

Utjecaj magnetskog polja na karakteristične veličine oblaka ultrahladnih atoma rubidija

Domagoj Kos

PMF, Fizički odsjek, Bijenička 32, HR-10 000 Zagreb, Croatia

Gradijent magnetskog polja nužan je za punjenje magneto-optičke zamke. U ovom radu proučava se ovisnost parametara ultrahladnog oblaka ^{87}Rb o iznosu gradijenta magnetskog polja.

UVOD

Lasersko hlađenje neutralnih atoma je metoda poznata od kraja 1980-ih godina [1]. Bazira se na ciklusima apsorpcije i spontane emisije u atomu, a omogućuje hlađenje atoma do temperatura reda veličine $100\ \mu\text{K}$. Uz dodatak vanjskog magnetskog polja formira se magneto-optička zamka (eng. *magnetic-optical trap*, skraćeno MOT) koja zarobljuje ohlađene atome te se formira ultrahladni oblak tih atoma. Ovakav sustav omogućuje istraživanja u atomskoj fizici na temperaturama gdje je Dopplerovo širenje linija zanemarivo. Evaporativnim hlađenjem ultrahladnog oblaka atoma moguće je temperaturu još više sniziti, te je formiranje ultrahladnog oblaka ključan korak za dobivanje Bose-Einsteinovog kondenzata (BEC).

Vanjsko magnetsko polje uzrokuje Zeeman cijepanje nivoa atoma. U nehomogenom magnetskom polju s konstantnim gradijentom $\partial B/\partial z$, cijepanje nivoa raste linearno sa z . Na određenoj udaljenosti od centra zamke prijelazi između sad razdvojenih nivoa će se događati samo ako zbroj Dopplerovog pomaka i frekvencije lasera budu jednaki frekvenciji prijelaza. Ako se frekvencija lasera smanji u odnosu na frekvenciju prijelaza, ukupna sila dva antiparalelna laserska snopa koja djeluju na atom je:

$$\vec{F}_{\text{MOT}}(z) = \pm \frac{\hbar \vec{k} \gamma s_0 / 2}{1 + s_0 + [2(\delta \mp |\omega_D| \mp \mu' B / \hbar) / \gamma]^2}, \quad (1)$$

gdje je $\hbar \vec{k}$ impuls koji foton preda atomu, γ prirodna širina linije, s_0 saturacijski koeficijent, δ frekvencijski pomak lasera od frekvencije prijelaza, $\omega_D = \vec{k} \vec{v}$ Dopplerov pomak frekvencije prijelaza zbog brzine atoma \vec{v} , $\mu' = (g_e m_e - g_g m_g)$ efektivni magnetski moment za dani prijelaz iz pobuđenog stanja $|e\rangle$ u osnovno stanje $|g\rangle$, a B iznos magnetnog polja koje djeluje na atom [2].

Možemo uvesti oznaku $|\omega_z| = \mu' B / \hbar$, te ako su $|\omega_z|$ i $|\omega_D|$ mali u odnosu na γ , sila se može razviti i zadržati samo linearne članove, te poprima oblik

$$F_{\text{MOT}} \approx -\beta v - \kappa z, \quad (2)$$

gdje je $\beta = \frac{8\hbar k^2 \delta s_0}{\gamma(1+s_0+(2\delta/\gamma)^2)}$, dok veličina κ ima ovisnost

$$\kappa = \frac{\partial B}{\partial z} \frac{\mu' \beta}{\hbar k}. \quad (3)$$

Iz danih jednadžbi se vidi da sila koju osjećaju atomi ima oblik gušenog harmoničkog oscilatora s konstantom κ koja ovisi o gradijentu magnetskog polja.

EKSPERIMENTALNI POSTAV

Eksperimentalni postav čini standardni postav za uspostavu MOT-a, 6 laserskih zraka koje se presjecaju u centru staklene ćelije s rubidijem, te dvije zavojnice u anti-helmholtzovoj konfiguraciji.

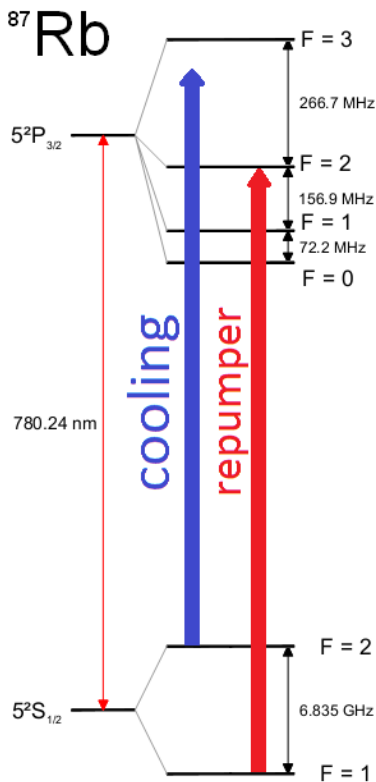
Ćelija ima 6 staklenih prozora promjera $3.85\ \text{cm}$ za 3 okomite laserske zrake i njihove refleksije, te dva manja prozora, gdje je ispred jednog od njih bila postavljena web kamera Logitech C210 kojoj je maknut IC filter. Na ćeliju je spojena pumpa *Varian Vaclon Plus 55 Starcell* koja održava niski vakuum od $p_{\text{pozadinski}} \simeq 3 \cdot 10^{-8}\ \text{mbar}$.

Rubidij se u ćeliju ispušta preko dispenzera spojenog na izvor istosmjerne struje. Joulova toplina koja se razvija u dispenzeru grije rubidij te on isparava u ćeliju. Struja koja je bila puštana kroz dispenzer iznosila je $I_{\text{dispenzer}} = 3.95\ \text{A}$.

Korištena su dva laserska sistema, laser za hlađenje (eng. *cooling laser*), koji izaziva prijelaze $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F=3)$, te laser za naseljavanje, koji vraća atome ispale iz ciklusa prijelaza za hlađenje (eng. *repumper*), izazivajući prijelaze $5S_{1/2}(F=1) \rightarrow 5P_{3/2}(F=2)$. Na Slici 1 prikazani su energijski nivoi ^{87}Rb relevantni za hlađenje.

Oba korištena lasera su *Toptica Photonics DL100*, poluvodički diodni laseri u Littrowovom postavu s mogućnošću podešavanja valne duljine. Laser za hlađenje koristi diodu *Toptica Photonics LD-0780-0200-1*, snage $69\ \text{mW}$ na temperaturi $T = 20.5\ ^\circ\text{C}$ i struji $I = 118\ \text{mA}$. Laser za naseljavanje koristi diodu *Sharp LT024MDO*, snage $5.5\ \text{mW}$ na temperaturi $T = 15.2\ ^\circ\text{C}$ i struji $I = 81.8\ \text{mA}$.

Nakon lasera postavljena je različita optička aparatura, kao polarizacijska kocka koja spaja zrake lasera za hlađenje i lasera za naseljavanje, leće koje proširuju snop lasera na širinu od $2.54\ \text{cm}$, zatim dvije polarizacijske kocke koje dijele snop na tri zrake i pripadna zrcala koja te zrake usmjeravaju na međusobno okomite prozore ćelije, te tzv. retro-zrcala koja svaki od tri snopa reflektira nazad. Laseri su cirkularno polarizirani što se postiže uporabom $\lambda/4$ pločica. Intenziteti ulaznih zraka



Slika 1: Energijski nivoi za ^{87}Rb te označeni prijelazi za hlađenje s tzv cooling laserom i prijelazi za naseljavanje s tzv repumper laserom

su 7.4 mW , 8.3 mW te 3.1 mW . Intenziteti nisu jednaki jer niti gradijenti polja u sva tri smjera nisu jednaki, što izlazi iz $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$.

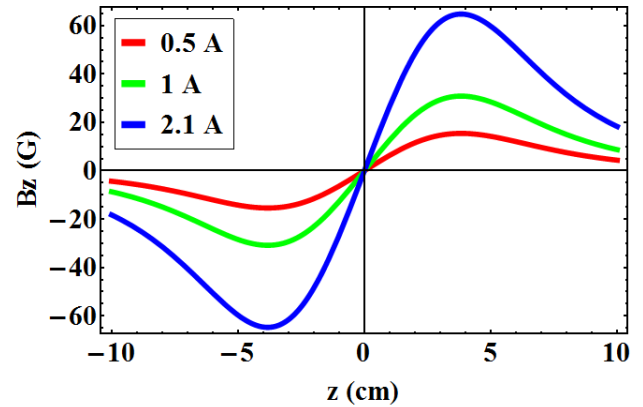
Zavojnice oko ćelije su postavljene u anti-helmholtzovu konfiguraciju, svaka radijusa $R_{helm} = 5.9 \text{ cm}$ s $n = 423$ navoja. Maksimalna struja kroz zavojnice je bila $I_{max} = 2.1 \text{ A}$. Jakost polja koje stvara ovakva konfiguracija može se opisati izrazom [3]

$$B(z) = \frac{\mu \cdot I \cdot n}{2} \left(\frac{R^2}{(R^2 + (z - \frac{R}{2})^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{R^2}{(R^2 + (z + \frac{R}{2})^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (4)$$

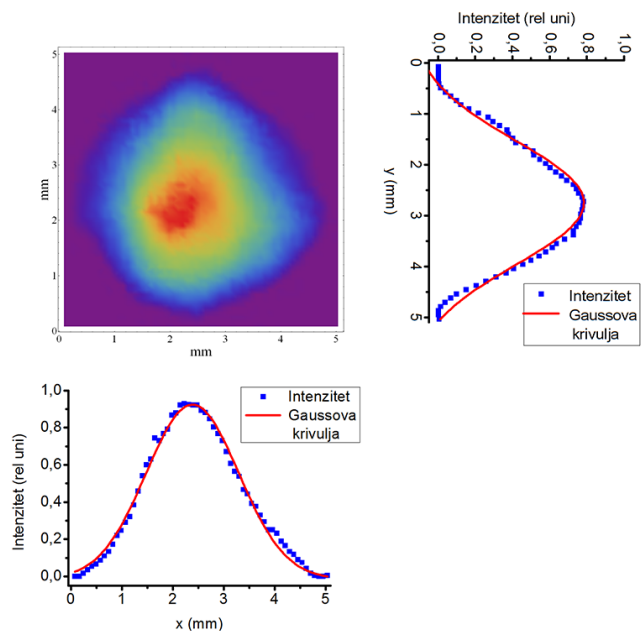
Slika 2 pokazuje z komponentu magnetskog polja za 3 različite struje kroz zavojnice. Kao što se vidi, za male pomake u z gradijent $\frac{\partial B}{\partial z}$ je konstantan, te povećanjem struje kroz zavojnicu iznos gradijenta se povećava.

REZULTATI

Na Slici 3 prikazan je oblak atoma ^{87}Rb uhvaćenih u magnetno-optičku zamku. Oblak nije u potpunosti sferno simetričan zbog nejednakih intenziteta upadnih i retro zraka. To izaziva jaču silu u jednu stranu, te samim time i zanemarivo curenje atoma van zamke.



Slika 2: Jakost z komponente magnetskog polja B za različite struje kroz anti-helmholtzovu konfiguraciju zavojnica

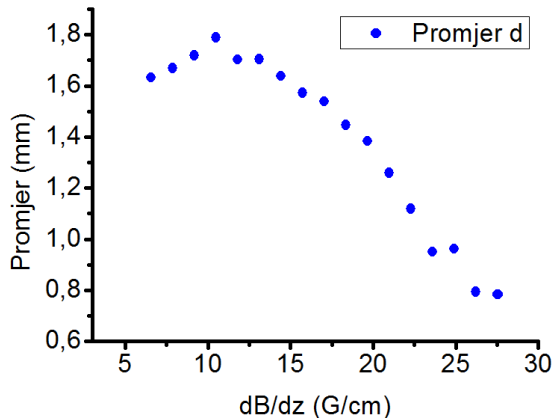


Slika 3: Oblik ultrahladnog oblaka u magneto-optičkoj zamci te prostorne raspodjele atoma u oblaku

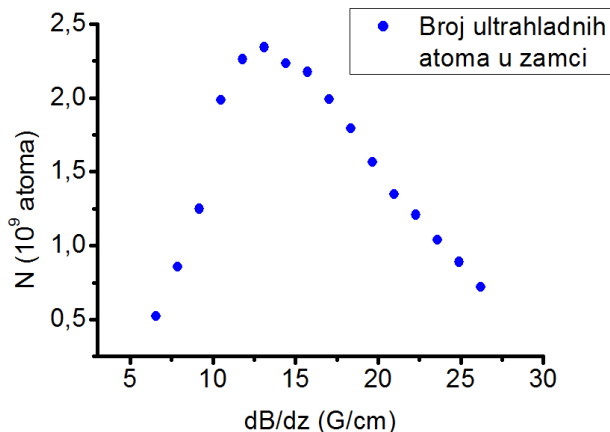
Grafovi na Slici 3 prikazuju prostornu raspodjelu atoma za dva okomita smjera. Na grafovima je također prikazana i Gaussova krivulja prilagođena na prostornu raspodjelu. Iz toga je moguće dobiti širinu krivulje, a samim time i promjer oblaka za danu struju.

Ovakvim računanjem promjera oblaka za različite struje kroz zavojnice, tj gradijente magnetskog polja, dobivena je Slika 4 koja prikazuje ovisnost promjera oblaka o gradijentu magnetskog polja.

Slika 5 pokazuje broj ultrahladnih ^{87}Rb atoma unutar zamke u ovisnosti o gradijentu polja dobiven iz ranije mjenjenih krivulja vremenske ovisnosti punjenja MOT-a za različite $\frac{\partial B}{\partial z}$ [4].



Slika 4: Ovisnost promjera oblaka o gradijentu magnetskog polja



Slika 5: Broj atoma u MOT-u ovisno o gradijentu magnetskog polja

Jednadžba koja opisuje punjenje zamke atomima je

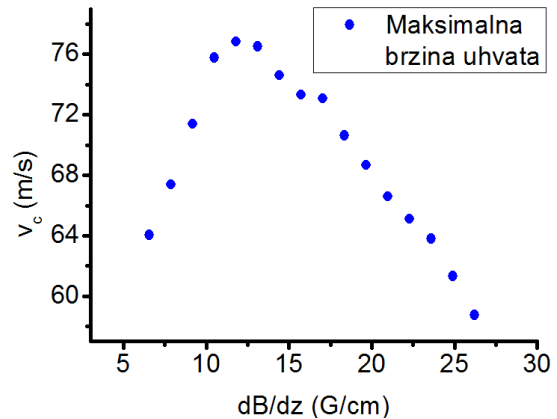
$$\frac{dN(t)}{dt} = R_{MOT} - \Gamma_{MOT}N(t), \quad (5)$$

gdje je Γ_{MOT} gubitak atoma iz zamke, bilo sudarima s česticama pozadinskog tlaka ili tokom atoma van zamke zbog neujednačenih sila u svim smjerovima, a R_{MOT} je brzina punjenja zamke, dana izrazom

$$R_{MOT} = \frac{n_{Rb}V^{2/3}v_c^4}{2((2k_B T)/m)^{3/2}}. \quad (6)$$

te ovisi o pozadinskoj koncentraciji atoma Rb n_{Rb} , njihovoj temperaturi $T = 298 K$, volumenu presjeka laserskih zraka V , maksimalnoj brzini koju atom može imati da upadne zamku v_c i masi atoma ^{87}Rb m .

U stacionarnom stanju je $\frac{dN}{dt} = 0$ te je $R_{MOT} = \Gamma_{MOT}N$. Iz eksperimentalnih podataka za Γ_{MOT} i N određena je maksimalna brzina uhvata v_c , prikazana na Slici 6. Brzina v_c je maksimalna brzina koju atom može imati da bi bio ohlađen i zarobljen unutar MOT-a. Atomi s većom početnom brzinom ($v > v_c$) prolaze kroz prostor presjecišta zraka i djelomično se ohlade, ali ne dovoljno da bi ostali zarobljeni u zamci.

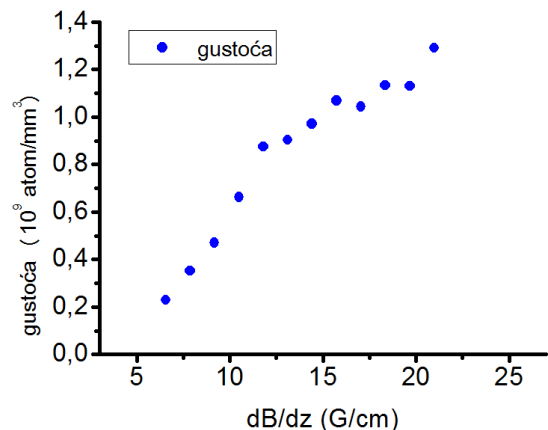


Slika 6: Maksimalna brzina uhvata ovisno o gradijentu magnetskog polja

Ako pretpostavimo sferičan oblik oblaka moguće je izračunati gustoću oblaka preko

$$\rho = \frac{N}{\frac{\pi}{6}d^3}. \quad (7)$$

Slika 7 prikazuje dobivene vrijednosti gustoća za promjere oblaka prikazane na Slici 4, a broj atoma u zamci na Slici 5.

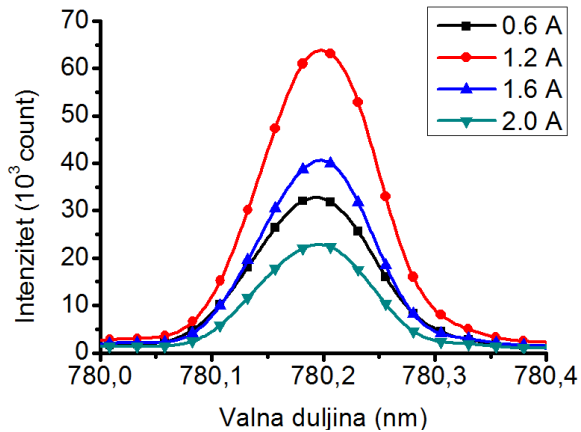


Slika 7: Gustoće oblaka atoma Rb u magnetsko-optičkoj zamci za različite gradijente magnetskog polja

Atomi zarobljeni u zamku pobuđeni su laserom te se relaksiraju procesom spontane emisije. Intenzitet zračenja

proporcionalan je broju ultrahladnih atoma u oblaku. Iz spektra se vidi da atomi zrače frekvencijom koja odgovara rezonantnom $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ prijelazu.

Na Slici 8 prikazan je spektar zračenja iz ultrahladnog oblaka ^{87}Rb za 4 različite struje kroz zavojnice. Ova nezavisna metoda mjerenja broja atoma u skladu je s rezultatima prikazanim na Slici 5.



Slika 8: Ovisnost intenziteta spektra o struji kroz zavojnice

ZAKLJUČAK

Iz prikazanih podataka vidimo da postoji optimalni gradijent magnetskog polja za idealne uvijete rada MOT-a u našem eksperimentu. Taj optimalni gradijent rezultira u najvećem radijusu oblaka, najvećem broju atoma

unutar zamke i najvećoj maksimalnoj brzini uhvata. On iznosi 13.1 G/cm, a postiže se puštanjem struje od 1 A kroz anti-helmholtzovu konfiguraciju zavojnica.

Ovakvo ponašanje nije iznenađujuće, jer jednačba 2 govori o povećanju sile koja djeluje na atom povećanjem magnetskog polja. Pad mjerenih veličina daljnjim povećanjem polja nakon prelaska vrijednosti gradijenta od 13.1 G/cm ukazuje na slabljenje efikasnosti zamke. Povećanje magnetskog polja dovodi do povećanja procjepa u Zeemanovom cijepanju, te dolazi do smanjenja vjerojatnosti prijelaza jer Dopplerov pomak i frekvencija lasera više nisu u rezonanciji s razlikom energija stanja $5S_{1/2}(F=2)$ i $5P_{3/2}(F=3)$.

ZAHVALE

Želio bih zahvaliti mentorici Dr. sc. Ticijani Ban na omogućavanju izrade ovog seminara u Laboratorij za femtosekundnu lasersku spektroskopiju i pomoći pri samom radu, te ostalim članovima grupe na pomoći koju su mi pružili u laboratoriju, a i van njega.

-
- [1] E. L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, and D. Pritchard, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2631 (1987).
 - [2] H. J. Metcalf and P. van der Straten, *Laser cooling and trapping* (Springer, 1999).
 - [3] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics* (Prentice Hall, 1999).
 - [4] N. Šantić, Master's thesis, Prirodoslovno-Matematički Fakultet, Zagreb (2012).