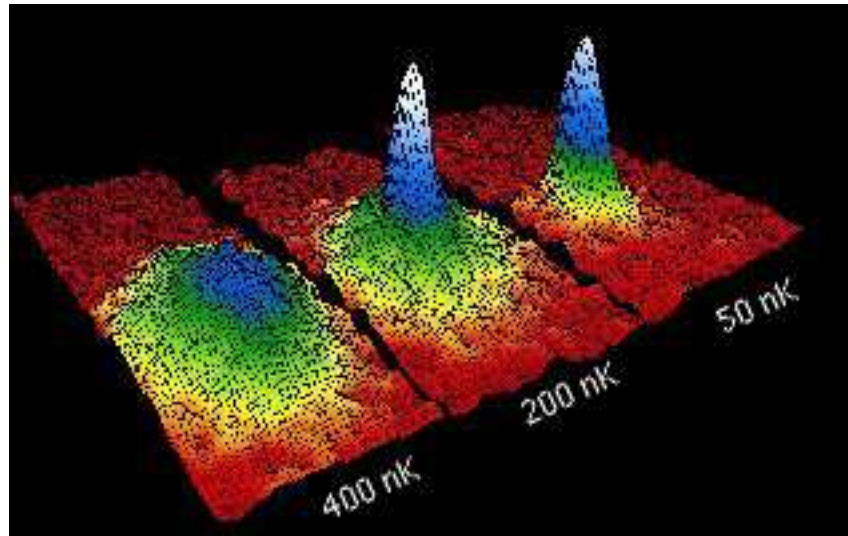


**Some very cold atoms**



**Some atoms in a  
BEC condensate**

Kondensacja - ostre maksimum w rozkładzie prędkości na tle symetrycznego rozkładu atomów termicznych. Kondensacja następuje w przestrzeni pędów.





# Aktualne badania i ewentualne zastosowania

- Pułapka na chipie

Pułapkowanie magnetyczne oparte o cewki - trudne.

Mikrochipy zawierają sieć tysięcy mikroskopijnych przewodów, które wytwarzają pole magnetyczne.

100  $\mu m$  od powierzchni chipa powstaje pułapka.

Pobiera mniej niż 1 W energii i znacznie silniejsza od konwencjonalnych cewek.

Pierwszy eksperyment - MIT 1995

# Problemy

- Chip jest źródłem promieniowania IR (jest ciepły)

Atomy absorbują określone długości fal

- Załadowanie atomów nad powierzchnię chipa

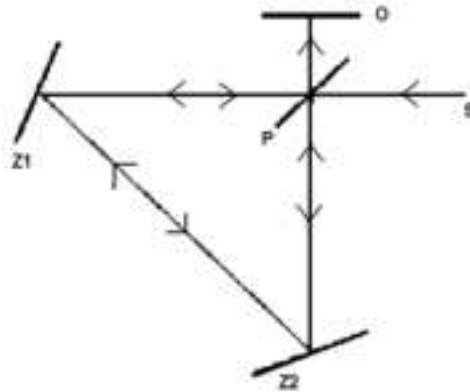
Chip pokryto warstwą, która odbija dwie wiązki MOT

- Gdy atomy znajdują się niżej niż  $1,5 \mu m$  nad chipem to oddziałują z powierzchnią - efekt Casimira-Powdera → ucieczka atomów. Potwierdzono w 2003 przez V.Vuletica z MIT.

- W takiej skali metal wygląda jak stos nieuporządkowanych magnesów wykonujących chaotyczne ruchy. Ciepłota magnetyzacja wywołuje drgania i ruchy pułapki - "wymywanie za burtę. Dośw. - 2003, E.A.Harris Imperial College London.  
miedź, złoto → tytan.

## Zastosowania

- "Pas transmisyjny" na powierzchni chipa.  
Udało się rozdzielić wiązkę na dwie i później je zinterferować  
- lipiec 2004 E. Cornell(Colorado) i grupa z Harvard Univ.  
Przy pomocy interferometrów można mierzyć obroty, grawitację i jej lokalne zmiany (samoloty, okręty)



Interferometr Sagnaca

# Podsumowanie

- Bozony kondensują tworząc nowy stan skupienia
- Wiele doświadczeń
- Na razie daleko do ewentualnych zastosowań w technice