

# Wstęp do Optyki i Fizyki Materii Skondensowanej

## Wykład 14

wykład: Piotr Fita  
pokazy: Jacek Szcztyko  
ćwiczenia: Paweł Kowalczyk,  
Barbara Piętka, Maciej Molas

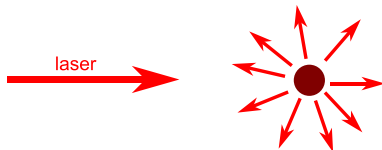
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski

2019/20

# Plan

- 1 Chłodzenie atomów
- 2 Struktura nadsubtelna
- 3 Pułapkowanie atomów

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

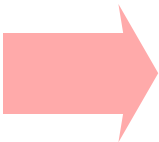


- Pędy uzyskiwane przez atom w aktach emisji uśredniają się do zera
- Po  $N$  aktach absorpcji-emisji atom uzyskuje wypadkowy pęd w kierunku wiązki  $\Delta p = Np_{\text{fot}}$

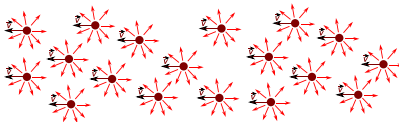
# Laserowe spowalnianie atomów

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

wiązka laserowa



wiązka atomowa

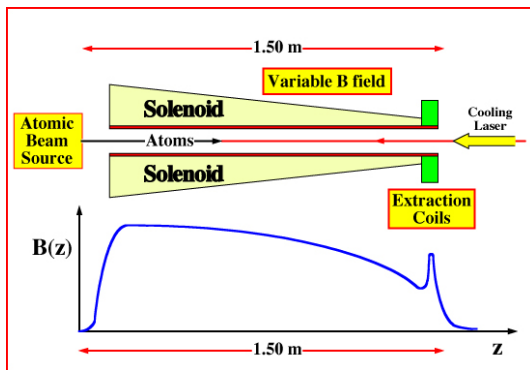


- Atom „widzi” światło o częstotliwości  $\omega = \omega_{laser} \left(1 + \frac{v}{c}\right)$ 
  - Laser musi być przesłajany w miarę spowalniania atomów
  - Częstość przejść atomowych  $\omega_a$  musi być modyfikowana, aby zawsze spełniony był warunek

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

# Spowalniacz zeemanowski

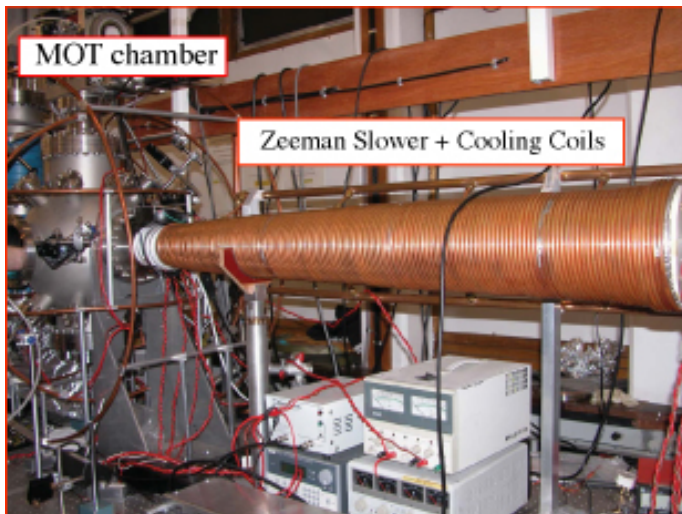
Do zmiany częstości przejść wykorzystuje się efekt Zeemana:



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

Pole magnetyczne zmienia się wzdłuż kierunku wiązki atomowej.

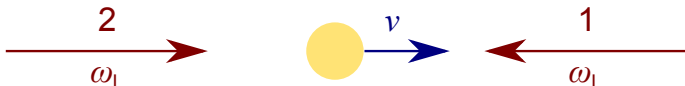
# Spowalniacz zeemanowski



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

# Melasa optyczna

- Atom w przeciwbieżnych wiązках laserowych o częstotliwości  $\omega_L$



- Dopplerowskie przesunięcie częstotliwości

$$\omega_{1,2}(v) = \omega_L \left( 1 \pm \frac{v}{c} \right)$$

- Prawdopodobieństwo absorpcji fotonu z wiązek 1 i 2 opisane profilem Lorentza:

$$\alpha_{1,2} = \frac{\alpha_0}{(\omega_{1,2} - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2}$$

# Melasa optyczna

- Siła działająca na atom jest proporcjonalna do liczby fotonów absorbowanych w jednostce czasu, a więc:

$$F_{1,2} \sim \alpha_{1,2}$$

- Wypadkowa siła działająca na atom z dwóch wiązek:

$$F = F_2 - F_1 \sim \frac{\alpha_0}{(\omega_2 - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2} - \frac{\alpha_0}{(\omega_1 - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2}$$

$$F \sim \frac{\alpha_0}{(\omega_L - \omega_0 - \omega_L \frac{v}{c})^2 + (\gamma/2)^2} - \frac{\alpha_0}{(\omega_L - \omega_0 + \omega_L \frac{v}{c})^2 + (\gamma/2)^2}$$

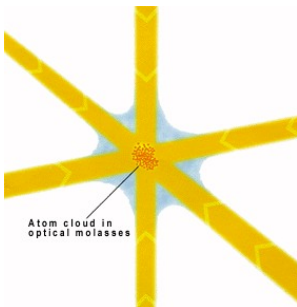
$$F \sim (\omega_L - \omega_0) \omega_L \frac{v}{c}$$

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



# 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

# Oddziaływania magnetyczne

## Wpływ oddziaływań magnetycznych na poziomy energetyczne

- **Struktura subtelna** – roszczepienia i przesunięcia poziomów energetycznych wynikające z efektów relatywistycznych i oddziaływań magnetycznych (spinowego i orbitalnego momentu magnetycznego).
- Jądra atomowe też mają moment magnetyczny – z oddziaływaniem momentów magnetycznych jąder i elektronów też wiąże się przesunięcie i rozszczepienie poziomów elektronowych w atomach – **struktura nadsubtelna**

# Spin jądrowy

- Jądro ma moment pędu  $\vec{I}$  o wartości:

$$|\vec{I}| = \hbar\sqrt{I(I+1)} \quad |\vec{I}|_z = m_I\hbar \quad m_I = -I, \dots, I$$

( $2I + 1$ ) wartości rzutu na wybraną oś

- Moment magnetyczny jądra:

$$\vec{\mu}_I = \gamma\vec{I} = g_I \frac{\mu_N}{\hbar} \vec{I}$$

- $\gamma$  – jądrowy czynnik żyromagnetyczny
- $g_I$  – jądrowy czynnik Landego  
(proton:  $g_I \approx 5.59$ , neutron:  $g_I \approx -3.83$ )
- $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = \frac{\mu_B}{1836}$  – magneton jądrowy
- $\mu_N$  jest 3 rzędy wielkości mniejszy niż  $\mu_B$  – efekty związane z momentem magnetycznym jądra są małe!

# Odziaływanie nadsubtelne

- Pole magnetyczne elektronu  $\vec{B}_J$  prowadzi do orientacji momentu magnetycznego  $\vec{\mu}_I$  względem  $\vec{B}_J$ , a co za tym idzie  $\vec{I}$  względem  $\vec{J}$ . Powstaje wypadkowy moment pędu  $\vec{F}$

$$\vec{F} = \vec{J} + \vec{I}$$

$$|\vec{F}| = \hbar \sqrt{F(F+1)}$$

- Ze względu na kwantowanie rzutów możliwe są następujące wartości  $F$ :

$$F = |J - I|, |J - I| + 1, \dots, J + I - 1, J + I$$

- $(2I + 1)$  dla  $J > I$  lub  $(2J + 1)$  dla  $J < I$  możliwości

# Oddziaływanie nadsubtelne

## Energia oddziaływania

Energia momentu magnetycznego w polu elektronów  $\vec{B}_J$ :

$$E_{HFS} = -\vec{\mu}_I \cdot \vec{B}_J = -\mu_I B_J \cos \angle(\vec{\mu}_I, \vec{B}_J)$$

$$\mu_I = g_I \mu_N \sqrt{I(I+1)} \quad \cos \angle(\vec{\mu}_I, \vec{B}_J) = -\cos \angle(\vec{I}, \vec{J})$$

$$E_{HFS} = g_I \mu_N B_J \sqrt{I(I+1)} \cos \angle(\vec{I}, \vec{J})$$

Twierdzenie cosinusów:

$$|\vec{F}|^2 = |\vec{I}|^2 + |\vec{J}|^2 - 2|\vec{I}||\vec{J}| \cos(\pi - \angle(\vec{I}, \vec{J})) = |\vec{I}|^2 + |\vec{J}|^2 + 2|\vec{I}||\vec{J}| \cos \angle(\vec{I}, \vec{J})$$

$$F(F+1) = I(I+1) + J(J+1) + 2\sqrt{I(I+1)}\sqrt{J(J+1)} \cos \angle(\vec{I}, \vec{J})$$

$$\sqrt{I(I+1)} \cos \angle(\vec{I}, \vec{J}) = \frac{F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)}{2\sqrt{J(J+1)}}$$

# Oddziaływanie nadsubtelne

## Energia oddziaływania

$$E_{HFS} = \frac{g_I \mu_N B_J}{2\sqrt{J(J+1)}} [F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)]$$

$$a_J = \frac{g_I \mu_N B_J}{\sqrt{J(J+1)}}$$

*stała struktury nadsubtelnej*

$$E_{HFS} = \frac{1}{2} a_J [F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)]$$

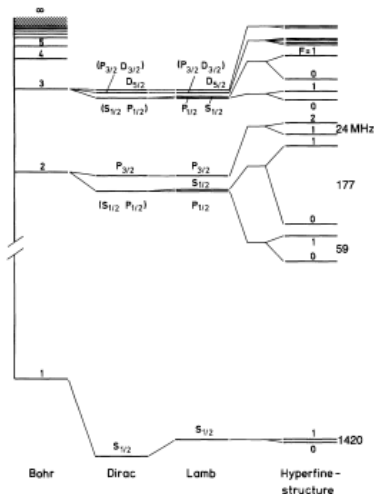
W danym stanie elektronowym (ustalone  $J$ )  $E_{HFS}$  przyjmuje

- $(2I+1)$  wartości ( $I < J$ )
- $(2J+1)$  wartości ( $I > J$ )

(rozszczipienie nadsubtelne).

# Struktura nadsubtelna atomu wodoru

Skala nie jest zachowana!

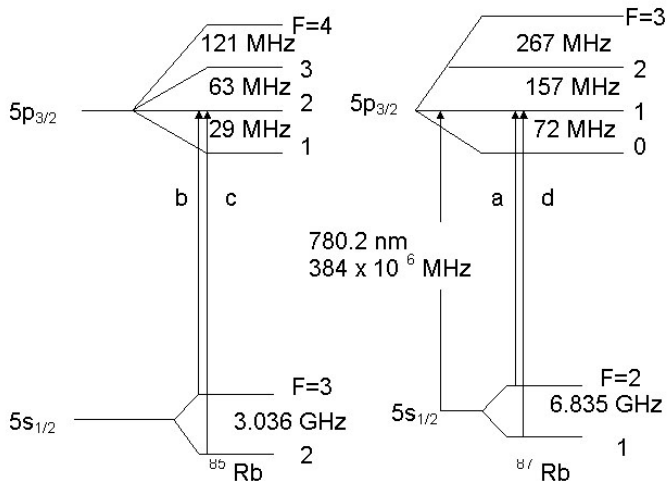


[H. Haken, H. C Wolf, Atomy i kwanty]

# Struktura nadsubtelna rubidu

Dla  $^{85}\text{Rb}$ :  $I = 5/2$

Dla  $^{87}\text{Rb}$ :  $I = 3/2$

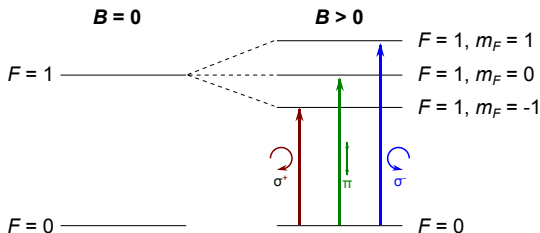




# Pułapkowanie atomów

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 (na  $2F + 1 = 3$  poziomy)

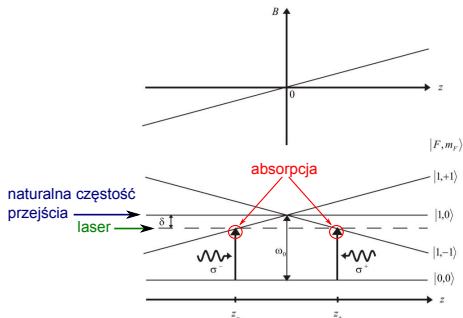


- Działa reguła wyboru na  $\Delta m_F$  - stan końcowy zależy od polaryzacji światła

# Pułapkowanie atomów

## Pułapka magneto optyczna (MOT) - 1 wymiar

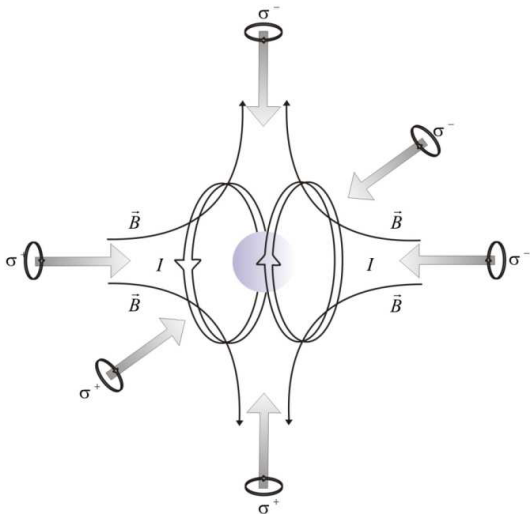
- Atomy w polu magnetycznym liniowo zależnym od położenia
- Energia rozszczepionych poziomów zależy liniowo od położenia
- Przeciwbieżne wiązki laserowe o przeciwnej polaryzacji kołowej
- Szybkość absorpcji fotonów zależy od położenia
- Siła zwrotna – zależna od położenia



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

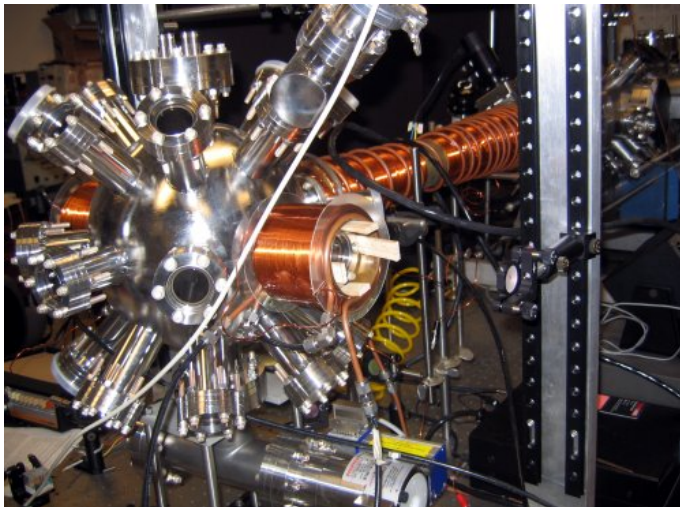
# Pułapkowanie atomów

## 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  $\vec{p} = \alpha \vec{E}$
- $\alpha$  - zespolone, bo oscylacje  $\vec{p}$  nie są w fazie z  $\vec{E}$  (oscylator z siłą wymuszającą)
- Energia oddziaływania atomu z polem  $\vec{E}$

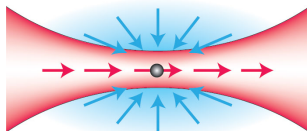
$$\mathcal{E} = -\frac{1}{2} \langle \vec{p} \cdot \vec{E} \rangle = -\frac{1}{2\epsilon_0 c} \Re(\alpha) I$$

- Siła działająca na atom:

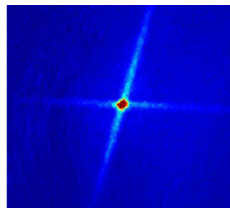
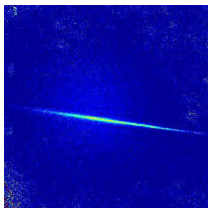
$$\vec{F} = -\nabla \mathcal{E} = \frac{1}{2\epsilon_0 c} \Re(\alpha) \nabla I$$

- 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

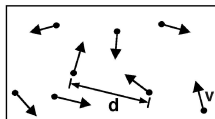


Atomy są pułapkowane w ognisku wiązki laserowej  
[T. A. Nieminen, Nature Phot. 4, 737 (2010)]

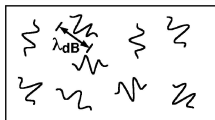


Atomy  $^{87}\text{Rb}$  w jednej i w dwóch skrzyżowanych wiązkach laserowych  
[www.physics.uq.edu.au]

# 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”

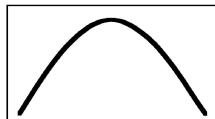


$$T = T_c$$

BEC

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

„atomowe paczki falowe  
zachodzą na siebie”



$$T = 0 \text{ K:}$$

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

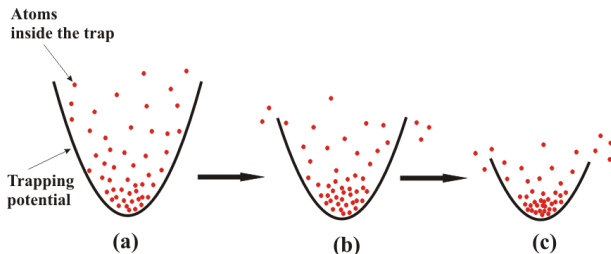
- Atomy muszą być uwięzione za pomocą pól, bo w komórce osiadłyby na ściankach
- Atomy muszą zostać schłodzone tak, by nie skondensowały "klasycznie" - do cieczy lub ciała stałego
- Chłodzenie w pułapce magnetoptycznej nie zapewnia dostatecznie niskiej temperatury



# Kondensat Bosego-Einsteina

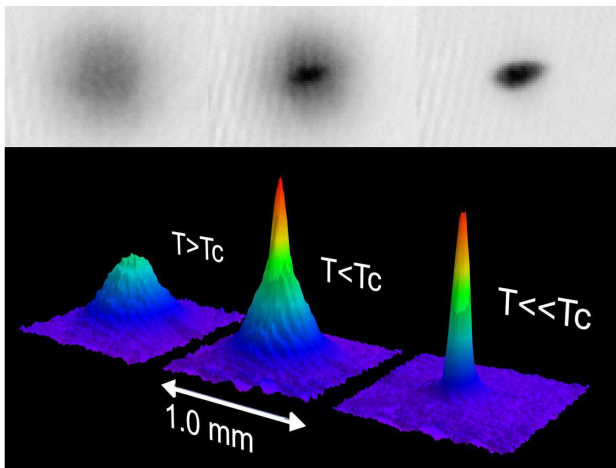
## Chłodzenie przez odparowanie

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



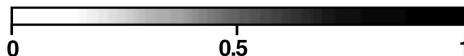
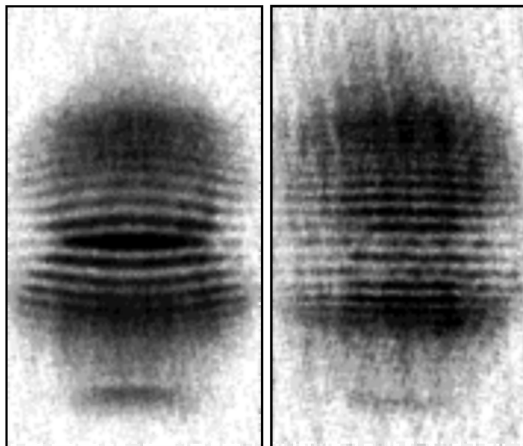
[cold-atoms.physics.lsa.umich.edu]

# Kondensat Bosego-Einsteina



# Kondensat Bosego-Einsteina

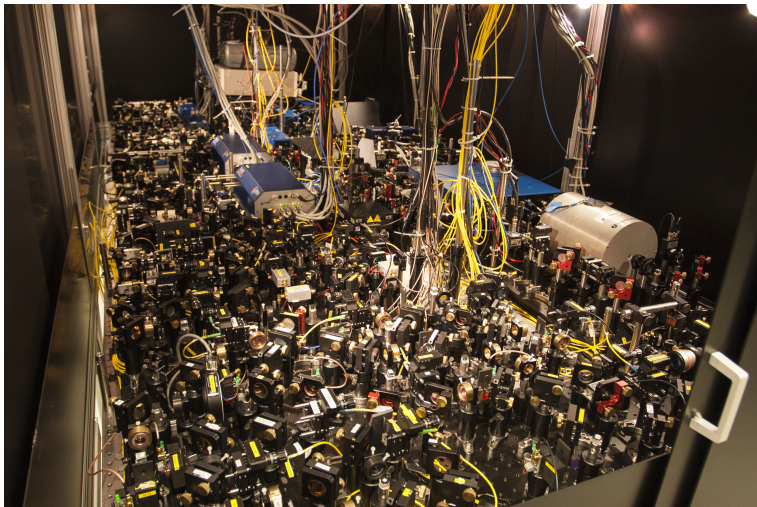
## Interferencja dwóch kondensatów



Absorption

# Kondensat Bosego-Einsteina

## Układ doświadczalny



[[www.quantum-munich.de](http://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