

Optička bistabilnost u rezonatoru s hladnim atomima

Juraj Gajović

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

Mentor: dr. sc. Ticijana Ban

Institut za fiziku, Centar za napredne laserske tehnike (CALT), Bijenička 46, Zagreb

Sažetak

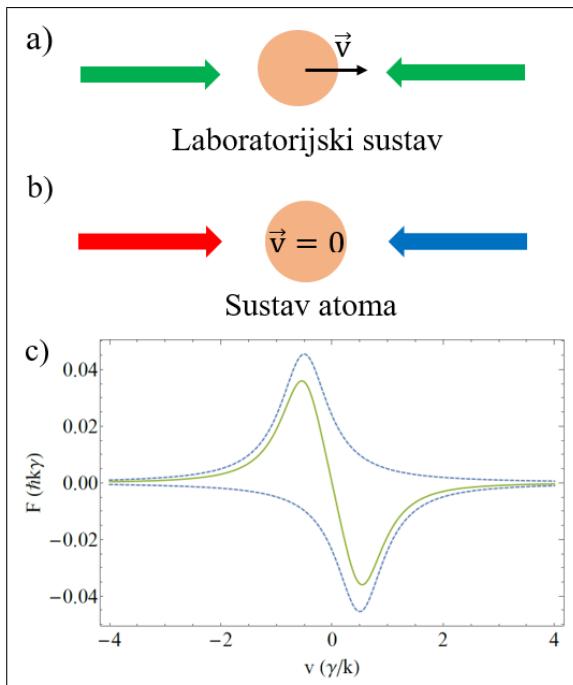
U ovom seminarskom radu istražuje se oblak hladnih atoma rubidija 87 u magneto-optičkoj stupici (MOT). Proučilo se međudjelovanje hladnih atoma s frekventnim češljem u optičkom rezonatoru. Izmjerila se histereza u intenzitetu moda frekventnog češlja transmitiranog kroz rezonator ovisno o frekvenciji frekventnog češlja. Opaženo je da sustav ima dva stabilna stanja u istim uvjetima. Eksperimentalno se ispitala ovisnost histereze o raznim parametrima i predloženo je moguće objašnjenje njenog nastanka vezano za gubitak hladnih atoma u okolini rezonatora.

1 Teorijski uvod

1.1 Lasersko hlađenje

Sustav koji se proučava u ovom seminaru je oblak hladnih atoma rubidija 87. Taj se oblak postiže magneto-optičkom stupicom (eng. *magneto-optic trap*, MOT). MOT je metoda laserskog hlađenja kojom se plin atoma hlađi na temperature do nekoliko mikro kelvina. Atomi se hlade Dopplerovim hlađenjem pomoću lasera frekvencije pomaknute ispod frekvencije atomske rezonancije uz koje se koriste magnetske zavojnice radi zarobljavanja atoma. Detaljan opis metode hlađenja može se naći u doktorskom radu [1].

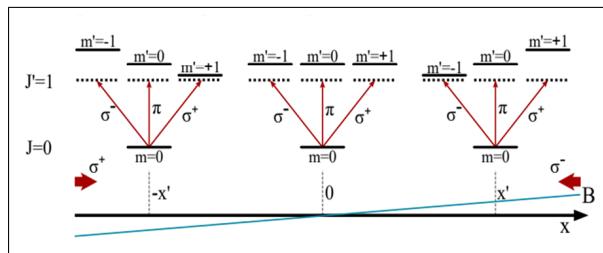
Dopplerovo lasersko hlađenje temelji se na prijenosu količine gibanja na atom pri apsorpciji fotona. Princip rada Dopplerovog hlađenja prikazan je na Slici 1. Atom obasjavamo dvama suprotno propagirajućim zrakama kontinuiranog lasera frekvencije malo manje od rezonantne frekvencije atomskog prijelaza. Radi Dopplerovog efekta, u sustavu atoma, zraka koja se propagira u smjeru kretanja atoma biti će manje frekvencije



Slika 1. Shematski prikaz atoma obasjanog dvama laserskim zrakama za hlađenje u laboratorijskom (a) i u sustavu atoma (b). c) prikazuje ovisnost sile zračenja na atom u odnosu na njegovu brzinu kada je obasjan zrakama za hlađenje. c) je preuzeto iz [1].

u odnosu na frekvenciju u laboratorijskom sustavu. Jednako je tako frekvencija suprotno propagirajuće zrake veća u sustavu atoma. Tada atom vidi da je zraka, koja se propagira suprotno njegovoj brzini, bliža frekvenciji atomske rezonancije te će fotone te zrake vjerojatnije apsorbirati. Takva apsorpcija smanjuje količinu gibanja atoma za vrijednost količine gibanja apsorbiranog fotona. Nakon velikog broja ponavljanja apsorpcije fotona u određenom smjeru i spontane emisije u nasumičnom smjeru, atom se usporava i time hlađi. Za Dopplerovo hlađenje atoma u tri dimenzije potrebno je tri ortogonalna para suprotno propagirajućih laserskih zraka.

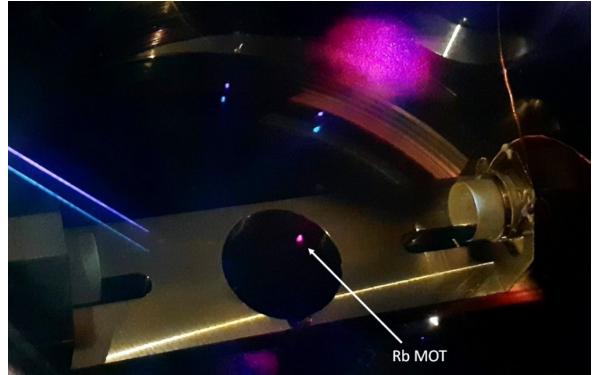
Laserskim hlađenjem tipično se postižu brzine atoma oko 10 cm/s [1]. Kako bi se atomi zarobili u neku točku prostora, uz lasere se koristi gradijent magnetskog polja. Magneto-optička stupica objasniti će se na jednodimenzionalnom primjeru za atom s dvije razine. Princip rada MOT-a prikazan je na Slici 2.



Slika 2. Prikaz principa rada magneto-optičke stupice. Preuzeto iz [1].

Neka osnovno stanje atoma ima $J=0$ a pobudeno $J'=1$ i neka magnetsko polje raste s položajem x i na $x=0$ iščezava. Za negativan x , zbog Zeemanovog pomaka atomskega nivoa, vjerojatnija je apsorpcija laserske zrake za hlađenje prijelazom iz osnovne razine u pobudenu s $m'=+1$. Ako koristimo kružno polarizirane zrake, takva apsorpcija moguća je samo za desno polariziranu (σ^+) zraku. Sada ako je laserska zraka, koja se propagira u pozitivnom smjeru x , σ^+ polarizirana, atomi koji su na negativnoj x poziciji će preferirati promjenu brzine prema $x=0$. Jednako tako ako je zraka, koja se propagira u pozitivnom smjeru x , σ^- polarizirana, atomi na pozitivnoj x

poziciji će također preferirati promjenu brzine prema $x=0$. Time se postiže zarobljavanje atoma oko pozicije $x=0$. U trodimenzionalnom slučaju se za zatočenje u MOT-u koristi magnetsko polje dobiveno dvjema zavojnicama u anti-Helmholtzovoj konfiguraciji.



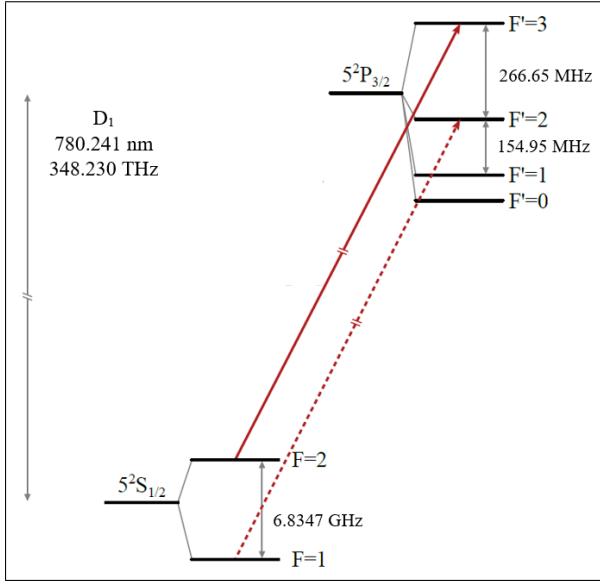
Slika 3. Oblak hladnih ^{87}Rb u eksperimentu postavljen u rezonator u vakuumskoj komori. Preuzeto iz [7].

Na Slici 3 prikazan je oblak hladnih atoma rubidija u MOT-u korišten u istraživanju. Prijelaz koji se koristi za hlađenje ^{87}Rb atoma je $|5^2\text{S}_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2\text{P}_{3/2}, F'=3\rangle$. Frekvencija lasera za hlađenje malo je smanjena ispod rezonantne frekvencije tog prijelaza, pa postoji nezanemariva vjerojatnost prijelaza $|5^2\text{S}_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2\text{P}_{3/2}, F'=2\rangle$. Taj prijelaz izbacuje atome iz ciklusa hlađenja zbog relaksacije u stanje $|5^2\text{S}_{1/2}, F=1\rangle$. Koristi se tzv. laser naseljavanja koji je kontinuirane frekvencije na frekvenciji prijelaza $|5^2\text{S}_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |5^2\text{P}_{3/2}, F'=2\rangle$ i on omogućuje daljnje hlađenje tih atoma.

1.2 Rezonantna šupljina i frekventni češljaj

U istraživanju se proučava međudjelovanje hladnih atoma u MOT-u na obasjavanje frekventnim češljjem. Hladni atomi su smješteni u optički rezonator kojim se pojačava i mijenja to međudjelovanje.

Optički rezonator sastavljen je od dva nasuprotno okrenuta zrcala. Uvjet stvaranja stojnog vala valne duljine λ i frekvencije ν

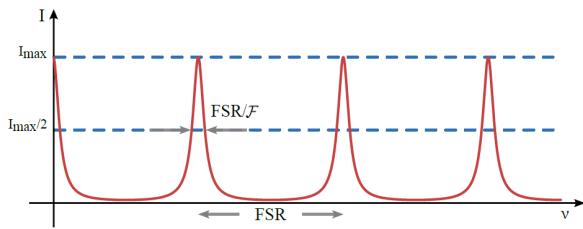


Slika 4. Atomski nivoi ^{87}Rb korišteni za lasersko hlađenje. Puna crvena linija predstavlja prijelaz korišten za hlađenje, a iscrtkana prijelaz kojim se atomi vraćaju u ciklus hlađenja laserom naseljavanja. Preuzeto iz [1].

unutar njega glasi:

$$\lambda_m = \frac{2nL}{m}, \quad \nu_m = \frac{mc}{2nL}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (1.1)$$

pri čemu je L duljina rezonatora, a n indeks loma svjetlosti. Frekventni spektar optičkog rezonatora sastoji se od ekvidistantnih linija udaljenih za $FSR = \nu_{m+1} - \nu_m = \frac{c}{2nL}$ (eng. *free spectral range*). U realnom slučaju te linije imaju neku širinu pa spektar optičkog rezonatora izgleda kao na Slici 5.



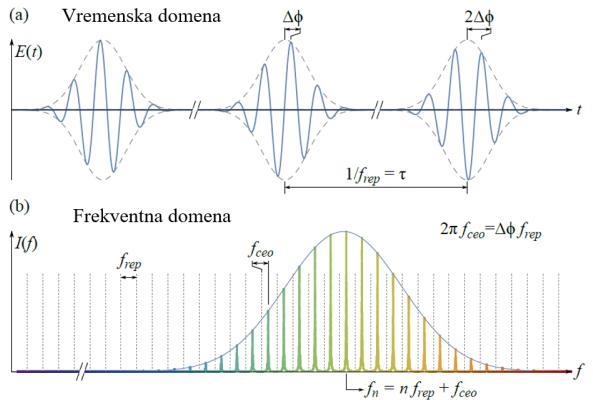
Slika 5. Ovisnost intenziteta svjetlosti unutar optičkog rezonatora o frekvenciji. Preuzeto iz [5].

Frekventni češljaj je naziv za svjetlost čiji se spektar sastoji od niza modova precizno određenih ekvidistantnih frekvencija (Slika 6).

b). Frekvencija pojedinog n -tog moda opisana je s:

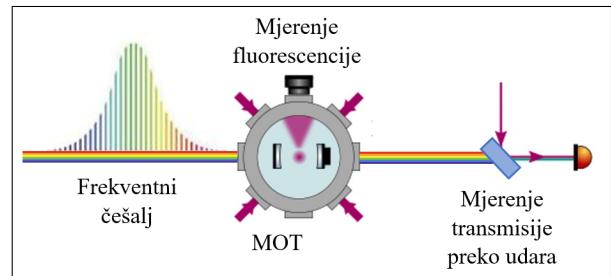
$$f_n = n f_{rep} + f_0, \quad (1.2)$$

pri čemu f_{rep} opisuje razmak između modova, a f_0 referentnu frekvenciju. Laser frekventnog češlja će u vremenskoj domeni biti pulsni femtosekundni laser s fazno koreliranim pulzima. Svojstva svjetlosti takvog lasera prikazana su na Slici 6. Princip rada lasera frekventnog češlja i detaljniji opis optičkog rezonatora mogu se naći u [2–4].



Slika 6. Prikaz svjetlosti frekventnog češlja u vremenskoj (a) i frekventnoj (b) domeni. Preuzeto iz [1].

2 Eksperimentalni postav



Slika 7. Shematski prikaz eksperimentalnog postava.

Eksperimentalni postav sastoji se od MOT-a s ^{87}Rb atomima. Atomi su postavljeni u optički rezonator gdje međudjeluju s frekventnim češljjem. Međudjelovanje se proučava mjeranjem transmisije modova češlja kroz rezonator i mjeranjem fluorescencije oblaka hladnih atoma.

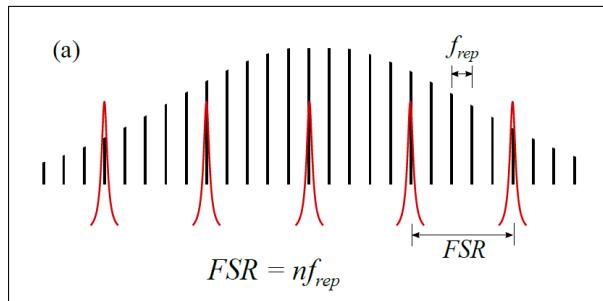
2.1 Hladni atomi rubidija

Oblak hladnih atoma rubidija 87 dobiva se magneto-optičkom stupicom opisanom u poglavlju 1.1 gdje je i prikazan na Slici 3. Kao laser za hlađenje korišten je MOGLabs CEL002, a kao laser za naseljavanje Toptica Photonics DL 100. Oba lasera su poluvodički diodni laseri s vanjskim rezonatorom. Detalji moduliranja frekvencija laserskih svjetlosti i metode njene stabilizacije mogu se pronaći u [5,6].

MOT se nalazi u vakuumskoj komori od nehrđajućeg čelika u kojoj se ionskom pumpom postiže tlak od 10^{-11} bara. Atomi rubidija se u komoru dovode pomoću dispenzera. Kvadrupolno magnetsko polje za zatočenje atoma stvara se dvjema zavojnicama postavljenim u anti-Helmholtzovu konfiguraciju. Obadvije zavojnice imaju 100 namotaja, a struja kroz njih iznosi 15.3 A. Detaljniji opis MOT-a i komore nalazi se u [1].

2.2 Vezanje frekventnog češlja u optički rezonator

Atome obasjavamo frekventnim češljem iz femtosekundnog lasera: Femtofiber Scientific FFS koji je proizvela Toptica Photonics AG. Spektar frekventnog češlja širok je oko 2 nm i sadrži oko 10^5 njegovih modova. Centriran je na 780 nm što odgovara atomskom prijelazu ^{87}Rb . Princip rada korištenog femtosekundnog lasera i stabilizacija frekvencija f_{rep} i f_0 opisani su u [4,5].



Slika 8. Preklapanje modova frekventnog češlja s modovima optičkog rezonatora. Crne linije prikazuju modove u spektru frekventnog češlja, a crvene linije modove optičkog rezonatora. Prikazan je slučaj kada se svaki peti mod češlja veže u rezonator. Preuzeto iz [7].

Kako bi svjetlost frekventnog češlja ulazila u rezonator s atomima, potrebno je modove frekventnog češlja (jednadžba 1.2) preklopiti s frekvencijama modova svjetlosti u rezonatoru (jednadžba 1.1). Preklapanje je prikazano na Slici 8 i uvjet preklapanja glasi:

$$FSR = nf_{rep} \quad (2.1)$$

Duljina rezonatora postavljena je na $L = 7.757$ cm čime se u rezonator veže svaki $24.$ mod frekventnog češlja. Kako bi se stabilizirala duljina rezonatora koristi se Pound-Drever-Hall (PDH) metoda uz dodatan kontinuirani laser na rezonantnoj frekvenciji atoma cezija valne duljine 852 nm. Karakterizacija korištenog optičkog rezonatora može se pronaći u [7], a opis stabilizacije duljine rezonatora u [5].

Za maksimalno međudjelovanje oblaka hladnih atoma sa svjetlošću u rezonatoru, oblak se pozicionira u struk rezonatora (definirano u [7]). Položaj oblaka regulira se magnetskim poljima te se metode pozicioniranja oblaka mogu proučiti u [5].

2.3 Mjerenje međudjelovanja oblaka hladnih atoma i frekventnog češlja

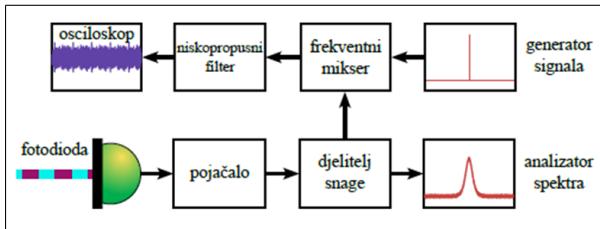
Oblak hladnih atoma u MOT-u prati se CMOS kamerama. Trenutna informacija o broju atoma u obliku može se dobiti mjeranjem fluorescencije oblaka. Fluorescencija se mjeri fotodiodom i korisna je zbog jednostavnog praćenja tijekom izvođenja eksperimenta.

2.3.1 Transmisija kroz rezonator

Intenzitet svjetla transmitiranog kroz optički rezonator proporcionalan je intenzitetu svjetla u rezonatoru. To znači da mjeranjem svjetla transmitiranog kroz rezonator direktno dobivamo informaciju o intenzitetu svjetla s kojim atomi međudjeluju.

Frekvencija transmitiranog frekventnog češlja prevelika je da se direktno mjeri s rezolucijom dovoljnom za raspoznavanje pojedinih modova češlja. Zbog toga se

koristi metoda heterodine spektroskopije: mjeri se interferencija pojedinog moda frekventnog češlja s kontinuiranim laserom bliske frekvencije. Kao kontinuirani laser, koristi se dio zrake lasera za hlađenje koji se preklopi sa zrakom transmitiranom iz rezonatora. Interferencija tih zraka rezultira udarima frekvencije koja odgovara razlici frekvencija lasera za hlađenje i frekvencije pojedinog mjerene modi češlja. Ta razlika je u gigahertznom području što omogućuje da se analizira elektroničkim elementima.



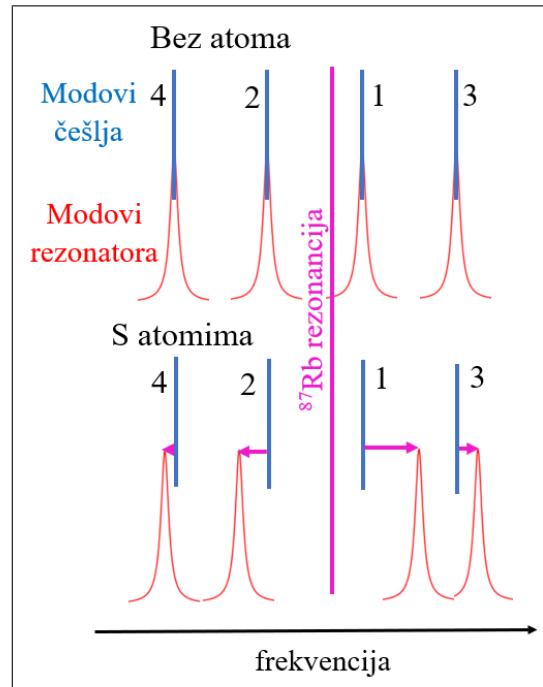
Slika 9. Shematski prikaz elektroničkog dijela postava za mjerjenje frekvencija udara. Signalom na osciloskopu mjerimo transmisiju kroz rezonator. Analizator spektra služi za precizno određivanje frekvencije udara. Preuzeto iz [5].

Mjerjenje transmisije kroz rezonator shematski je prikazano na Slici 9. Interferirane zrake lasera za hlađenje i zrake češlja transmitirane kroz rezonator mjeri se fotodiodom. Pojedini mod frekventnog češlja daje određenu frekvenciju udara pri interferenciji s laserom za hlađenje. Pojačani signal s fotodiode kombinira se sa generiranim signalom postavljenim na tu frekvenciju. Snaga dobivenog signala dobro opisuje transmisiju pojedinog moda frekventnog češlja kroz rezonator. Snaga signala mjeri se osciloskopom kroz jednu sekundu te se kao mjerena vrijednost uzima RMS (eng. *root mean square*). Opis postava za mjerjenje udara nalazi se u [5].

3 Mjerena i rezultati

Mjerena je transmisija pojedinog moda frekventnog češlja u ovisnosti o pomaku referentne frekvencije češlja f_0 . Tijekom mjerjenja je razmak između frekvencija modova češlja f_{rep} nepromijenjen. Mjerena transmisija

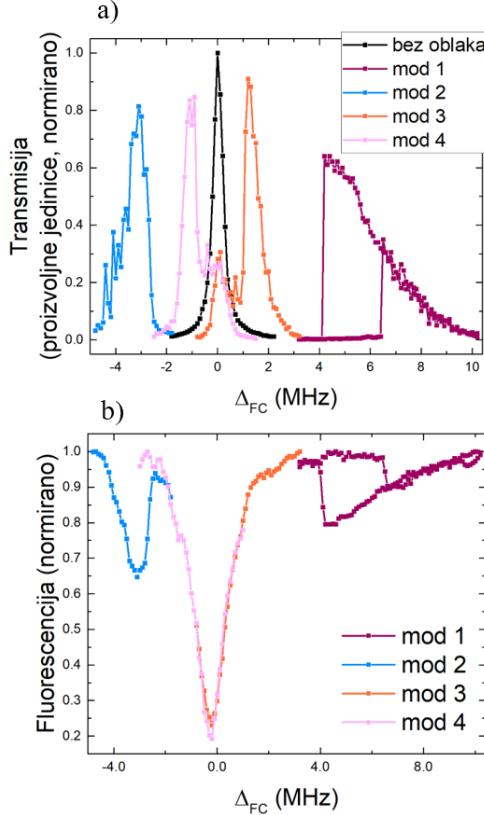
frekventnog češlja kroz rezonator bez atoma prikazana je crnom bojom na Slici 11 a). Transmisija se dobiva pri preklapanju modova frekventnog češlja s modovima optičkog rezonatora. Mjerena ovisnost odgovara obliku linije pojedinog moda optičkog rezonatora (spektar optičkog rezonatora izveden je u [2] i prikazan na Slici 5). Pri maksimalnoj transmisiji, svi su modovi frekventnog češlja točno preklopljeni s modovima optičkog rezonatora (opisno u 2.2).



Slika 10. Prikaz pomaka modova rezonatora zbog prisustva atoma u rezonatoru. Može se primjetiti kako će pomak pojedinog moda biti veći što je njegova frekvencija bliže frekvenciji atomske rezonancije ^{87}Rb . Razlog tomu je jače međudjelovanje s atomima i veći indeks loma atoma. Preuzeto iz [5].

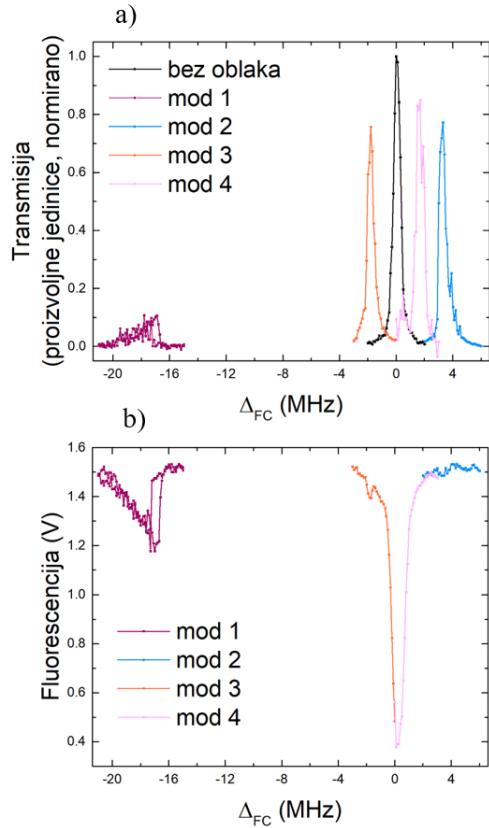
Kada uvedemo hladne atome u rezonator, oni će zbog svoga indeksa loma efektivno promijeniti duljinu rezonatora zbog povećanja optičkog puta svjetlosti. Ta promjena će poremetiti preklapanje modova frekventnog češlja s modovima rezonatora i neće biti transmisije modova rezonatora frekvencija bliskih frekvenciji atomskog prijelaza. Pomicanje modova shematski je prikazano je na Slici 10 (razmatra se tek nekolicina modova najbližih

atomskoj rezonanciji jer ostali modovi imaju slabo međudjelovanje s atomima). Za ponovno dobivanje transmisije kroz rezonator potrebno je pomicati frekvenciju frekventnog češlja f_0 dok se ne poklopi sa frekvencijom pomaknutog moda optičkog rezonatora.



Slika 11. Mjerenje transmisije (a) i fluorescencije (b) u ovisnosti o pomaku frekvencije češlja za prva četiri moda rezonatora. Mod najbliži frekvenciji rezonancije je od nje udaljen 486 MHz na plavu stranu.

Transmisija u ovisnosti o pomaku frekvencije frekventnog češlja prikazana je na Slici 11. Izmjerena je transmisija četiri moda rezonatora čije su frekvencije najbliže frekvenciji atomske rezonancije. Brojevi modova označuju koji je mod po redu najbliži rezonanciji. Za dobivanje transmisije prvog moda najbližeg rezonanciji (mod 1 na Slici 11) potrebno je najviše pomaknuti frekvenciju češlja. Svjetlost frekvencije tog moda najjače međudjeluje s atomima pa je za nju indeks loma atoma najveći. Zbog toga se i odgovarajući mod rezonatora najviše promijeni (Slika 10). Taj mod je onaj na čijoj se transmisiji pojavljuje histereza.

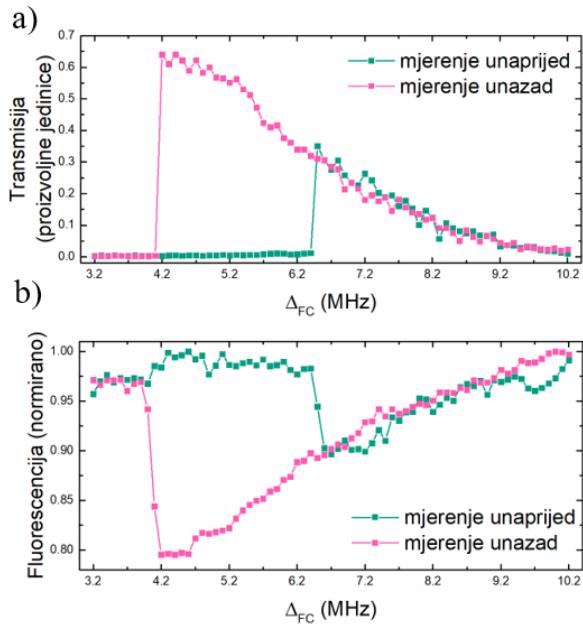


Slika 12. Mjerenje transmisije (a) i fluorescencije (b) u ovisnosti o pomaku frekvencije češlja za prva četiri moda rezonatora. Mod najbliži frekvenciji rezonancije je od nje udaljen -477 MHz na crvenu stranu.

3.1 Optička bistabilnost

Izmjerena je histereza u transmitiranom intenzitetu moda rezonatora najbližeg rezonanciji. Izmjerena ovisnost transmisije o frekvenciji frekventnog češlja prikazana je na Slici 13. Kada se mjerenje provodi u smjeru smanjenja frekvencije češlja, svjetlost se transmitira na frekvencijama za koje nema transmisije kada se frekvencija povećava kroz mjerenje. Ovo je odziv nelinearnog ponašanja sustava hladnih atoma u rezonatoru. Ovakav rezultat je posebno zanimljiv zbog svoje bistabilnosti: u istim uvjetima, sustav može poprimiti dva različita stabilna stanja.

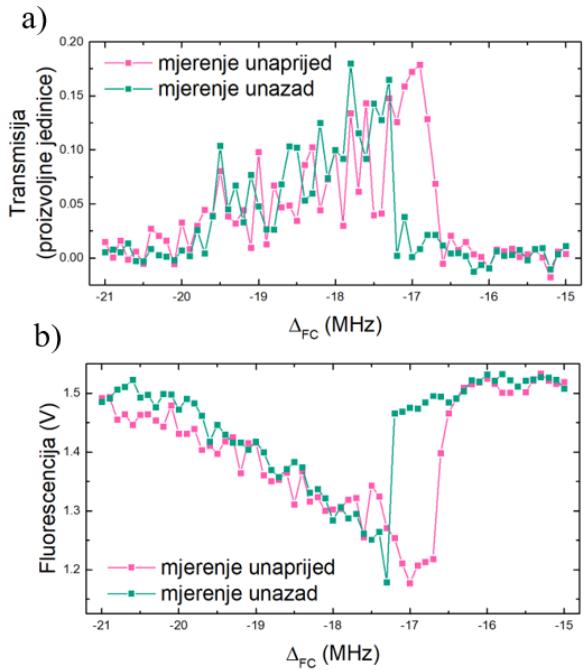
Mjerenje je provedeno i za slučaj kada je mod najbliži atomskoj rezonanciji na crvenoj strani (pod crvena strana se misli na manju frekvenciju od frekvencije rezonancije, a pod plava strana na veću). Ponovno se uočava bistabilno ponašanje za mod 1.



Slika 13. Izmjerena histereza na modu češlja najbližeg rezonanciji na 486 MHz na plavoj strani. Ovisnost transmisije (a) i fluorescencije (b) o frekvenciji češlja.

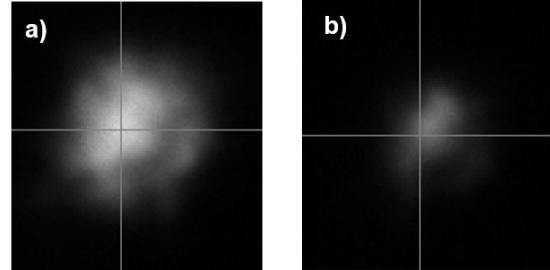
Može se primijetiti da je pomak frekvencije prvog moda rezonatora znatno veći nego u slučaju kad je on s plave strane. Razlog tomu proizlazi iz toga da ispod energetske razine atoma $|5^2P_{3/2}, F'=3\rangle$ postoje razine $|5^2P_{3/2}, F'=2\rangle$, $|5^2P_{3/2}, F'=1\rangle$ i $|5^2P_{3/2}, F'=0\rangle$ (Slika 4). Međudjelovanje s tim nivoima povećava indeks loma za svjetlost s crvene strane rezonancije.

Osim mjeranjem pomaka frekvencije, jakost međudjelovanja svjetlosti s atomima može se promatrati preko fluorescencije atoma. Fluoresciraju samo atomi koji su zbog međudjelovanja sa svjetlošću prešli u pobuđeno stanje. Stoga će smanjenje broja atoma koji međudjeluju uzrokovati smanjenje fluorescencije. Međudjelovanje frekventnog češlja s atomima uzrokovat će gubitak efektivnog broja atoma što će biti diskutirano u slijedećem poglavljju. Mjerjenje fluorescencije za slučajeve prvog moda s plave strane i sa crvene strane rezonancije prikazani su na Slikama 13 b) i 14 b). Može se primijetiti da su smanjenja fluorescencije veća na crvenoj strani što je moguća potvrda dodatnog međudjelovanja s nižim razinama atoma ^{87}Rb .



Slika 14. Izmjerena histereza na modu rezonatora najbližeg rezonanciji na -477 MHz na crvenoj strani. Ovisnost transmisije (a) i fluorescencije (b) o frekvenciji češlja.

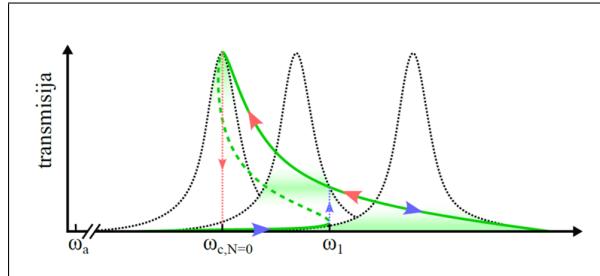
3.2 Teorijsko objašnjenje



Slika 15. Usporedba oblaka na kameri kada nema svjetlosti u rezonatoru (a) i kada se oblak obasjava frekventnim češljjem na frekvenciji preklapanja s rezonatorom (b).

Razlog nastajanja histereze je promjena efektivnog broja atoma to jest broja atoma koji međudjeluju sa frekventnim češljjem. Ulazak svjetlosti u rezonator uzrokovat će smanjenje efektivnog broja atoma. Jedan od razloga za to je saturiranje energetskih nivoa: svjetlost apsorbiraju samo nepobuđeni atomi, pa atomi koji su u pobuđenom stanju isključeni su iz međudjelovanja jer ne

apsorbiraju svjetlost. Drugi od razloga je da pri prijenosu kolичine gibanja svjetlosti na atome, oni budu izbačeni u okolinu izvan rezonatora. Smanjenje broja atoma je uočljivo kao smanjenje fluorescencije oblaka i direktno se uočava promatranjem oblaka na kameri (Slika 15).



Slika 16. Prikaz nastajanja histereze.
Istočkane linije prikazuju mod rezonatora koji se pomiče zbog svjetla unutar rezonatora.

Smanjenje broja atoma smanjuje indeks loma oblaka unutar rezonatora. Time je smanjena efektivna duljina rezonatora što utječe na vraćanje modova rezonatora bliže stanju u kojima su bez atoma. Promotrimo nastajanje histereze na transmisiji moda češlja najbližeg rezonanciji s plave strane. Proces je prikazan na Slici 16. Promotrimo za početak što se događa kad kroz mjerjenje smanjujmo frekvenciju frekventnog češlja:

Mod češlja i mod rezonatora postepeno će se preklapati i svjetlost će se propuštati u rezonator. Propuštena svjetlost će smanjiti broj atoma što će uzrokovati da se smanji frekvencija moda rezonatora. Proces će se nastaviti tako da se sve više svjetlosti propušta u rezonator i mod rezonatora se nastavlja pomicati smanjivanjem frekvencije češlja. Na dovoljno maloj frekvenciji, intenzitet svjetlosti bit će premalen da održi pomak moda rezonatora. Tada će se atomi vratiti u rezonator, mod rezonatora će se vratiti u početno stanje i primjetit će se naglo smanjenje transmisije (smanjenje je na 4.1 MHz na Slici 13).

Kada se mjerjenje provodi povećavanjem frekvencije, za ulazak svjetlosti u rezonator potrebno je dostići određenu frekvenciju. Tek kada svjetlost uđe u rezonator dolazi do smanjenja broja atoma i pomaka frekvencije

moda rezonatora. Tada dolazi do naglog porasta transmisije (porast je na 6.4 MHz na Slici 13).

Promjene u efektivnom broju atoma mogu se pratiti preko fluorescencije (Slika 13 b)).

Objašnjena je bistabilnost i mogu se opisati dva različita stabilna stanja u istim uvjetima:

1. Svjetlost unutar rezonatora je smanjenjem efektivnog broja atoma pomaknula mod rezonatora tako da omogući transmisiju.
2. Svjetlost nije propuštena unutar rezonatora jer nije dovoljno blizu frekvencije nepomaknutog moda. Bez svjetlosti u rezonatoru nema smanjenja broja atoma i pomaka moda rezonatora koji omogućuje transmisiju u prvom slučaju.

U radu [8] opisano je nastajanje histereze u sustavu hladnih atoma iterbija u rezonatoru kada ih se obasjava kontinuiranim laserom. U tom je slučaju pokazano kako je za nastajanje histereze odgovorno smanjenje efektivnog broja atoma zbog saturiranja energetskih nivoa. Teorijski model uključuje uvrštanje promjene broja atoma pri saturaciji u jednadžbu za intenzitet svjetla unutar rezonatora. U tom sustavu sa svjetлом međudjeluje samo jedan atomski prijelaz te je valjano pretpostaviti sustav atoma s dvije razine. Dobiven je slijedeći izraz za normirani intenzitet svjetla u rezonatoru:

$$I = \frac{1}{1 + [\Delta - A(1 + SI)^{-1}]^2} \quad (3.1)$$

$$\Delta = 4\pi \frac{(\nu_P - \nu_R)}{\kappa}, \quad A = \frac{Ng_0^2}{6\pi\kappa(\nu_a - \nu_R)}, \\ S = \frac{GI_{in}\Gamma^2}{I_{sat}16\pi^2(\nu_a - \nu_R)^2}.$$

Pri tome je κ širina moda rezonatora, ν_R njegova frekvencija, N broj atoma, g_0 faktor međudjelovanja atoma i rezonatora, G faktor pojačanja rezonatora, I_{in} intenzitet svjetla prije rezonatora, I_{sat} i Γ su svojstva atomskog prijelaza, a ν_P i ν_a su frekvencija kontinuiranog lasera i frekvencija atomske rezonancije.

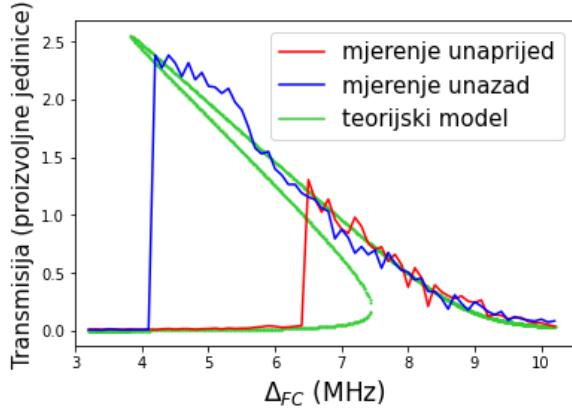
Korištenjem relacije 3.1. za naše eksperimentalne parametre zaključeno je da je

odgovarajući parametar S dva reda veličine pre malen da bi teorijski reproducirali mjerenu histerezu. Iz toga se može zaključiti da samo saturacija atomskog prijelaza s kojim frekventni češlj medudjeluje nije uzrok bistabilnosti. Vjerojatniji uzrok je gubitak hladnih atoma iz optičkog rezonatora u okolinu što je i potvrđeno mjerjenjem fluorescencije i promatranjem oblaka na kameri.

Zbog složenosti sustava, određivanje točne ovisnosti gubitka atoma u okolinu je zahtjevan zadatak. Za jednostavnu analizu može se pretpostaviti da je broj izbačenih atoma proporcionalan s intenzitetom svjetlosti:

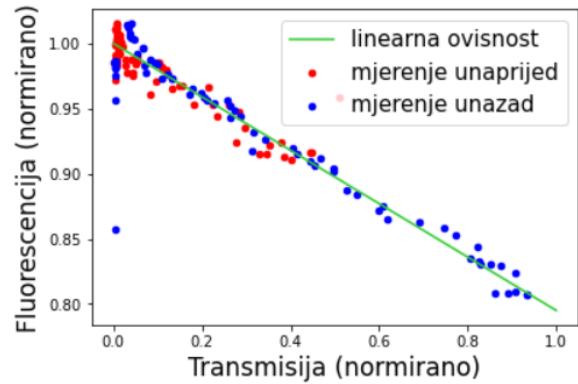
$$\Delta N = N_0 L I, \quad N = N_0 (1 - L I) \quad (3.2)$$

pri čemu je L neki parametar gubitka atoma a N_0 broj atoma kad nema svjetlosti u rezonatoru. Takva se pretpostavka može eksperimentalno opravdati time da se fluorescencija, koja je odraz broja atoma, linearno smanjuje s transmisijom kao što se vidi na Slici 18.



Slika 17. Usporedba izmjerene histereze s teorijskim modelom (jednadžba 3.3). Teorija se poklapa s eksperimentom za $A = 42.5$ i $L = 0.55$.

Kada je mjereni mod češlja s plave strane atomske rezonancije, može se pretpostaviti da svjetlost medudjeluje samo s jednim atomskim prijelazom (osnovno stanje $|5^2 S_{1/2}, F=2\rangle$, a pobuđeno $|5^2 P_{3/2}, F'=3\rangle$). Tada su atomske razine $|5^2 P_{3/2}, F'=2\rangle$, $|5^2 P_{3/2}, F'=1\rangle$ i $|5^2 P_{3/2}, F'=0\rangle$ dovoljno udaljene da se mogu zanemariti. U tom je slučaju valjano



Slika 18. Ovisnost fluorescencije oblaka o transmisiji kroz rezonator. Pokazano je da se fluorescencija linearno smanjuje s transmisijom. Dobivena ovisnost odgovara: fluorescencija = $1 - L \times$ transmisija, za parametar $L = 0.205$.

pretpostaviti slučaj atoma s dvije razine za koji vrijedi formula 3.1. Kada se izraz 3.2 uvrsti u 3.1 dobiva se:

$$I = \frac{1}{1 + [\Delta_{FC} - A(1 - LI)]^2} \quad (3.3)$$

$$A = \frac{N_0 g_0^2}{6\pi\kappa(\nu_a - \nu_R)}, \quad \Delta_{FC} = 4\pi \frac{(\nu_{FC} - \nu_R)}{\kappa},$$

pri čemu je ν_{FC} frekvencija mjerенog moda češlja a N_0 broj atoma bez svjetla u rezonatoru. Smanjenje efektivnog broja atoma zbog saturacije je izostavljen radi jednostavnosti i zbog toga što je određeni parametar S zanemarivo malen. Za naš eksperiment vrijedi: $\kappa = 2\pi \times 150\text{kHz}$, $g_0 = 2\pi \times 133\text{kHz}$. Broj atoma u rezonatoru može se procijeniti preko ovisnosti [8]:

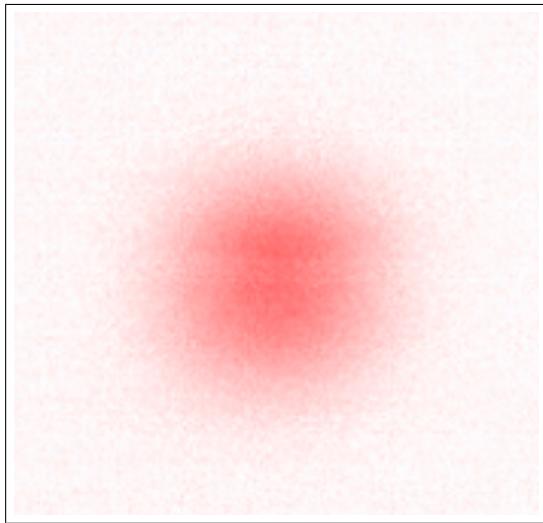
$$\Delta_n = \frac{g_0^2}{2\pi(\nu_a - \nu_R)} N, \quad (3.4)$$

pri čemu Δ_n predstavlja frekvencijski pomak n -tog moda rezonatora zbog prisustva atoma. Pomaci modova rezonatora lako se iščitavaju iz grafa na Slici 11 a). Dobiva se broj atoma N_0 oko 1.4×10^6 . Iz danih vrijednosti izračunava se odgovarajući parametar A:

$$A = 42.5$$

Izračunata krivulja 3.3 transmitiranog intenziteta za eksperimentalne parametre uz

$A = 42.5$ i $L = 0.55$ prikazana je sa zelenom linijom na Slici 17. Slaganje eksperimenta i teorije je zadovoljavajuće.

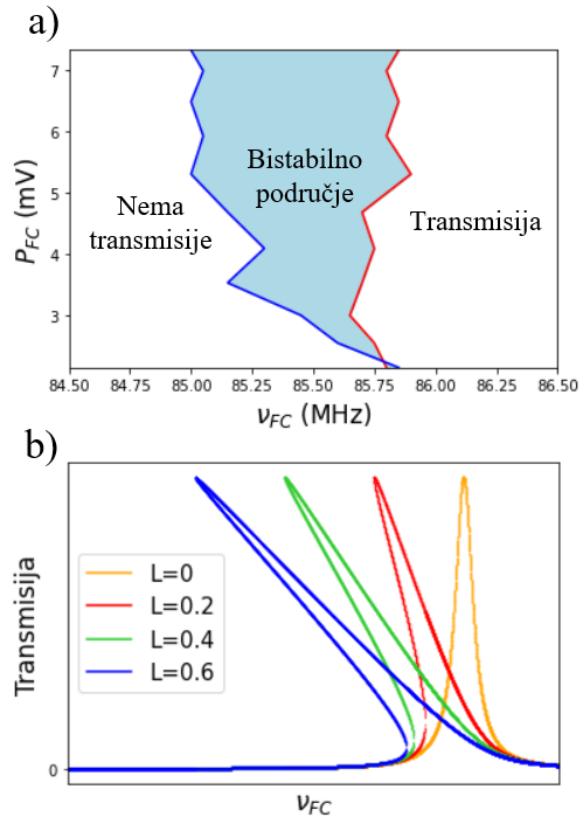


Slika 19. Snimka oblaka kamerom na kojoj je uočen gubitak atoma na području međudjelovanja s frekventnim češljjem.

Točna struktura parametra L je nepoznata ali se njegova vrijednost može povezati nagibom pravca u ovisnosti fluorescencije o transmisiji (Slika 18). Tako određen L iznosi 0.205. Dobivena je vrijednost koja je oko 2.5 puta manja od vrijednosti dobivene usklađivanjem teorijskog modela na eksperimentalne rezultate. Takav je rezultat očekivan kada se uzme u obzir da ne međudjeluju svi atomi u oblaku sa svjetlošću frekventnog češlja. Promjer oblaka atoma je oko 1 mm, a polumjer zrake lasera u struku rezonatora iznosi $100 \mu\text{m}$. Određuje se da samo oko 15% atoma iz oblaka međudjeluje s frekventnim češljjem unutar rezonatora. Na području međudjelovanja biti će veći gubitak atoma u odnosu na ostatak oblaka što je uočeno snimanjem oblaka (Slika 19). Uskladivanjem teorijskog modela na izmjerenu histerezu određen je L koji je povezan s gubitkom atoma koji međudjeluju sa frekventnim češljjem, dok je L određen iz smanjenja fluorescencije povezan je s gubitkom atoma iz cijelog oblaka te iz tog razloga ima manju vrijednost.

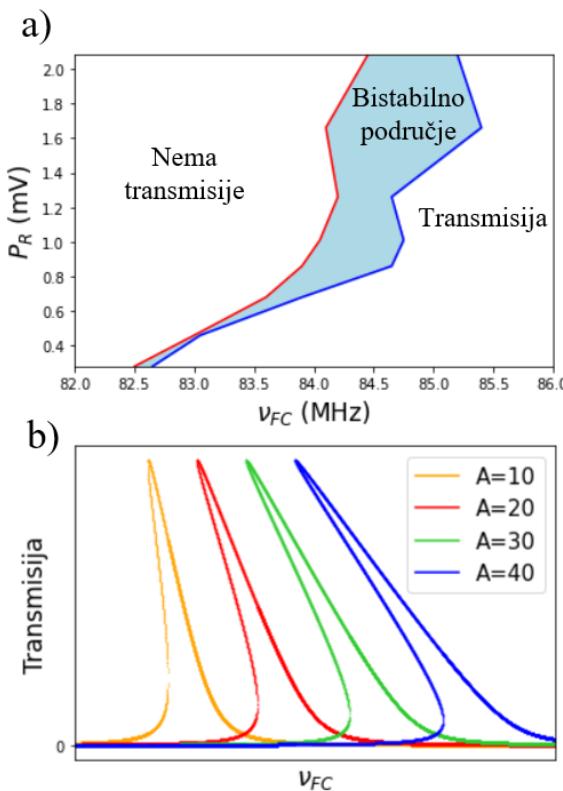
Jednadžba 3.3, uz relativnu procjenu parametra L iz fluorescencije, ne daje odgovarajuće poklapanje za modove češlja sa

crvene strane. Na primjer zbog velikog smanjenja u fluorescenciji na udaru 2 (Slika 11) očekivala bi se histereza, ali ona nije izmjerena. Mogući razlog tome je utjecaj dodatnih nižih atomske razina ^{87}Rb zbog kojih analiza uz pretpostavku dvije atomske razine prestaje biti primjenjiva.



Slika 20. a) Izmjerena ovisnost točaka na rubovima bistabilnog područja o snazi femtosekundnog lasera za histerezu na plavoj strani od atomske rezonancije.
b) Teorijski model histereze za različite vrijednosti parametra L .

Ispitala se ovisnost histereze o snazi frekventnog češlja i o snazi lasera za naseljavanje. Snaga frekventnog češlja zasigurno je povezana s parametrom L . Smisleno je prepostaviti da za veću snagu frekventnog češlja gubitak atoma van iz rezonatora bude izraženiji. Povećanje širine bistabilnog područja za veće snage frekventnog češlja upravo odgovara većem parametru L to jest većem gubitu atoma.



Slika 21. a) Izmjerena ovisnost točaka na rubovima bistabilnog područja o snazi lasera za naseljavanje za histerezu na plavoj strani od atomske rezonancije.
b) Teorijski model histereze za različite vrijednosti parametra A .

Laser za naseljavanje odgovoran je za vraćanje atoma u ciklus hlađenja. Smanjenje njegove snage uzrokovat će manje atoma u ciklusu hlađenja odnosno ukupno manje atoma u oblaku. O broju atoma u oblaku, ovisan je parametar A . Promjena histereze mijenjanjem parametra A odgovarati će promjenama bistabilnog područja kada se mijenja snaga lasera za naseljavanje kao što je prikazano na Slici 21.

4 Zaključak

Eksperimentalno se izmjerilo međudjelovanje hladnih atoma rubidija s frekventnim češljem u optičkom rezonatoru. Izmjerena je histereza u transmisiji jednog moda frekventnog češlja u uvjetima kada se njegova frekvencija poklapa s frekvencijom pomaknutog moda rezonatora koji je najbliži atomske rezonanciji. Mjeranjem fluorescencije opažao

se efektivan broj atoma u međudjelovanju što je omogućilo nove uvide u sustav koji se proučava.

U ovom seminaru je po prvi puta ispitan gubitak atoma u okolini kao glavni uzrok nastanka bistabilnosti. Uz pretpostavku da je gubitak atoma proporcionalan s intenzitetom svjetla dobivena su slaganja teorijskog modela s eksperimentalnim rezultatima. Pokazano je da se pri promjeni eksperimentalnih parametara bistabino područje mijenja u skladu s očekivanjima iz teorijskog modela.

Za daljnje ispitivanje teorijskog modela poželjno bi bilo naći način za mjerjenje točnog efektivnog broja atoma. Mjeranjem fluorescencije dobiva se informacija o broju atoma u cijelom oblaku i nije nužno točan odraz broja atoma koji međudjeluju sa svjetlošću u rezonatoru. Također je potrebno određivanje fizikalnog mehanizma koji opisuje parametar L tj. određivanje točne ovisnosti gubitka atoma u okolini.

Zanimljive informacije bi se mogle dobiti preciznim proučavanjem modova rezonatora s crvene strane atomske rezonancije koji pokazuju velika smanjenja u fluorescenciji bez nastajanja histereze.

Literatura

- [1] Šantić, N. Synthetic Lorentz force for neutral atoms. Doctoral Thesis. Zagreb: Faculty of Science, 2018.
- [2] Steck, D. A. Classical and Modern Optics. 2006. <http://steck.us/teaching>, Rev. 1.8.5, 25.5.2024.
- [3] Diels, J. C.; Rudolph, W. Ultrashort Laser Pulse Phenomena. 2nd ed. Academic Press, 2016.
- [4] Skolnik, G. Koherentna spektroskopija femtosekundnim frekventnim češljem. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2008.
- [5] Kardum, L. Simultana disperzivna interakcija više linija frekventnog češlja s hladnim atomskim oblakom, Diplomski

rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2024.

- [6] Cipriš, A. Hlađenje atoma optičkim frekventnim češljem. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2017.
- [7] Kruljac, M. Cavity cooling and self-organization of atoms using an optical frequency comb. Doctoral Thesis. Zagreb: Faculty of Science, 2022.
- [8] Gothe H.; Valenzuela T.; Cristiani M.; Eschner J. Optical bistability and nonlinear dynamics by saturation of cold Yb atoms in a cavity. // Physical Review A. Vol. 99, Iss. 1, January 2019.