

Wstęp do Optyki i Fizyki Materii Skondensowanej

Część I: Optyka, wykład 5

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

Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

2013/14

Plan

- 1 Atomy w polach zewnętrznych
- 2 Chłodzenie i pułapkowanie atomów
- 3 Kondensat Bosego-Einsteina

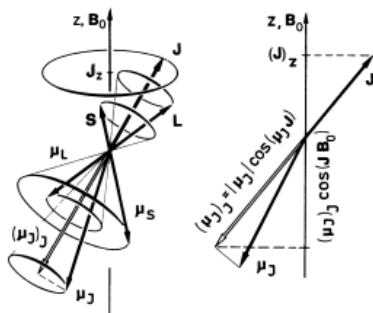
Atom w polu magnetycznym

Efekt Zeemana

W słabym polu zachowane zostaje sprzężenie L-S. Wypadkowy moment magnetyczny $\vec{\mu}_J$ oddziałuje z polem magnetycznym

- $\vec{\mu}_J = \vec{\mu}_S + \vec{\mu}_L$
- $\vec{\mu}_J$ wiruje wokół \vec{J}
- mierzalny jest rzut $(\vec{\mu}_J)_J$
- $(\vec{\mu}_J)_J$ wiruje wokół \vec{B}_0
- Energia oddziaływania:

$$E_B = -(\vec{\mu}_J)_J \cdot \vec{B}_0$$



[H. Haken, H.C. Wolf, Atomy i kwanty]

Atom w polu magnetycznym

Jak wyznaczyć potrzebne rzuty?

$$E_B = -(\vec{\mu}_J)_J \cdot \vec{B}_0 = -(\mu_J)_{J,z} B_0$$

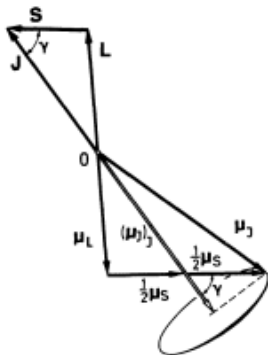
$$\vec{\mu}_L = -g_L \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{L}, g_L = 1$$

$$\vec{\mu}_S = -g_S \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{S}, g_S \approx 2$$

$$\vec{\mu}_J = -g_J \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{J}, g_J = ?$$

Z tw. cosinusów:

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$



[H. Haken, H.C. Wolf, Atomy i kwanty]

Atom w polu magnetycznym

Energia oddziaływania

$$E_B = -(\vec{\mu}_J)_J \cdot \vec{B}_0 = -(\mu_J)_{J,z} B_0$$

$$\vec{\mu}_L = -g_L \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{L}, g_L = 1$$

$$\vec{\mu}_S = -g_S \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{S}, g_S \approx 2$$

$$\vec{\mu}_J = -g_J \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{J}, g_J = ?$$

Z tw. cosinusów:

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

Rzut na kierunek pola:

$$(\vec{\mu}_J)_{J,z} = -m_J g_J \mu_B$$

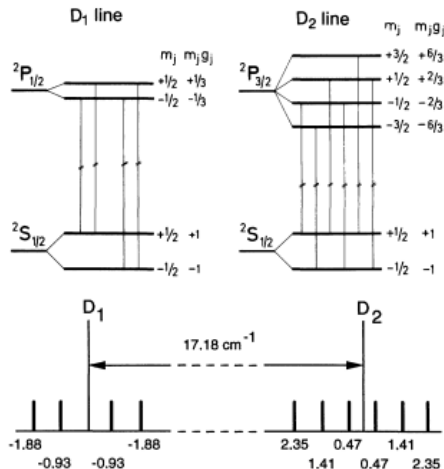
$$m_J = -J, \dots, J$$

Energia oddziaływania:

$$E_B = m_J g_J \mu_B B_0$$

Efekt Zeemana

Widmo sodu w słabym polu magnetycznym



[H. Haken, H.C. Wolf, Atomy i kwanty]

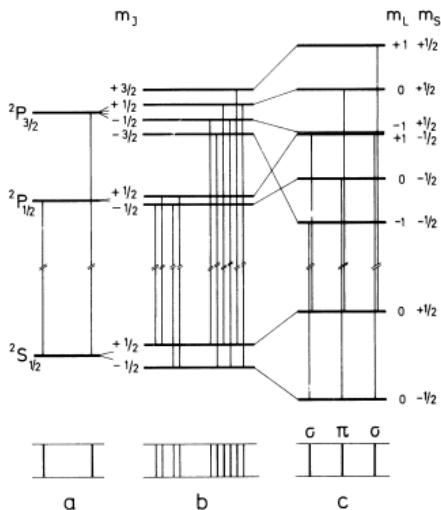
Dozwolone przejścia optyczne:

- $\Delta m_j = \pm 1$
polaryzacja kołowa
- $\Delta m_j = 0$
polaryzacja liniowa

Efekt Paschena-Backa

Atom w silnym polu magnetycznym

- Silne pole \rightarrow zerwanie sprzężenia L-S.
- \vec{L} i \vec{S} niezależnie sprzęgają się z zewnętrznym polem
- $E_B = (m_l + 2m_s)\mu_b B_0$



Atom w polu elektrycznym

Klasycznie

- Pole elektryczne indukuje w atomie moment dipolowy

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}$$

- Energia oddziaływania momentu dipolowego z polem elektrycznym

$$\mathcal{E} = -\frac{1}{2} \vec{p} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{2} \alpha E^2$$

- Przesunięcia poziomów proporcjonalne do kwadratu natężenia pola elektrycznego
- Zgodne jakościowo z obserwacjami (ale nie wszystkimi!)

Atom w polu elektrycznym

Kwantowo - stany niezdegenerowane

Stosujemy rachunek zaburzeń

- W jednorodnym polu elektrycznym $\vec{E} = E\hat{z}$:

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + eEz = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_E$$

- Poprawka pierwszego rzędu do energii stanu $|\psi_i\rangle$:

$$\mathcal{E}_i^{(1)} = \langle \psi_i | \mathcal{H}_E | \psi_i \rangle = eE \langle \psi_i | z | \psi_i \rangle = 0$$

- Poprawka drugiego rzędu:

$$\mathcal{E}_i^{(2)} = \sum_{j \neq i} \frac{|eE \langle \psi_j | z | \psi_i \rangle|^2}{\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_j} = e^2 E^2 \sum_{j \neq i} \frac{|\langle \psi_j | z | \psi_i \rangle|^2}{\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_j}$$

- Poprawka proporcjonalna do E^2 - **kwadratowy** efekt Starka

Atom w polu elektrycznym

Kwantowo - stany zdegenerowane

Jeśli $|\psi_1\rangle$ i $|\psi_2\rangle$ są stanami zdegenerowanymi, to

$$\begin{vmatrix} \langle \psi_1 | \mathbf{eEz} | \psi_1 \rangle - \mathcal{E} & \langle \psi_1 | \mathbf{eEz} | \psi_2 \rangle \\ \langle \psi_2 | \mathbf{eEz} | \psi_1 \rangle & \langle \psi_2 | \mathbf{eEz} | \psi_2 \rangle - \mathcal{E} \end{vmatrix} = 0$$

$$\begin{vmatrix} -\mathcal{E} & E_{12} \\ E_{12}^* & -\mathcal{E} \end{vmatrix} = 0$$

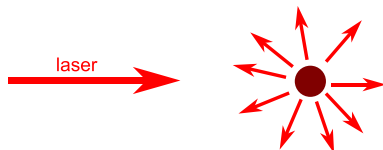
$$\mathcal{E}^2 - |E_{12}|^2 = 0$$

$$\mathcal{E}_{12} = \pm |E_{12}| = \pm \mathbf{eE} | \langle \psi_1 | \mathbf{z} | \psi_2 \rangle |$$

Liniowy efekt Starka (np. w stanach o $n = 2$ atomu wodoru)

Laserowe spowalnianie fotonów

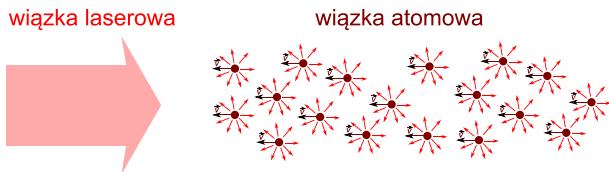
- Przy każdym akcie absorpcji foton przekazuje pęd $p_{\text{fot}} = \frac{h}{\lambda}$



- Pędy uzyskiwane przez atom w aktach emisji uśredniają się do zera
- Po N aktach absorpcji-emisji atom uzyskuje wypadkowy pęd w kierunku wiązki $\Delta p = Np_{\text{fot}}$

Laserowe spowalnianie fotonów

- Grupę atomów z wiązki o jednakowej prędkości można spowolnić do prędkości bliskiej 0

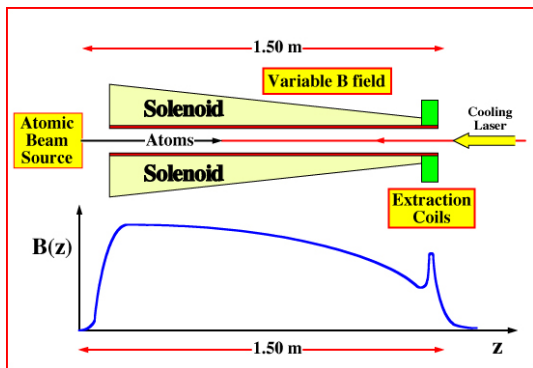


- Atom "widzi" światło o częstotliwości $\omega = \omega_{laser} \left(1 + \frac{v}{c}\right)$
 - Laser musi być przestrajany w miarę spowalniania atomów
 - Częstość przejść atomowych ω_a musi być modyfikowana, aby zawsze spełniony był warunek

$$\omega_a = \omega_{laser} \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Spowalniacz zeemanowski

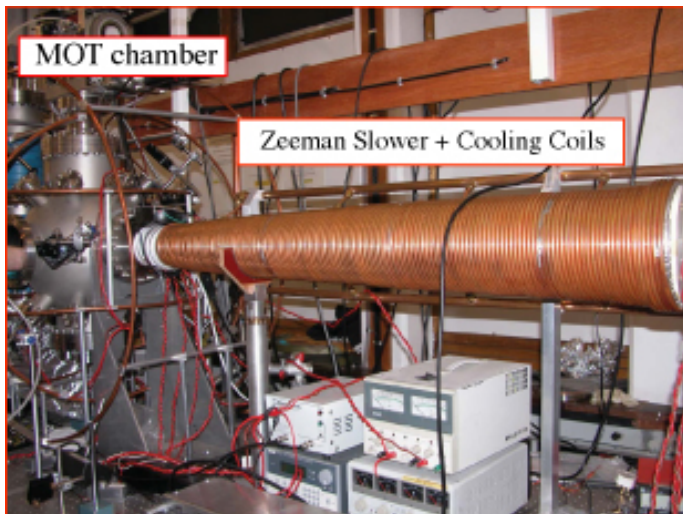
Do zmiany częstości przejść wykorzystuje się efekt Zeemana:



[<http://es1.ph.man.ac.uk/>]

Pole magnetyczne zmienia się wzdłuż kierunku wiązki atomowej.

Spowalniacz zeemanowski



[<http://es1.ph.man.ac.uk/>]

Pułapkowanie atomów

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:

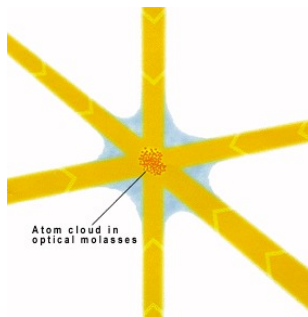
$$F \sim (\omega_L - \omega_0)\omega_L \frac{v}{c}$$

- 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

Granice chłodzenia

Temperatura dopplerowska

Chłodzenie oparte na absorpcji - emisji spontanicznej:

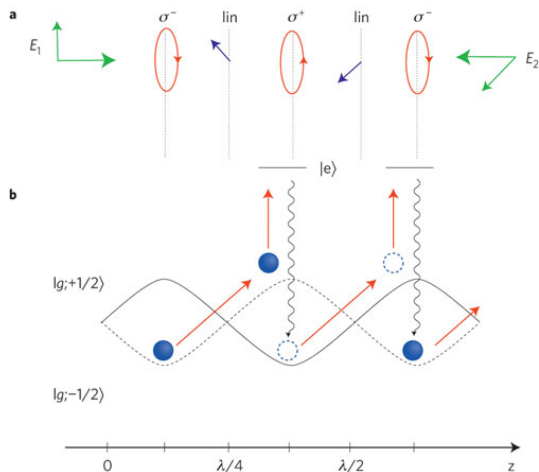
- dla wielu aktów abs-em. średni pęd atomu $\langle \vec{p} \rangle = 0$
- ale średni kwadrat pędu $\langle p^2 \rangle \neq 0$
czyli temperatura $T > 0$
- dopplerowska granica chłodzenia:

$$T_D = \frac{\hbar\gamma}{2k_B}$$

$$T_D \sim 100 - 500 \mu\text{K}$$

Granice chłodzenia

Poniżej temp. dopplerowskiej



[E. Luc, F. Renzoni, Nat. Phys. **9**, 615 (2013)]

Chłodzenie Syzyfa



$$T_{min} \sim T_r = \frac{\hbar^2 k^2}{2mk_B}$$

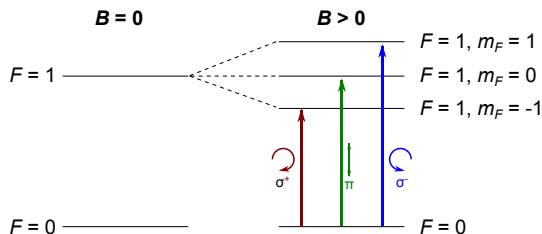
(Temp. odrzutu)

W praktyce $T_{min} \sim 10 \mu\text{K}$

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

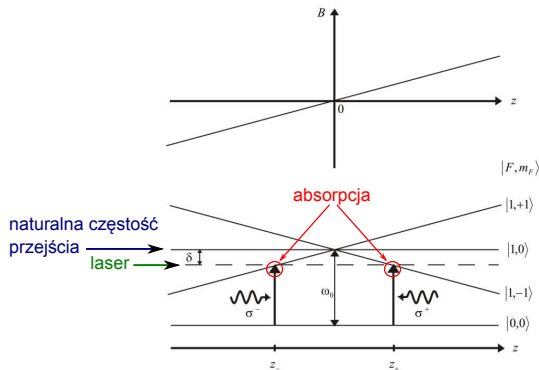


- Działa reguła wyboru na Δm_F - stan końcowy zależy od polaryzacji światła

Pułapkowanie atomów

Pułapka magneto optyczna (MOT) - 1 wymiar

- Chmura atomowa w polu magnetycznym liniowo zależnym od położenia

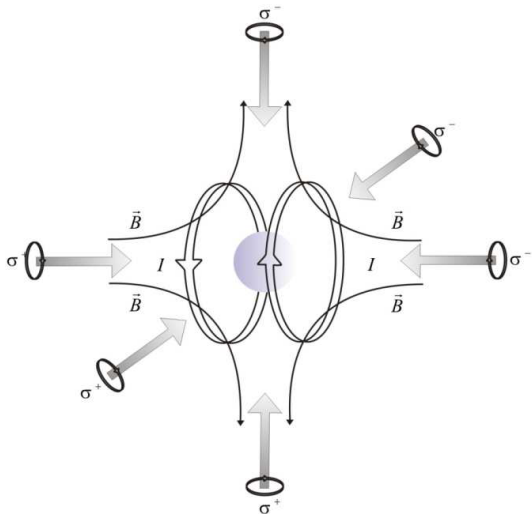


[K. Brzozowski, rozprawa doktorska, UJ, Kraków 2010]

- Siła zwrotna - zależna od położenia

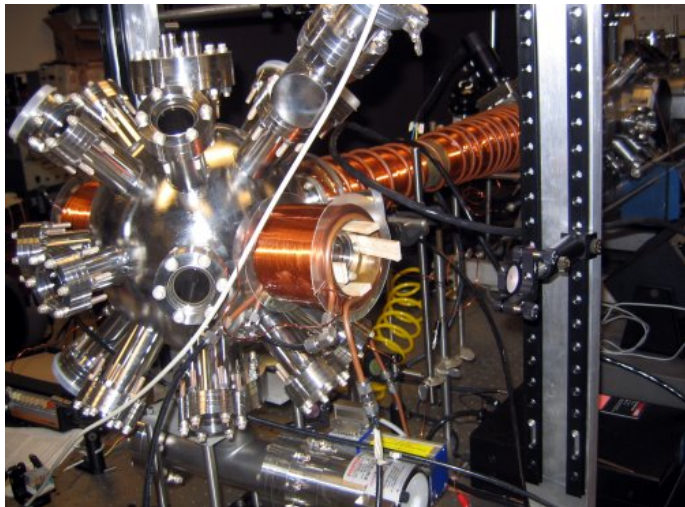
Pułapkowanie atomów

Pułapka magnetooptyczna (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}

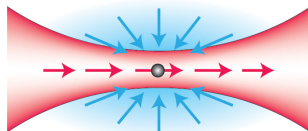
$$\mathcal{E} = -\frac{1}{2} \langle \vec{p} \cdot \vec{E} \rangle = -\frac{1}{2\epsilon_0 c} \Re(\alpha) I$$

- Siła działająca na atom:

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

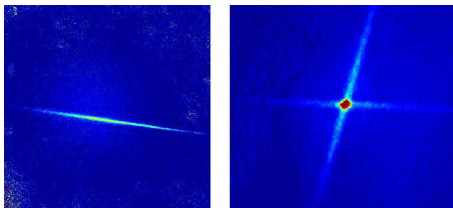
- Znak $\Re(\alpha)$ zależy od $\Delta\omega = \omega - \omega_0$
- Dla $\Delta\omega < 0$ atom jest wciągany w obszar większego natężenia światła I

Optyczna pułapka dipolowa



Atomy są pułapkowane w ognisku wiązki laserowej

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

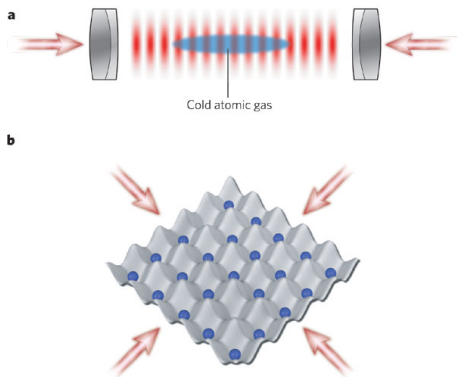


Atomy ^{87}Rb w jednej i w dwóch skrzyżowanych wiązkach laserowych

[www.physics.uq.edu.au]

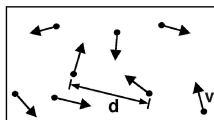
Sieci optyczne

Pułapka dipolowa utworzona przez interferujące wiązki światła

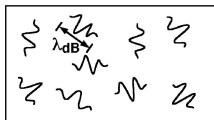


[I. Bloch, Nature **453**, 1016 (2008)]

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”

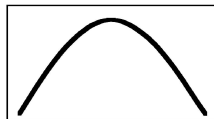


$$T = T_c:$$

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

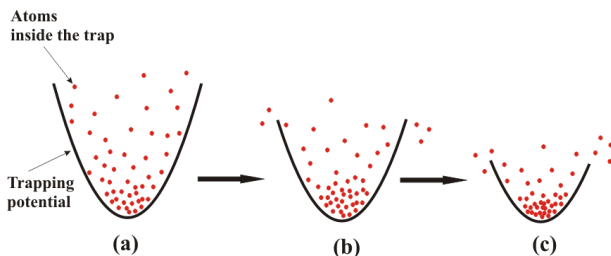
Trudności

- 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

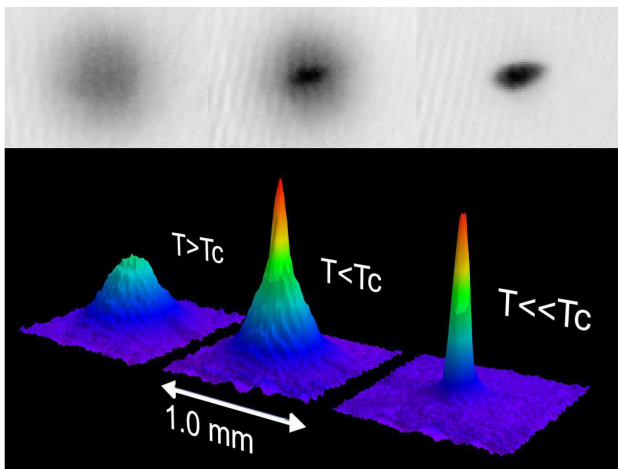
Chłodzenie przez odparowanie

- 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]

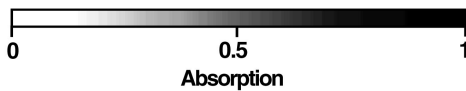
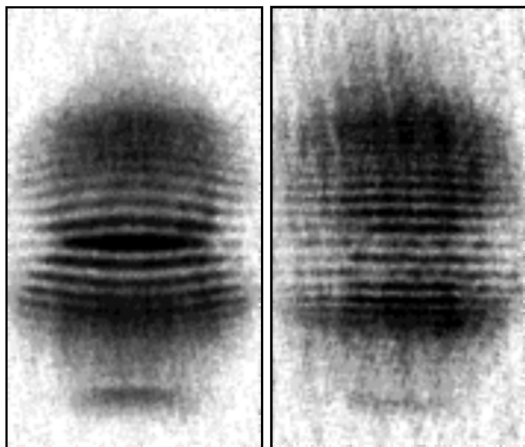
Kondensat Bosego-Einsteina



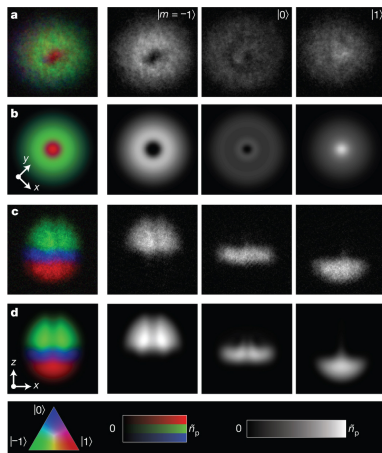
[cua.mit.edu]

Kondensat Bosego-Einsteina

Interferencja dwóch kondensatów



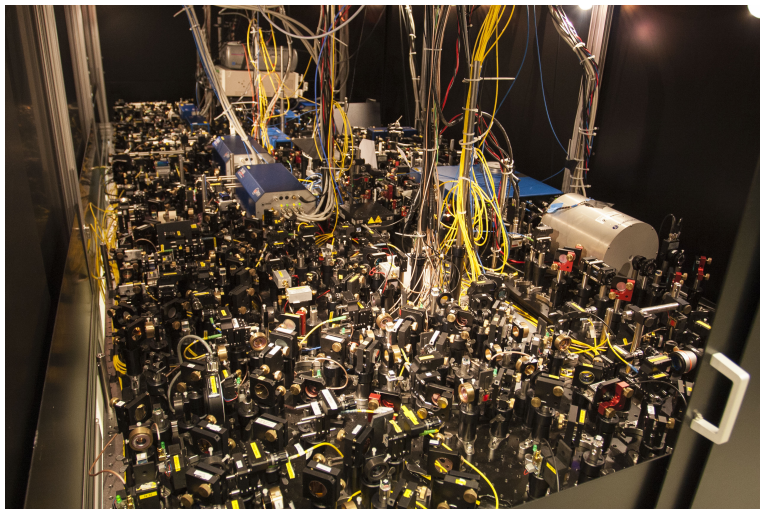
Monopole magnetyczne w kondensacie



[M. W. Ray, E. Ruokokoski, S. Kandel, M. Möttönen,
D. S. Hall, Nature **505**, 657 (2014)]

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)