

Wstęp do Optyki i Fizyki Materii Skondensowanej

Część I: Optyka, wykład 6

wykład: Piotr Fita
pokazy: Andrzej Wysmołek
ćwiczenia: Anna Grochola, Barbara Piętka

Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

2015/16

Plan

- 1 Pułapkowanie atomów
- 2 Kondensat Bosego-Einsteina
- 3 Oscylatorowy model ośrodka

Melasa optyczna

- Atom w przeciwbieżnych wiązках laserowych
- Prawdopodobieństwo absorpcji fotonu opisane profilem Lorentza:

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2}$$

- Dopplerowskie przesunięcie częstości

$$\omega(v) = \omega_L \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

- Wypadkowa siła działająca na atom z dwóch wiązek:

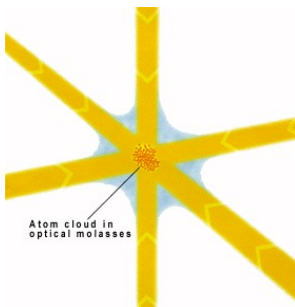
$$F \sim (\omega_L - \omega_0) \omega_L \frac{v}{c}$$

- Dla $\omega_L < \omega_0$ jest $F \sim -v$ (siła oporu)

(szczegóły na tablicy)

Melasa optyczna

- W trzech wymiarach atomy poruszają się jak w środowisku stawiającym bardzo duży opór (o dużej lepkości, jak melasa)

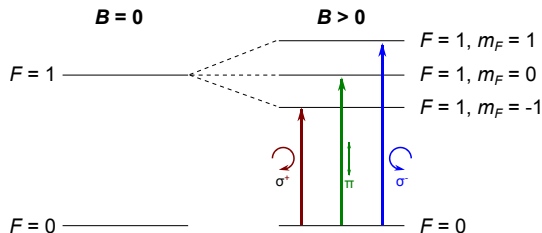


- Siła zależy od prędkości, nie od położenia
- Nie ma pułapkowania, tylko silne spowolnienie ruchu atomów
- Pułapkowanie wymaga siły zależnej od położenia

Pułapkowanie atomów

Atom dwupoziomowy w polu magnetycznym:

- Stan wzbudzony o całkowitym momencie pędu $F = 1$
- Stan podstawowy o $F = 0$
- W polu magnetycznym stan górny ulega rozszczepieniu, a dolny nie

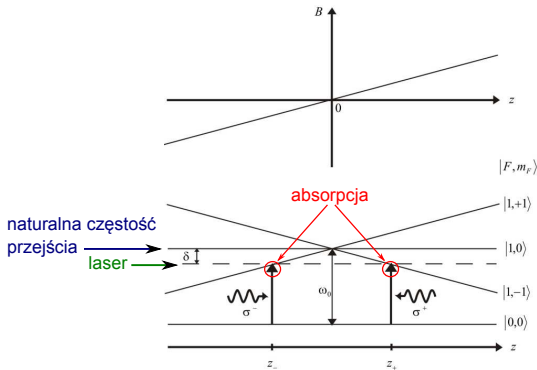


- Działa reguła wyboru na Δm_F - stan końcowy zależy od polaryzacji światła

Pułapkowanie atomów

Pułapka magneto optyczna (MOT) - 1 wymiar

- Chmura atomowa w polu magnetycznym liniowo zależnym od położenia

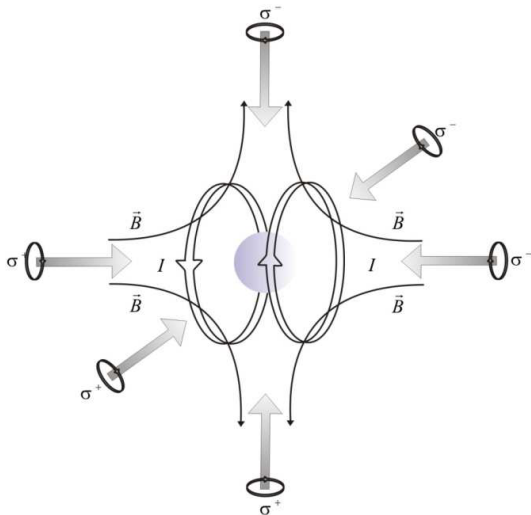


[K. Brzozowski, rozprawa doktorska, UJ, Kraków 2010]

- Siła zwrotna - zależna od położenia

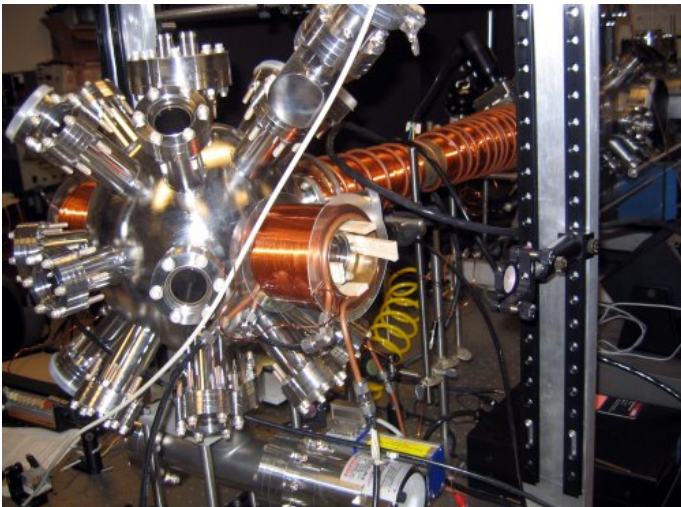
Pułapkowanie atomów

Pułapka magneto optyczna (MOT) - 3 wymiary



[K. Brzozowski, rozprawa doktorska, UJ, Kraków 2010]

Pułapka magnetooptyczna (MOT)



[C. Orzel, scienceblogs.com]

Optyczna pułapka dipolowa

- Dynamiczny efekt Starka - pole elektryczne fali E-M indukuje w atomie oscylujący moment dipolowy $\vec{p} = \alpha \vec{E}$
- α - zespolone, bo oscylacje $\vec{p}$ nie są w fazie z $\vec{E}$ (oscylator z siłą wymuszającą)

- Energia oddziaływania atomu z polem $\vec{E}$

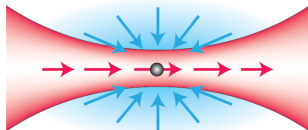
$$\mathcal{E} = -\frac{1}{2} \langle \vec{p} \cdot \vec{E} \rangle = -\frac{1}{2\epsilon_0 c} \Re(\alpha) I$$

- Siła działająca na atom:

$$\vec{F} = -\nabla \mathcal{E} = \frac{1}{2\epsilon_0 c} \Re(\alpha) \nabla I$$

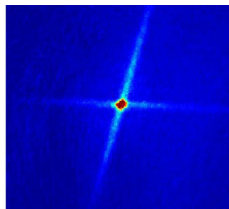
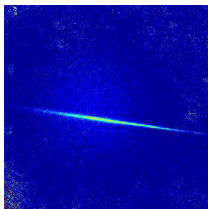
- Znak $\Re(\alpha)$ zależy od $\Delta\omega = \omega - \omega_0$
- Dla $\Delta\omega < 0$ atom jest wciągany w obszar większego natężenia światła I

Optyczna pułapka dipolowa



Atomy są pułapkowane w ognisku wiązki laserowej

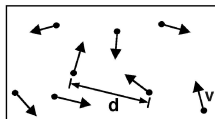
[T. A. Nieminen, Nature Phot. **4**, 737 (2010)]



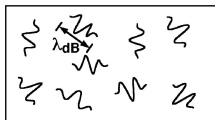
Atomy ^{87}Rb w jednej i w dwóch skrzyżowanych wiązkach laserowych

[www.physics.uq.edu.au]

Kondensat Bosego-Einsteina



wysoka temperatura T :
prędkość termiczna v
koncentracja d^{-3}
„kule bilardowe”



niższa temperatura T :
długość fali de Broglie’a
 $\lambda_{dB} = h/mv \sim T^{-1/2}$
„paczki falowe”

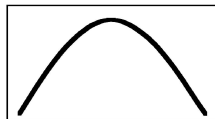


$$T = T_c$$

BEC

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

„atomowe paczki falowe
zachodzą na siebie”



$T = 0$ K:
czysty kondensat
„gigantyczna fala materii”

- Makroskopowa liczba atomów obsadza stan podstawowy
- Atomy w kondensacie mają ten sam pęd
- Atomy zachowują się kolektywnie (“jak jedna cząstka”)

[W. Ketterle, Postępy Fizyki **54**, 11 (2003)]

Kondensat Bosego-Einsteina

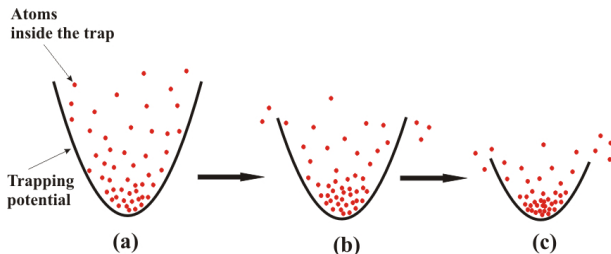
Trudności

- Atomy muszą być uwięzione za pomocą pól, bo w komórce osiadłyby na ściankach
- Atomy muszą zostać schłodzone tak, by nie skondensowały "klasycznie" - do cieczy lub ciała stałego
- Chłodzenie w pułapce magnetoptycznej nie zapewnia dostatecznie niskiej temperatury

Kondensat Bosego-Einsteina

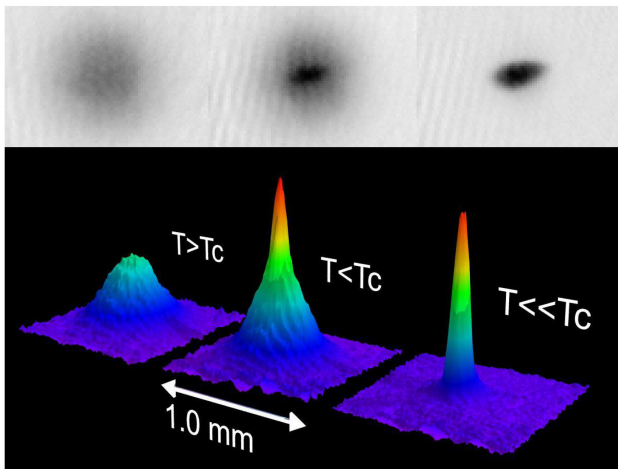
Chłodzenie przez odparowanie

- Atomy o największej energii uciekają z układu
- Stopniowo obniżając potencjał obniża się temperaturę układu pozostającego w pułapce (magnetycznej)
- W trakcie schładzania następuje kondensacja



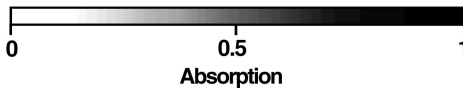
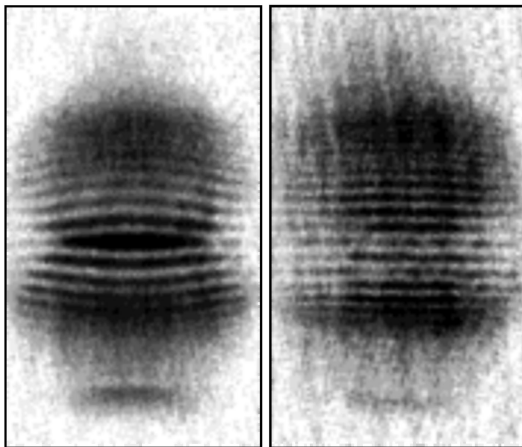
[cold-atoms.physics.lsa.umich.edu]

Kondensat Bosego-Einsteina



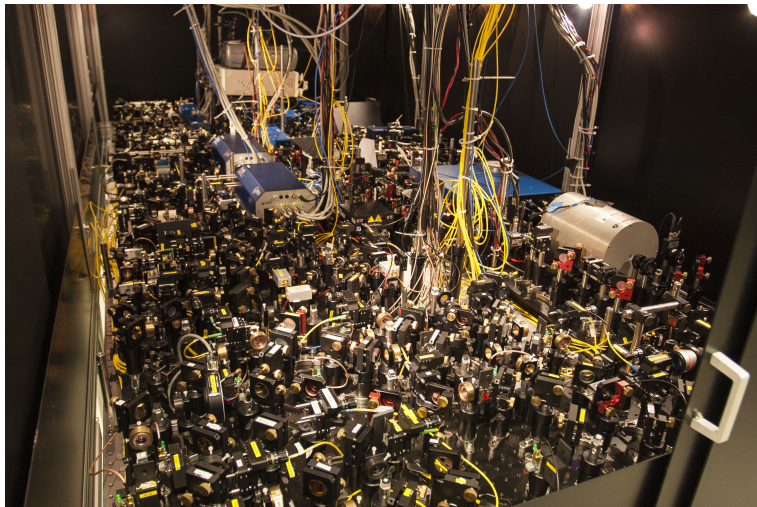
Kondensat Bosego-Einsteina

Interferencja dwóch kondensatów



Kondensat Bosego-Einsteina

Układ doświadczalny



[www.quantum-munich.de]

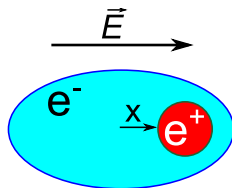
Zastosowania zimnych atomów

- "Platforma testowa" dla mechaniki i elektrodynamiki kwantowej
- Ultraprecyzyjna spektroskopia atomowa
- Ultraprecyzyjne wzorce czasu
(zegary optyczne o dokładności lepszej niż 10^{-17})
- Pomiary bardzo słabych pól magnetycznych
- Poszukiwania "nowej fizyki" – wpływ nieznanymi pól na zachowanie atomów w kondensacie (aksjony)

Klasyczny model współczynnika załamania

Oscylatorowy model ośrodka

- Opisujemy ośrodek przez zbiór klasycznych oscylatorów harmoniczných, o częstości własnej ω_0 i tłumieniu γ
- Oscylatory są pobudzone do drgań polem elektrycznym fali elektromagnetycznej $\vec{E}(t) = \vec{E}_0 e^{i\omega t}$



- Równanie ruchu oscylatora z siłą wymuszającą:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -\frac{e}{m} E_0 e^{i\omega t}$$

Klasyczny model współczynnika załamania

Rozwiązanie równania ruchu

- Rozwiązanie jest postaci

$$x(t) = x_0 e^{i\omega t}$$

- z amplitudą zespoloną x_0 zależną od ω :

$$x_0 = \frac{eE_0}{m} \frac{1}{\omega^2 - \omega_0^2 - i\omega\gamma}$$

- Polaryzacja ośrodka o koncentracji atomów N :

$$\vec{P} = -Ne\vec{x}$$

- Polaryzacja ośrodka o podatności χ zależy liniowo od pola E

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$$