

Laser atomowy

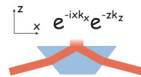
Tomasz Kawalec

15 stycznia 2009

ENS, Laboratoire Kastler Brossel



Zakład Optyki Atomowej



Laser atomowy

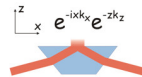
Tomasz Kawalec

15 stycznia 2009

ENS, Laboratoire Kastler Brossel



Zakład Optyki Atomowej

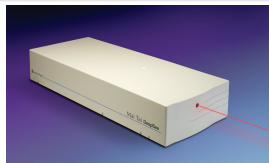


Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA

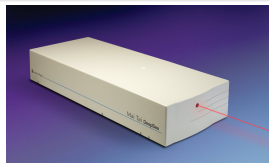
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



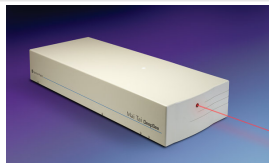
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
 - Dotychczasowe realizacje
 - Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
 - Zimne atomy w ZOA



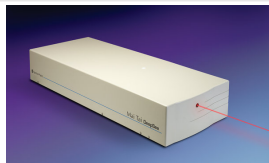
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



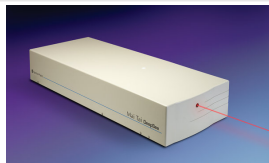
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



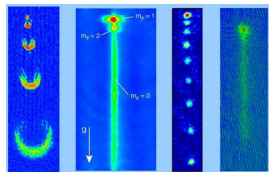
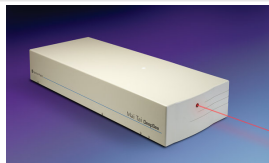
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



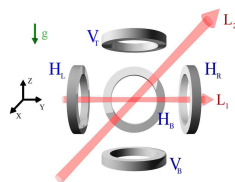
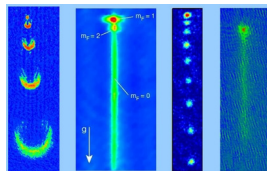
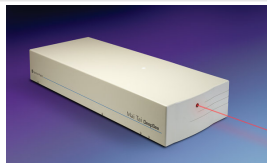
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



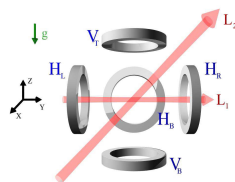
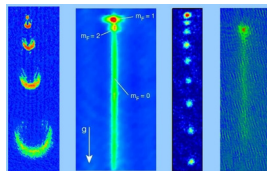
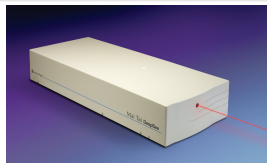
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



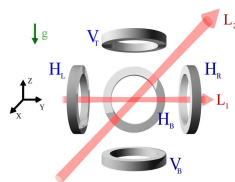
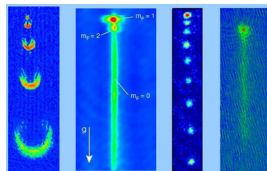
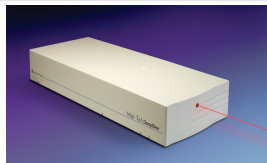
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



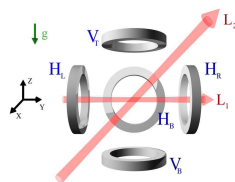
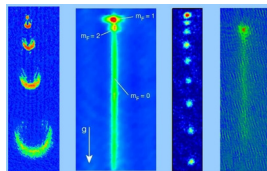
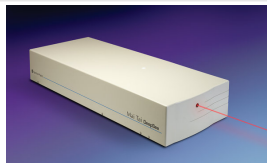
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



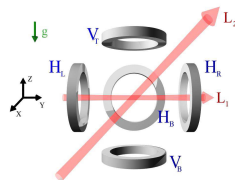
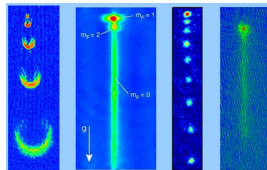
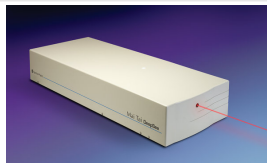
Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



Spis treści

- Laser optyczny i atomowy
 - Nazewnictwo
 - BEC
 - Analogia
- Dotychczasowe realizacje
- Nowy pomysł
 - Grupa
 - Cel i osiągnięcia
 - Realizacja eksperymentalna kondensatu
 - Laser atomowy
- Zimne atomy w ZOA



Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation

→

laser atomowy =
wiązka atomów o
spójnych falach
materii

Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation

→

Matter
Amplification by
Stimulated
Creation of
Atoms

laser atomowy =
wiązka atomów o
spójnych falach
materii

Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation

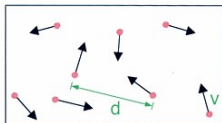
→

Matter
Amplification by
Stimulated
Creation of
Atoms

laser atomowy =
wiązka atomów o
spójnych falach
materii

Akronim LASER jest po części uzasadniony:

- analogią pomiędzy spójnymi falami EM i spójnymi falami materii
- podobieństwami w procesach tworzenia tych fal.



High Temperature T:

thermal velocity v
density d^{-3}

"Billiard balls"



Low

Temperature T:

De Broglie wavelength

$$\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$$

"Wave packets"

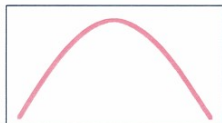


T=T_{crit}:

**Bose-Einstein
Condensation**

$$\lambda_{dB} = d$$

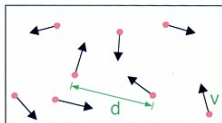
"Matter wave overlap"



T=0:

**Pure Bose
condensate**

"Giant matter wave"



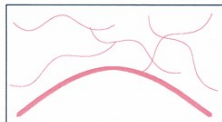
High Temperature T:

thermal velocity v
density d^{-3}
"Billiard balls"



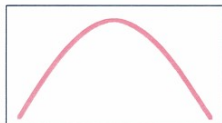
Low Temperature T:

De Broglie wavelength
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$
"Wave packets"



T=T_{crit}:
**Bose-Einstein
Condensation**

$\lambda_{dB} = d$
"Matter wave overlap"



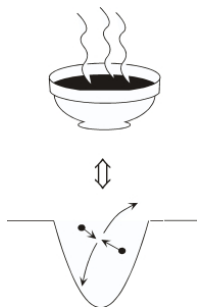
T=0:
**Pure Bose
condensate**
"Giant matter wave"

$$\lambda_{dB}(T) = \frac{h}{p} = \left(\frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T} \right)^{1/2}$$

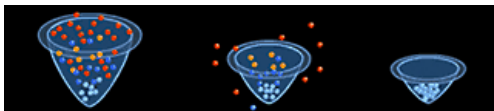
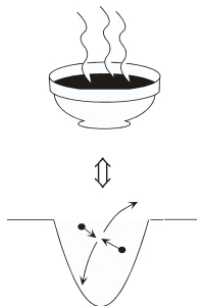
$$\rho = n\lambda_{dB}(T)^3$$

BEC powstaje dla przy temperaturze krytycznej T_C takiej, że $\rho \simeq 1.2$ ($T_C < 1 \mu\text{K}$!)

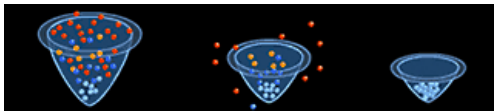
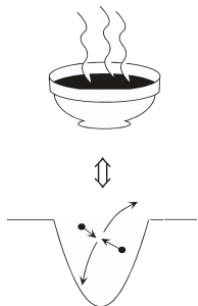
- BEC jest konsekwencją statystyki cząstek:
 - cząstki kwantowe są nierozróżnialne
 - zasada Pauliego nie obowiązuje dla bozonów



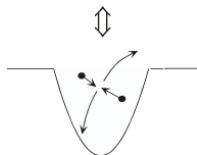
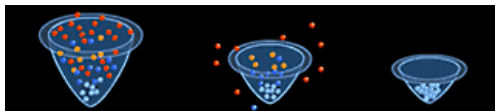
- wymuszone chłodzenie przez odparowanie; główne zagadnienie: zderzenia i retermalizacja



- wymuszone chłodzenie przez odparowanie; **główne zagadnienie: zderzenia i retermalizacja**



- wymuszone chłodzenie przez odparowanie; **główne zagadnienie: zderzenia i retermalizacja**

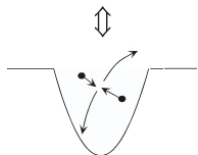
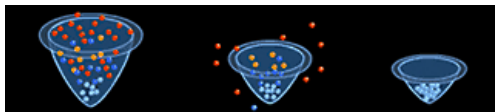


$$\eta = \frac{U}{kT}$$

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \left(\frac{U_i}{U}\right)^{1.3} = \left(\frac{N_i}{N}\right)^{6.8}, \quad \eta = 10$$

$$\frac{\gamma}{\gamma_i} = \left(\frac{U}{U_i}\right)^{0.69}$$

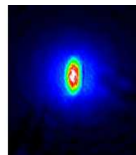
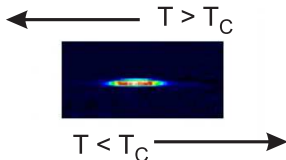
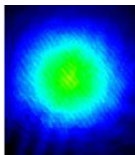
- wymuszone chłodzenie przez odparowanie; **główne zagadnienie: zderzenia i retermalizacja**



$$\eta = \frac{U}{kT}$$

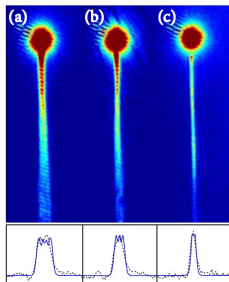
$$\frac{\rho}{\rho_i} = \left(\frac{U_i}{U}\right)^{1.3} = \left(\frac{N_i}{N}\right)^{6.8}, \quad \eta = 10$$

$$\frac{\gamma}{\gamma_i} = \left(\frac{U}{U_i}\right)^{0.69}$$



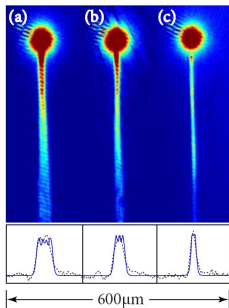
| | laser atomowy | laser |
|--------------------|---|-------------------------|
| na wyjściu | spójne fale materii | spójne fale EM |
| rezonator | pułapka | lustra |
| ośrodek czynny | termiczna chmura zimnych atomów | ośrodek ze wzmacnieniem |
| wzbudzenie ośrodka | chłodzenie przez odparowanie | pompowanie |
| | wymuszona emisja bozonów w tym samym modzie | |
| próg | temperatura krytyczna | wzmocnienie progowe |
| limit | zasada nieoznaczoności | dyfrakcja |

| | laser atomowy | laser |
|--------------------|---|-------------------------|
| na wyjściu | spójne fale materii | spójne fale EM |
| rezonator | pułapka | lustro |
| ośrodek czynny | termiczna chmura zimnych atomów | ośrodek ze wzmacnieniem |
| wzbudzenie ośrodka | chłodzenie przez odparowanie | pompowanie |
| | wymuszona emisja bozonów w tym samym modzie | |
| próg | temperatura krytyczna | wzmocnienie progowe |
| limit | zasada nieoznaczoności | dyfrakcja |



PRA 77 063618 (2008)

| | laser atomowy | laser |
|--------------------|---|-------------------------|
| na wyjściu | spójne fale materii | spójne fale EM |
| rezonator | pułapka | lustra |
| ośrodek czynny | termiczna chmura zimnych atomów | ośrodek ze wzmacnieniem |
| wzbudzenie ośrodka | chłodzenie przez odparowanie | pompowanie |
| | wymuszona emisja bozonów w tym samym modzie | |
| próg | temperatura krytyczna | wzmacnienie progowe |
| limit | zasada nieoznaczoności | dyfrakcja |



PRA 77 063618 (2008)

jakość wiązki:

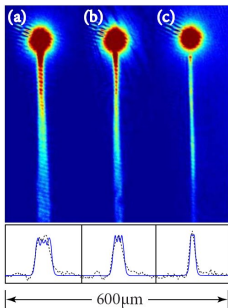
- optyka:

$$M^2 = \frac{w_{0R}\theta_{0R}}{w_0\theta_0}$$

- optyka atomów:

$$M^2 = \frac{2}{\hbar} \Delta x \Delta p_x$$

| | laser atomowy | laser |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|
| mody | jednomodowy | jedno/wielomodowy |
| mody | najniższy mod | wysokie mody rezonatora |
| oddziaływania | tak | nie |
| | atomy nie mogą być kreowane | fotony mogą być kreowane |
| gravitacja | istotna | nieistotna |
| | równowaga termodynamiczna | brak równowagi |



PRA 77 063618 (2008)

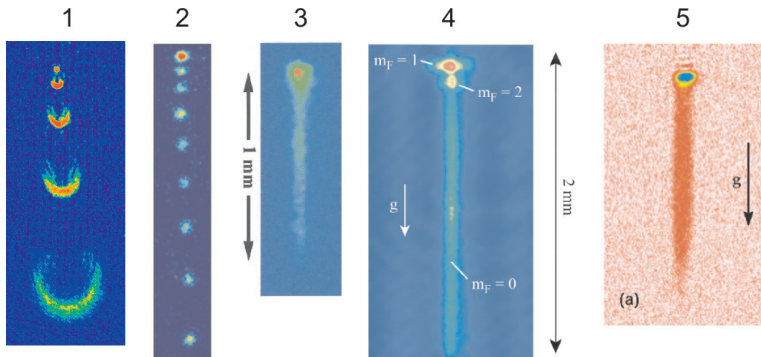
jakość wiązki:

- optyka:

$$M^2 = \frac{w_{0R}\theta_{0R}}{w_0\theta_0}$$

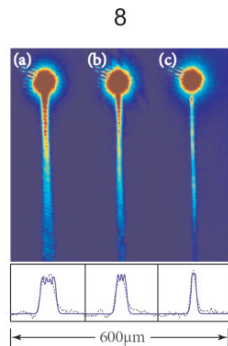
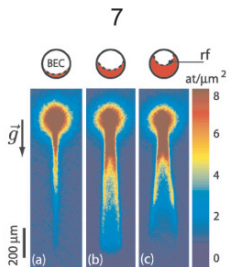
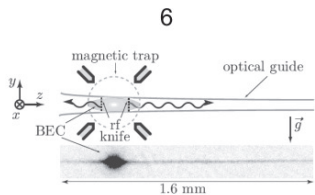
- optyka atomów:

$$M^2 = \frac{2}{\hbar} \Delta x \Delta p_x$$



- 1. Ketterle, 1997, MIT
- 2. Kasevich, 1998, Yale
- 3. Phillips, 1998, NIST

- 4. Esslinger, 1999, ETH
- 5. Weitz, 2003, Tübingen



- 6. Aspect, 2006, Orsay
- 7. Aspect, 2006, Orsay
- 8. Close, 2008, Canberra

Ecole Normale Supérieure → Laboratoire Kastler Brossel → grupa „wiązek atomowych”



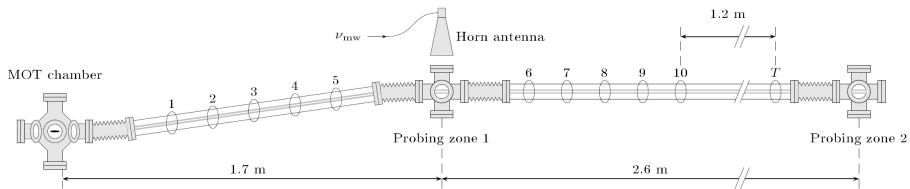
David Guéry-Odelin Matthew Jeppesen TK Gaël Reinaudi Antoine Couvert

obecnie: Tuluza, Université Paul Sabatier → Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité
→ Atomes Froids

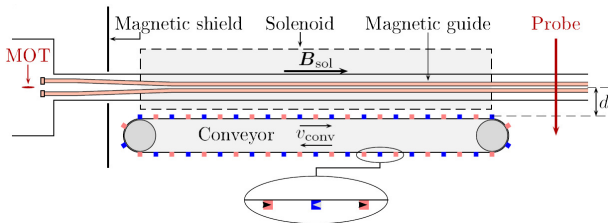
- cel: konstrukcja lasera atomowego o działaniu ciągłym
- alternatywna droga: **chłodzenie atomów w wiązce**

- cel: konstrukcja lasera atomowego o działaniu ciągłym
- alternatywna droga: **chłodzenie atomów w wiązce**
- zalety:
 - duże natężenie wiązki atomów
 - laser o pracy naprawdę ciągłej

- cel: konstrukcja lasera atomowego o działaniu ciągłym
- alternatywna droga: **chłodzenie atomów w wiązce**
- zalety:
 - duże natężenie wiązki atomów
 - laser o pracy naprawdę ciągłej
- problemy:
 - chłodzenie przez odparowanie w 2D — mało efektywne (mała częstość zderzeń)
 - krótki czas dostępny na odparowanie (czas lotu w falowodzie)
 - układ eksperymentalny trudny do realizacji (falowód magnetyczny, anteny RF)



Phys. Rev. A. 72, 033411 (2005)



Phys. Rev. A 74, 033622 (2006)

- ciąg pułapek IP
- odparowanie 3D
- $B_{depth} = 50$ Gs
- $v_{conv} \sim 100$ cm/s

- praktyczna realizacja: dno potencjału dipolowego puęsty optycznej

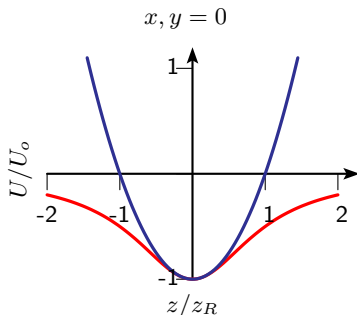
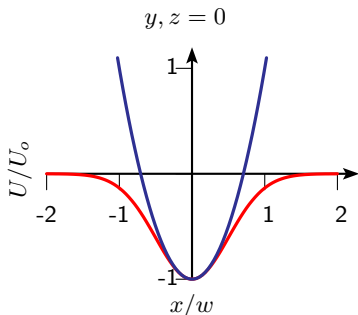
$$U(x, y, z) = -U_0 \frac{w_0^2}{w^2(z)} e^{-2(x^2+y^2)/w^2(z)}$$

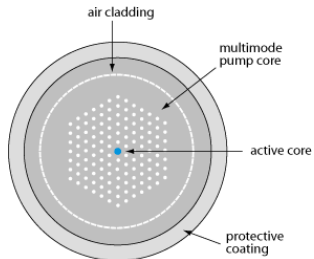
$$w^2(z) = w_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_R^2}\right), \quad z_R = \pi w_0^2 / \lambda$$

- praktyczna realizacja: dno potencjału dipolowego puęsty optycznej

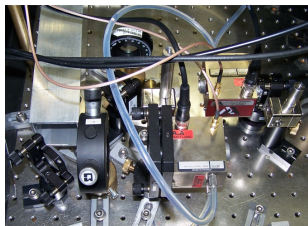
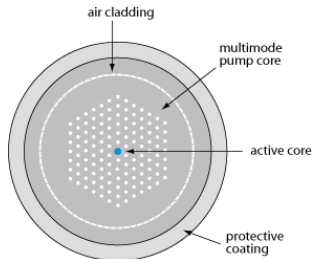
$$U(x, y, z) = -U_0 \frac{w_0^2}{w^2(z)} e^{-2(x^2+y^2)/w^2(z)}$$

$$w^2(z) = w_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_R^2}\right), \quad z_R = \pi w_0^2 / \lambda$$

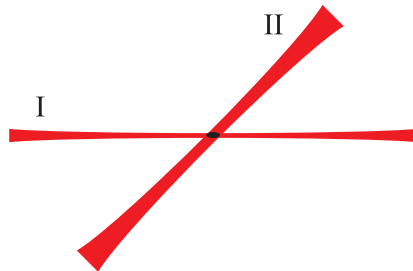
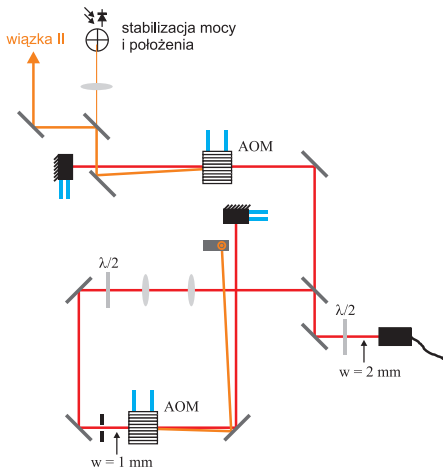




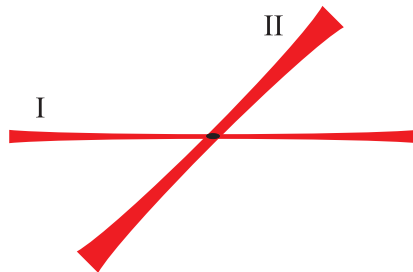
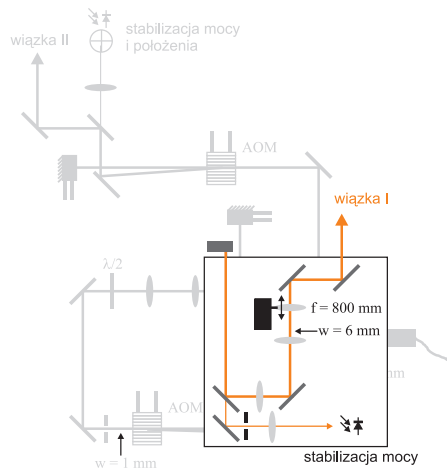
- IPG LASER, YLR-300-LP
- $\lambda = 1072 \text{ nm}$
- $\text{FWHM} = 4 \text{ nm}$
- $P_{max} = 300 \text{ W}$



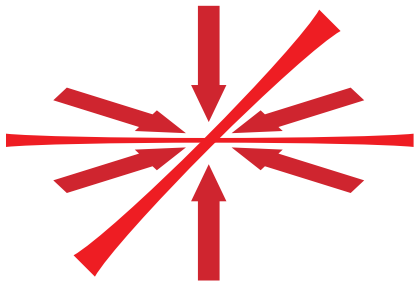
- IPG LASER, YLR-300-LP
- $\lambda = 1072 \text{ nm}$
- $\text{FWHM} = 4 \text{ nm}$
- $P_{max} = 300 \text{ W}$



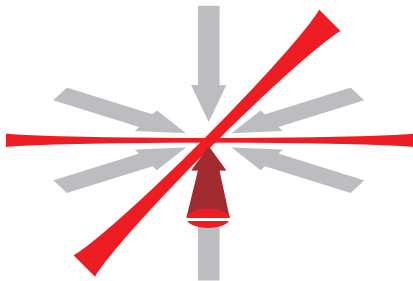
- $P_{ini}^I = 24 \text{ W}$
- $P_{ini}^{II} = 100 \text{ W}$
- $w_0^I = 40 \mu\text{m}$
- $w_0^{II} = 150 \mu\text{m}$



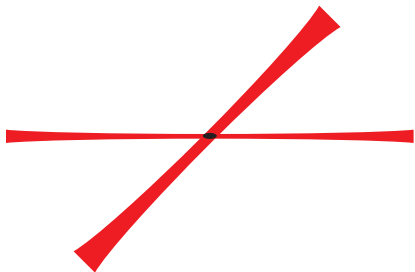
- $P_{ini}^I = 24 \text{ W}$
- $P_{ini}^{II} = 100 \text{ W}$
- $w_0^I = 40 \text{ }\mu\text{m}$
- $w_0^{II} = 150 \text{ }\mu\text{m}$



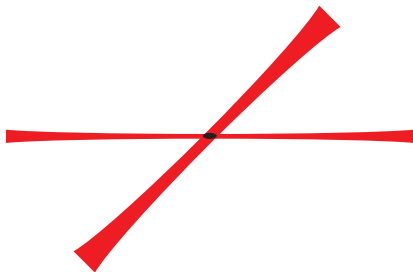
- MOT z 2D gradientem pola B dla ^{87}Rb
- spowalnicz zeemanowski
- szybkość ładowania: 2×10^{10} at/s



- lokalnie ciemny MOT
- czas ładowania: 0.5...2.0 s
- pompowanie optyczne do $F = 1$



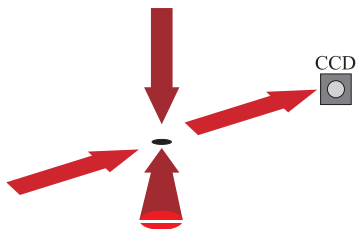
- pułapka dipolowa
- po 50 ms: $N_{at} = 5 \times 10^7$ at.,
 $\rho = 5 \times 10^{12}$ at/cm³, $T = 70\mu\text{K}$



- chłodzenie przez odparowanie
- $P^I(t) = P_{ini}^I(1 + t/\tau)^{-\beta}$
- $P^{II}(t) = a \cdot P_{ini}^I + b$

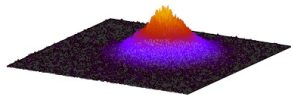
- pułapka dipolowa
- po 50 ms: $N_{at} = 5 \times 10^7$ at.,
 $\rho = 5 \times 10^{12}$ at/cm³, $T = 70\mu\text{K}$

- $P_{fin}^I = 100$ mW
- $P_{fin}^{II} = 10$ W
- $\nu_{fin}^\perp = 245$ Hz
- 10^5 atomów

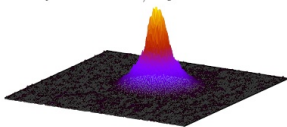


- standardowe obrazowanie absorpcyjne
- pomiary TOF (do 30 ms)

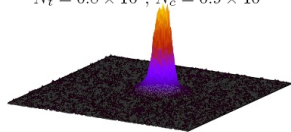
$T = 317 \text{ nK}$
 $N_t = 4.2 \times 10^5, N_c = 0$



$T = 176 \text{ nK}$
 $N_t = 2.6 \times 10^5, N_c = 0.4 \times 10^5$

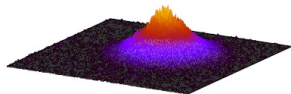


$T = 80 \text{ nK}$
 $N_t = 0.8 \times 10^5, N_c = 0.9 \times 10^5$

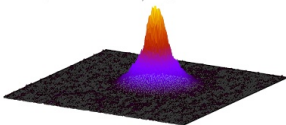


BEC co około 5 s

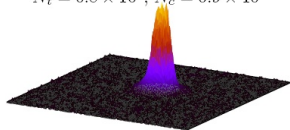
$$T = 317 \text{ nK}$$
$$N_t = 4.2 \times 10^5, N_c = 0$$



$$T = 176 \text{ nK}$$
$$N_t = 2.6 \times 10^5, N_c = 0.4 \times 10^5$$



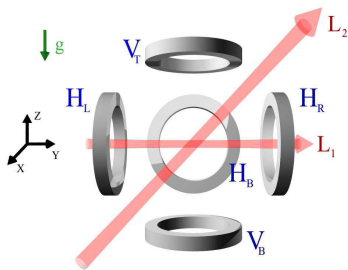
$$T = 80 \text{ nK}$$
$$N_t = 0.8 \times 10^5, N_c = 0.9 \times 10^5$$



BEC co około 5 s

Ważne zagadnienia:

- optymalizacja chłodzenia przez odparowanie
- stabilność układu — mocy i jakości przestrzennej wiązek, kierunku wiązek
- kontrola szybkości podgrzewania chmury atomów

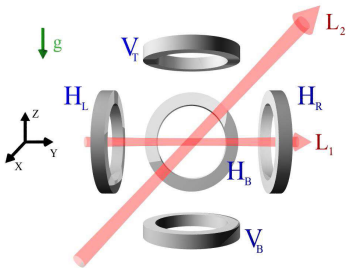


$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = m_F g_F \mu_B |\vec{B}|$$
$$g_F = -1/2 \text{ dla } F = 1$$

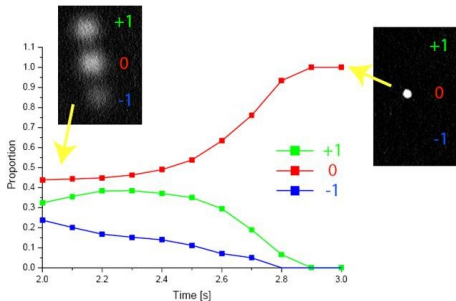
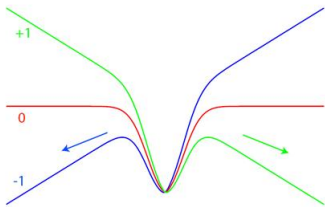
gradient pola magnetycznego wytwarzany przez jedną z cewek: V_T, V_B, H_B podczas chłodzenia przez odparowanie:

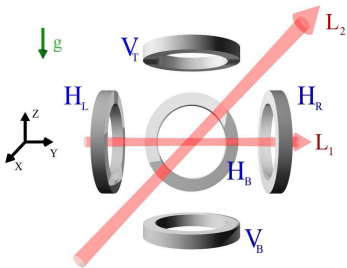
⇒ dodatkowa siła działająca na atomy, prostopadła do osi falowodu (\hat{y})

⇒ oczyszczanie spinu (spin distillation) do wybranego stanu m_F dzięki kombinacji chłodzenia przez odparowanie i chłodzenia pośredniego (sympathetic cooling)

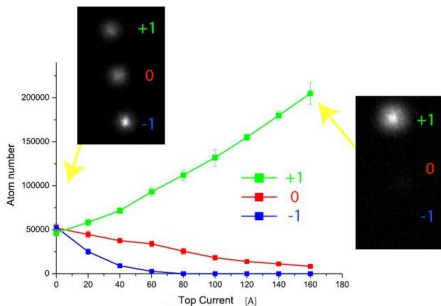
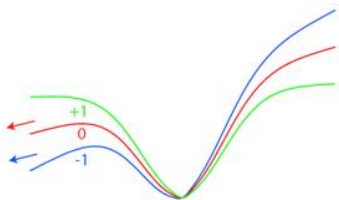


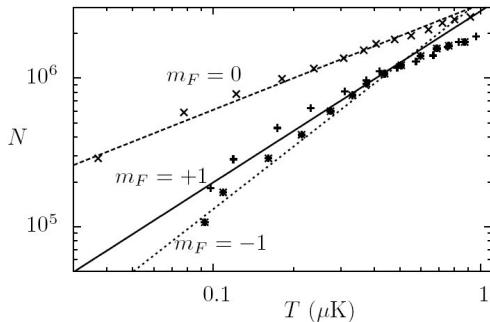
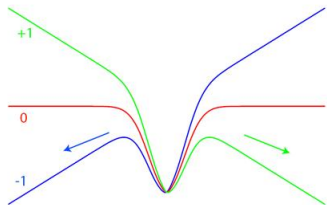
oczyszczanie do $m_F = 0$: cewka H_B
 przyciąganie atomów w $m_F = +1$
 odpychanie atomów w $m_F = -1$



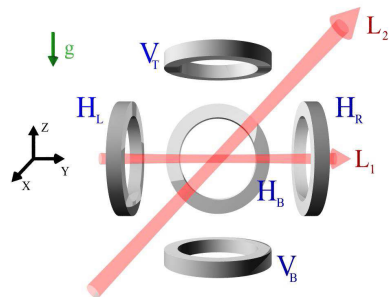


oczyszczanie do $m_F = +1$: cewka V_B
odpychanie atomów w $m_F = +1$
przyciąganie atomów w $m_F = -1$
+ wpływ gravitacji!

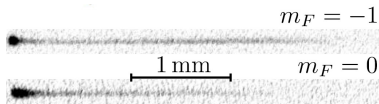




- atomy we wszystkich stanach m_F — ta sama temperatura podczas chłodzenia przez odparowanie
- wyliczone parametry η : 5.1 dla $m_F = 0$, 4.5 dla $m_F = \pm 1$



- zwiększenie gradientu pola magnetycznego $0 \rightarrow 18$ Gs/cm cewek H_L lub H_R — do osiągnięcia progu
- transfer atomów do falowodu przez zwiększanie gradientu pola $18 \rightarrow 22$ Gs/cm przez 200 ms (efekt Zeemana I lub II rzędu)
- średnie przyspieszenie atomów w stanie $m_F = -1$: $\bar{a} = 6.4 \text{ m/s}^2$

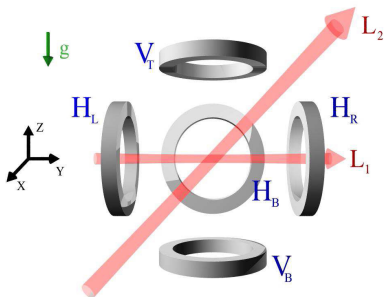


- średni strumień atomów:
 $\bar{\Phi} = 5 \times 10^5 \text{ atom/s}$
- liczba obsadzonych modów poprzecznych (jakość wiązki):

$$\frac{1}{2}m(\Delta v)^2 = \frac{\hbar\omega_z}{2} \left(\langle n \rangle + \frac{1}{2} \right)$$

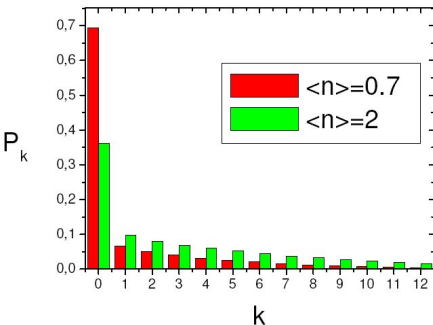
$$\langle n \rangle = 0.65 \pm 0.05 \text{ at } m_F = 0$$

$$\langle n \rangle = 0.8 \pm 0.3 \text{ at } m_F = -1$$



- zwiększenie gradientu pola magnetycznego $0 \rightarrow 18$ Gs/cm cewek H_L lub H_R — do osiągnięcia proggu
- transfer atomów do falowodu przez zwiększanie gradientu pola $18 \rightarrow 22$ Gs/cm przez 200 ms (efekt Zeemana I lub II rzędu)
- średnie przyspieszenie atomów w stanie $m_F = -1$: $\bar{a} = 6.4$ m/s²





gęstość liniowa + $\langle n \rangle$ + model \Rightarrow
prawdopodobieństwo P_k obsadzenia stanu k
w falowodzie ($\epsilon_k = k\hbar\omega$)

Plany:

- stabilizacja położenia wiązki poziomej (falowodu)
- zredukowanie frakcji termicznej w chmurze atomów
- uwalnianie atomów w większym stopniu adiabaticznie (optymalizacja zmian gradientu pola magnetycznego)
- badanie zagadnień z optyki atomów, a w tym — konstrukcja rozdzielacza wiązek
- badanie przepływu cieczy kwantowej

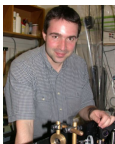
Tomasz Dohnalik



Leszek Józefowski



Tomasz Kawalec



Jacek Fiutowski
doktorant



Dobrosława Bartoszek
doktorantka



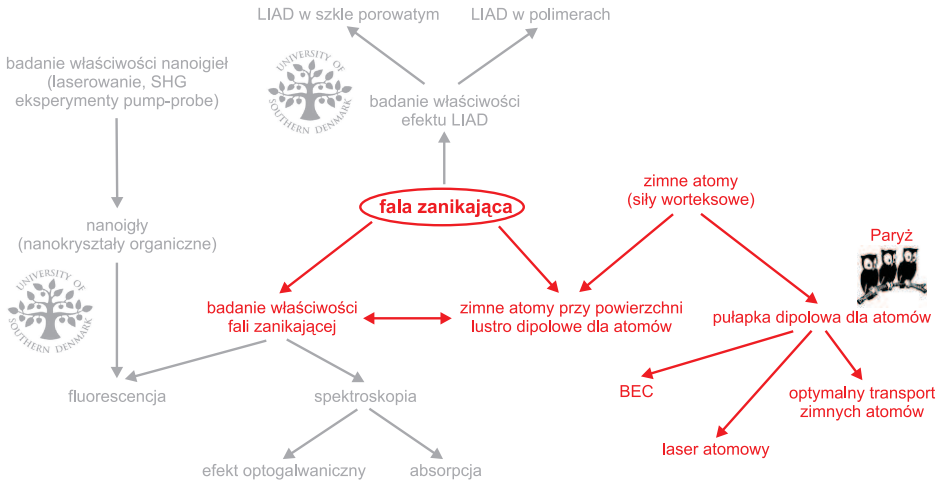
Tomasz Urbańczyk
magistrant

współpraca:



SDU, Odense, Sønderborg



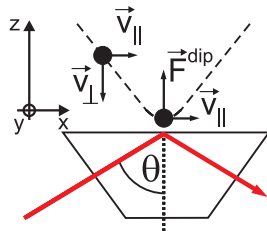
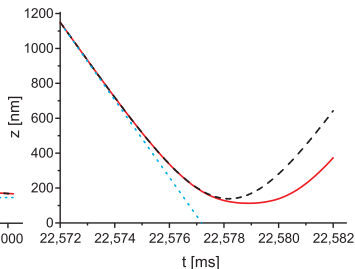
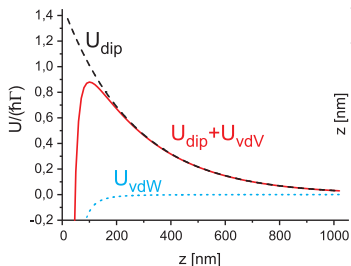


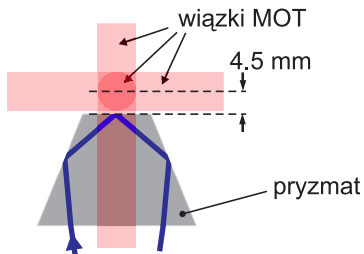
całkowity potencjał w optycznym lustrze dipolowym (przybliżenie):

$$U(\vec{r}) = U_{dip} + U_{vdW} + U_{grav} = \frac{3\pi c^2}{2\omega_0^3} \frac{\Gamma}{\Delta} I(\vec{r}) - \frac{A}{z^3} + mgz$$

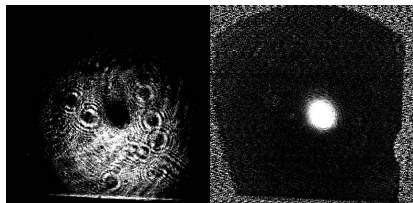
natężenie fali zanikającej:

$$I(\vec{r}) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2}{w^2 \cos^2 \theta}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{w^2}\right) \exp\left(-\frac{2z}{d}\right)$$

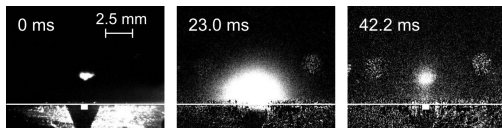




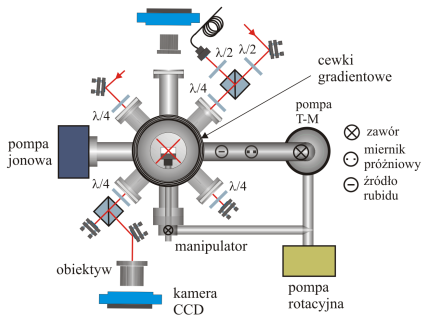
temperatura $\sim 10 - 15 \mu K$
liczba atomów $\sim 10^7$



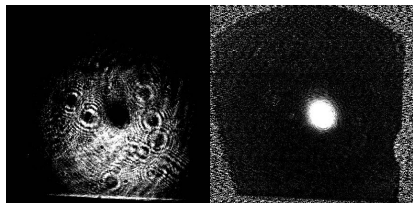
obrazowanie absorpcyjne



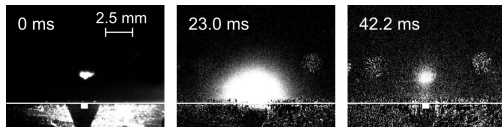
obrazowanie fluorescencyjne



temperatura $\sim 10 - 15 \mu K$
 liczba atomów $\sim 10^7$



obrazowanie absorpcyjne



obrazowanie fluorescencyjne

Obecnie:

- pomiar potencjału vdW
- obserwacja wpływu lustra dipolowego na wewnętrzne (dekoherencja) i zewnętrzne (przekaz pędu) stopnie swobody atomów

Plany:

- obserwacja odbicia kwantowego
- pomiar potencjału Casimira-Poldera
- użycie plazmonów powierzchniowych i konstrukcja „ciemnego” lustra dipolowego
- zbadanie chaosu kwantowego w „wibrującym” lustrze optycznym