

Pomak modova optičkog rezonatora uslijed disperzivne interakcije s oblakom hladnih atoma

Eva Hudec

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet,
Sveučilište u Zagrebu, Bijenička cesta 32, 10000 Zagreb

Mentor: dr.sc. Neven Šantić

Institut za fiziku, Bijenička cesta 46, 10000 Zagreb

(Dated: 21. siječnja 2025.)

U ovom radu proučena je interakcija oblaka hladnih atoma rubidija s optičkim rezonatorom upotrebom frekventnog češlja. Opažena je promjena spektra frekventnog češlja nakon transmisije kroz optički rezonator. Oko D2 rezonancije rubidija opažen je pad transmisije, dok je na rubovima tog pada uočen i porast transmisije. Transmisija pojedinih modova frekventnog češlja pokazala je da je uzrok pada i porasta transmisije pomak modova optičkog rezonatora. Pokazano je da je interakcija odgovorna za navedeni pomak disperzivna, a ne apsorpcijska. Smjer pomaka modova odgovara teorijskom predviđanju.

I. UVOD

Hlađenje atoma vrlo je aktivno područje istraživanja u modernoj fizici. Na temperaturama reda veličine μK i nK atomi se kreću dovoljno sporo da je moguće promatrati kvantne efekte. To je važno ne samo za istraživanje fundamentalne kvantne fizike [1], već i za primjenu u poljima kvantnih simulacija [2], metrologije [3] i kvantnog računarstva [4].

Trenutno dostupne metode hlađenja atoma oslanjaju se na povoljnu strukturu elektronskih nivoa u atomima. Princip rada temelji im se na usmjerenom prijenosu količine gibanja s fotona na atome, koji je moguć samo ako je energija fotona jednaka energiji unutaratomskog prijelaza i ako su sva izborna pravila zadovoljena. Navedena ograničenja, kao posljedicu imaju mogućnost hlađenja samo atoma jednostavne strukture.

Metoda hlađenja koja bi bila neovisna o unutarnjoj strukturi materije otvorila bi vrata novim smjerovima istraživanja. Kao dobar kandidat istaknuto se rezonatorom potpomognuto hlađenje atoma. Unutar optičkog rezonatora stvara se optički potencijal koji zarobljava i hlađi atome.

Optički rezonator značajno pojačava interakciju atoma i svjetlosti. Atomi svojom prisutnošću u rezonatoru utječu na oblik optičkog potencijala, primjerice promjenom indeksa loma. Iz tog je razloga potrebno istražiti utjecaj atoma na rezonator na širokom rasponu frekvencija, što je i cilj ovog rada.

Pogodan alat za to istraživanje jest frekventni češalj, fazno stabiliziran pulsnii laser čiji se frekventni spektar sastoji od ekvidistantnih linija. Njime je moguće istovremeno promatrati utjecaj atoma na više frekvencija svjetlosti, koje se može i vrlo precizno ugađati. Dosadašnja istraživanja usredotočila su se na interakciju atoma s jednim ili par modova rezonatora [5]. Ovdje predstavljen istraživanje predstavlja iskorak kao prvu studiju interakcije velikog broja modova rezonatora s hladnim atomima.

A. Atom rubidija

Rubidij je kemijski element iz skupine alkalijskih metala, oznake Rb. Javlja se u dva prirodna izotopa: ^{85}Rb i slabo radioaktivni ^{87}Rb [6]. Ima jedan valentan elektron, što je vidljivo iz elektronske konfiguracije $[\text{Kr}] 5s^1$. Posljedično, Rb ima jednostavnu strukturu elektronskih nivoa [7] i često se koristi u eksperimentima laserskog hlađenja. Prijelaz korišten za hlađenje glasi $|5^2S_{1/2}; F = 2\rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}; F' = 3\rangle$. Pogodan je za hlađenje zato što je zatvoren (relaksacija iz pobuđenog stanja dopuštena je samo u početno stanje) te zato što su laserske diode na valnoj duljini tog prijelaza (780 nm) lako dostupne.

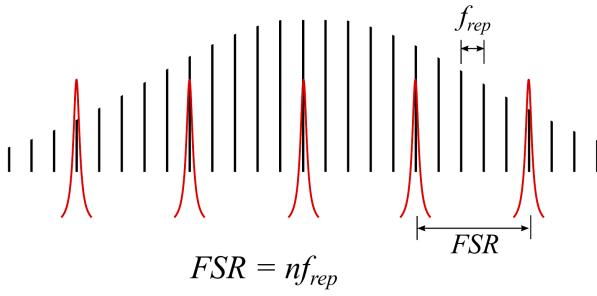
Pri pobuđivanju navedenog prijelaza postoji mala vjerojatnost da se elektron pobudi u stanje $|5^2P_{3/2}; F' = 2\rangle$ iz kojeg je moguća relaksacija u stanje različito od početnog, čime takav atom ispadna iz ciklusa hlađenja. Kako za hlađenje svaki atom mora proći kroz tisuće ciklusa pobuđenja i relaksacije, vrlo bi se brzo dogodilo da svi atomi ispadnu iz ciklusa hlađenja. To se sprječava uvođenjem lasera za naseljavanje koji elektrone vraća u stanje $|5^2P_{3/2}; F' = 2\rangle$, čime se osigurava da se svi elektroni iz tog stanja relaksiraju u željeno $|5^2S_{1/2}; F = 2\rangle$ stanje.

B. Frekventni češalj

Frekventni češalj naziv je za pulsnii laser s konstantnom razlikom u fazi između susjednih pulseva. Frekventni spektar takvog lasera sastoji se od velikog broja ekvidistantnih uskih vrhova (modova) unutar neke envelope, otkud mu dolazi ime. Detaljan opis rada i teorijski tretman frekventnog češlja dostupni su u diplomskom radu [8].

Tipičan broj modova u spektru iznosi $n \approx 10^5 - 10^7$. Frekvenca n -tog moda f_n dana je formulom

$$f_n = f_0 + n f_{rep}, \quad (1)$$



Slika 1. Ilustracija preklopa modova optičkog rezonatora s modovima frekventnog češlja. U našem postavu vrijedi $FSR = 24 f_{rep} = 1.932 \text{ GHz}$.

gdje je f_n u vidljivom ili blisko-infracrvenom (NIR) području, a frekvencije f_0 i f_{rep} u radio (RF) području. Precizno mjerenje frekvencija uporabom elektroničkih uređaja moguće je u RF području, ali ne i u vidljivom području elektromagnetskog spektra. Iz toga proizlaze značaj jednadžbe 1 i široka primjenjivost frekventnog češlja - mjerjenjem i ugadanjem f_0 i f_{rep} moguće je precizno mjeriti i ugadati f_n .

C. Optički rezonator

Optički rezonator je sustav optičkih elemenata postavljenih na način da svjetlost kruži između njih [9]. Rezonator sastavljen od dva zrcala visoke refleksije postavljenih na pravcu jedno prema drugome naziva se Fabry-Pérot interferometar, a često se koristi i konfiguracija sa zakrivenim zrcalima. Pojedinačni fotoni unutar rezonatora visoke reflektivnosti naprave mnogo ciklusa čime se pojačava interakcija svjetlosti s medijem unutar rezonatora (u našem slučaju, s hladnim atomima).

Promatrano iz valne slike, unutar rezonatora uspostavljuju se stojni valovi. Duljina rezonatora L određuje dozvoljene frekvencije stojnih valova.

$$f_q = q \frac{c}{2L}, \quad (2)$$

gdje je c brzina svjetlosti, a f_q frekvencija q -og stojnog vala. Razlika između dva susjedna moda naziva se slobodni spektralni rapon (eng. *free spectral range*, FSR)

$$FSR = f_{q+1} - f_q = \frac{c}{2L}. \quad (3)$$

Konstantna vrijednost FSR znači da se frekventni spektar svjetlosti transmitirane kroz rezonator sastoji od evidistantnih modova, baš poput frekventnog češlja. Kada FSR rezonatora odgovara višekratniku f_{rep} frekventnog češlja, velik broj modova češlja ispunjava uvjet rezonatora i transmitirani signal je jak (slika 1).

D. Disperzivna interakcija atoma s optičkim rezonatorom

Atomi se u optičkom rezonatoru pod utjecajem blisko-rezonantne svjetlosti ponašaju kao

U režimu u kojem su saturacijski efekti zanemarivi, atome unutar rezonatora možemo promatrati kao linearne polarizabilne čestice. Oblak hladnih atoma tada se ponaša kao disperzivni medij indeksa loma različitog od zraka. Zbog toga dolazi do frekventnog pomaka svjetlosti U_0 danog jednadžbom [5]

$$U_0 = \frac{g^2 \Delta_a}{\Delta_a^2 + \Gamma^2}, \quad (4)$$

gdje je g Rabijeva frekvencija atoma [10], Δ_a udaljenost frekvencije ulazne svjetlosti od atomske rezonancije, te Γ stopa spontanog prijelaza atoma iz pobuđenog u osnovno stanje, koja za D2 liniju u ^{87}Rb iznosi (6.067 ± 0.002) MHz [7].

II. EKSPERIMENTALNI POSTAV I METODE

A. Stabilizacija lasera

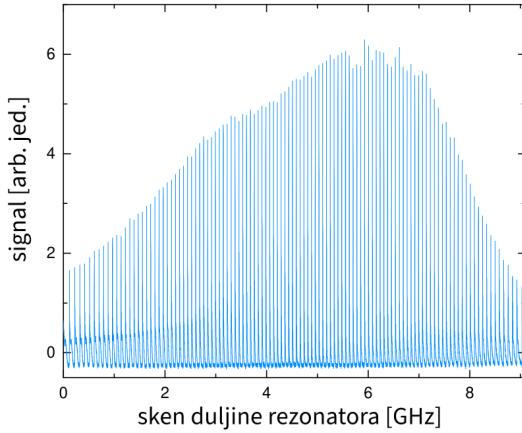
Za provedbu ovog eksperimenta potrebno je frekventno stabilizirati sve lasere i optički rezonator. Na taj način moguće je provesti više mjeranja u istim uvjetima, što je nužno za točnu interpretaciju rezultata. Osim toga, potrebno je stabilizirati i relativnu fazu pulseva u frekventnom češlju.

Mnogo stvari utječe na stabilnost lasera: temperatura i vlažnost zraka, vibracije, fluktuacije u jakosti struje napajanja diode i sl. One mogu utjecati na promjenu faze i frekvencije na kratkoj vremenskoj skali, ali i na dugoj (drift frekvencije).

U nastavku će biti objašnjena aktivna stabilizacija frekvencije. Neke od metoda aktivne stabilizacije su saturacijska apsorpcijska spektroskopija [11] i PDH metoda [12].

Proces frekventne stabilizacije lasera čini petlju povratne sprege (eng. *feedback loop*) [13]. Početna točka petlje je trenutna frekvencija lasera. Ona se uspoređuje s referentnom frekvencijom nekog atomskog prijelaza ili drugog lasera. Za stabilizaciju frekvencije potrebno je generirati *error* signal koji je proporcionalan odstupanju frekvencije od reference. Dobar error signal je asimetričan (lako je razlikovati situacije u kojima je frekvencija lasera niža nego referentna od onih u kojima je frekvencija viša nego referentna) i vrlo strm (mala odstupanja od referentne vrijednosti daju velik signal). Ovako generiran signal zatim se obrađuje PID regulatorom (eng. *Proportional - Integrative - Derivative controller*).

Kontrolni signal aktivira aktuator koji mijenja svojstva lasera kako bi mu se frekvencija približila referentnoj. Neke od mogućih promjena su promjena temperature diode, promjena napona na piezokristalu kojim se



Slika 2. Transmisija frekventnog češlja kroz optički rezonator u ovisnosti o promjeni FSR rezonatora.

regulira duljina rezonatora i promjena jakosti struje napajanja diode. Nova frekvencija lasera se mjeri i petlja kreće iznova.

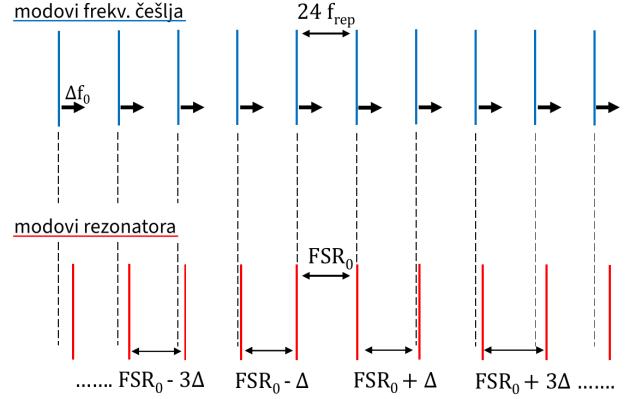
B. Sprega frekventnog češlja i optičkog rezonatora

Kako bi unutar optičkog rezonatora kružio velik broj modova frekventnog češlja potrebno je uskladiti f_0 i f_{rep} frekventnog češlja s modovima rezonatora (slika 1). Optički rezonator stabiliziran je na $FSR = 24f_{rep} = 1.932 \text{ GHz}$. Promjenom FSR od optimalnog, koji odgovara situaciji u kojem se poklapaju središnje frekvencije svakog moda rezonatora i n-tog moda frekventnog češlja, sprega frekventnog češlja i rezonatora pojavljuje se svakih f_{rep} , ali postaje sve manje i manje učinkovita.

Oba efekta mogu se uočiti na slici 2 koja prikazuje transmisiju svjetlosti frekventnog češlja kroz optički rezonator u ovisnosti o promjeni FSR. Transmisijiski vrhovi pojavljuju se svakih $f_{rep} \approx 80.5 \text{ MHz}$ dok se amplituda polako mijenja. Vro široka envelopa amplitude transmisijske na slici 2 zbog koje je teško odrediti optimalno poklapanje FSR i f_{rep} posljedica je disperzije. Disperzija optičkog rezonatora znači da FSR rezonatora nije konstantan, već da ovisi o frekvenciji moda (slika 3). Udaljenost među susjednim modovima rezonatora raste linearno s njihovom frekvencijom. Ranije je izmjereno da je $\Delta = 18 \text{ Hz}$.

C. Shema eksperimentalnog postava

Interakcija atoma i svjetlosti koju proučavamo odvija se u vakuumskoj komori prikazanoj na vrhu slike 4. U njoj se nalaze optički rezonator i oblak atoma ^{87}Rb u magneto-optičkoj stupici (eng. *magneto-optical trap*;



Slika 3. Ilustracija disperzije optičkog rezonatora i utjecaja na poklapanje s modovima frekventnog češlja.

MOT). Kroz nju propuštamо frekventni češalj (zeleno) i cw laser frekvencije 852 nm (plavo). Postav lijevo i ispod stupice na slici 4 služi za pripremu laserske svjetlosti odgovarajućih karakteristika (frekvencije, polarizacije). Postav desno od stupice služi za prikupljanje signala.

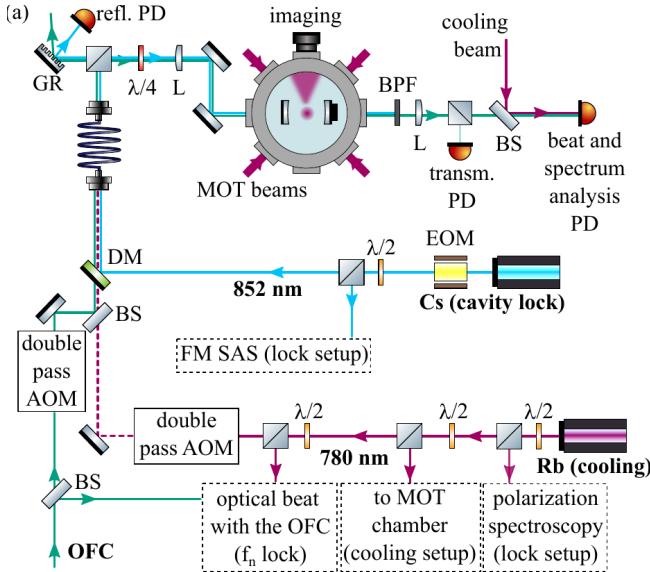
Plavom linijom označen je put lasera valne duljine 852 nm koji je stabiliziran na D2 prijelaz u Cs. On služi za stabilizaciju duljine optičkog rezonatora. Valna duljina lasera odabrana je daleko od rezonancije ^{87}Rb kako bi se smanjila njegova interakcija s oblakom hladnih atoma. Nakon transmisije kroz optički rezonator ovaj se laser blokira filtrom (eng. *band pass filter; BPF*) zbog toga što je znatno većeg intenziteta od pojedinih modova frekventnog češlja čiji signal mjerimo.

Ružičastom bojom označen je put lasera frekvencije 780 nm koji je stabiliziran na D2 prijelaz ^{87}Rb . On se višestruko koristi: za hlađenje atoma u MO stupici, za stabilizaciju frekventnog češlja te za pripremu udara s frekventnim češljem nakon interakcije s oblakom atoma, koji omogućuje brzu elektroničku obradu signala.

Zelenom bojom označen je put frekventnog češlja (eng. *optical frequency comb; OFC*). Dvaput prolazi kroz AOM (eng. *acousto-optic modulator*). AOM je aktivni optički element koji se temelji na ogibu svjetlosti na zvučnim valovima u materijalu [14]. Rezultat prolaska svjetlosti frekvencije f kroz AOM je difrakcijski uzorak na kutevima θ koji zadovoljavaju jednakost

$$2\Lambda \sin \theta = m\lambda, \quad (5)$$

gdje je Λ valna duljina vibracije (zvuka), $m \in \mathbb{Z}$ red difrakcije (koristen je $m = 1$), a λ valna duljina svjetlosti. Frekvencija svjetlosti u m -tom redu iznosi $f + mF$, gdje je F frekvencija zvučnog vala (u našem eksperimentu koriste se vrijednosti oko 80 MHz). Dvostruki prolaz omogućuje propagaciju laserske svjetlosti pod istim kutem neovisno o frekvenciji zvučnog vala AOM-a. Ukupni rezultat dvostrukog prolaska frekventnog češlja kroz AOM je modulacija frekvencije $f_n \mapsto f_n + 2F$, što



Slika 4. Shema eksperimentalnog postava. GR - optička rešetka, PD - fotodioda, L - leća, BPF - uskopropusni filter, BS - djelitev signal-a, DM - dikroično zrcalo, EOM - elektro-optički modulator, AOM - akustičko-optički modulator, OFC - optički frekventni češalj, MOT - magneto-optička stupica, SAS - spektralna apsorpcijska spektroskopija.

omogućuje finu kontrolu položaja modova frekventnog češlja u odnosu na modove optičkog rezonatora.

Spektar frekventnog češlja transmitiranog kroz optički rezonator promatran je na dva načina. Cijeli spektar izmjerjen je uređajem Thorlabs OSA201C. U njemu se nalazi skenirajući Michelsonov interferometar koji Fourierovim transformatom dolazi do spektra ulazne svjetlosti [15]. Prednost takvog uređaja je jednostavnost, dok mu je nedostatak nedovoljno visoka razlučivost. Iz tog je razloga za promatranje utjecaja interakcije s atomima na pojedinačne modove frekventnog češlja korištena metoda udara.

Udar nastaje pri interferenciji dva vala bliskih frekvenciјa. Frekvencija tako dobivenog vala odgovara srednjoj vrijednosti frekvencija početnih valova, dok mu je amplituda modulirana razlikom frekvencija. U našem eksperimentu preklopjeni su laser na 780 nm i frekventni češalj nakon transmisije kroz optički rezonator, te je rezultantni intenzitet registriran fotodiodom. Glavne prednosti ove metode su mogućnost promatranja amplitude pojedinačnih modova frekventnog češlja, kao i mogućnost električke obrade signala zbog znatno nižih frekvencija (red veličine 1 GHz u usporedbi s 380 THz lasera valne duljine 780 nm).

III. REZULTATI

A. Transmitirani spektar frekventnog češlja

Na slici 5 prikazan je spektar frekventnog češlja nakon transmisije kroz optički rezonator u 4 slučaja. Na gornjem lijevom grafu prikazan je spektar nakon transmisije kroz optički rezonator u kojem nema hladnih atoma. Frekvencije repeticije f_{rep} i FSR optičkog rezonatora su uskladeni tako da se nalazimo u najvišoj točki transmisij-skog vrha sa slike 2. Može se uočiti relativno uniformna envelopa širine 1.5 nm.

Preostali spektri izmjereni su u situacijama kad se u optičkom rezonatoru nalazio i oblak hladnih atoma. Na gornjem desnom grafu prikazan je spektar frekventnog češlja nakon transmisije kroz optički rezonator s oblakom. Značajna razlika je pad transmisije oko D2 rezonancije u Rb na 780.24 nm.

Širina D2 linije rubidija iznosi (6.067 ± 0.002) MHz [7]. Frekventni češalj stabiliziran je tako da je udaljenost najbližeg moda češlja od spomenute rezonance Δ_a veća od 500 MHz, čime je značajno potisnuta disipativna interakcija svjetlosti s atomima budući da disipativna interakcija opada s Δ_a^2 , dok disperzivna interakcija opada s Δ_a .

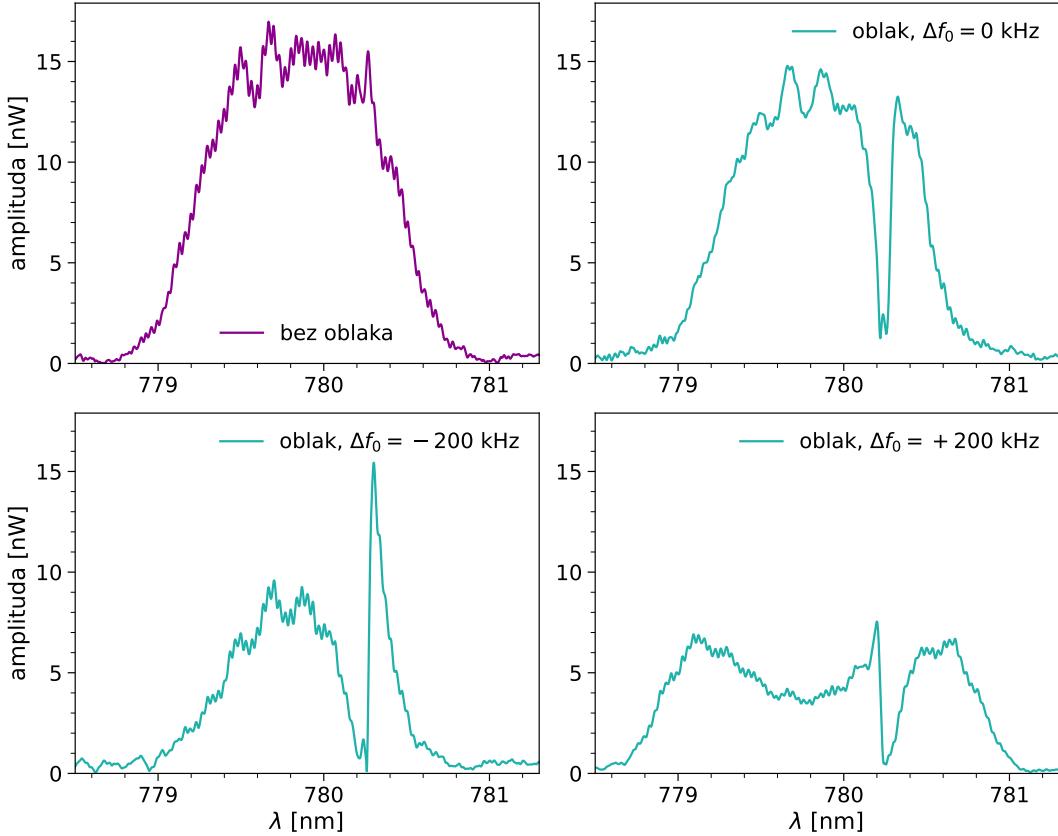
Spektri u donjem redu slike 5 izmjereni su za male pomake cijelog frekventnog češlja prema crvenom ($\Delta f_0 = -200$ kHz, dolje lijevo) tj. prema plavom ($\Delta f_0 = +200$ kHz, dolje desno). Uočavaju se dvije stvari: promjena oblika spektra, te asimetričan porast transmisije prije/nakon transmisije oko rezonancije rubidija.

Pomak prema crvenom pomiče sve modove frekventnog češlja prema repovima modova optičkog rezonatora pa je transmitirani signal slabiji nego u situaciji kad se vrhovi moda frekventnog češlja poklapaju s vrhovima modova optičkog rezonatora. Transmitirani spektar je stoga manjeg intenziteta.

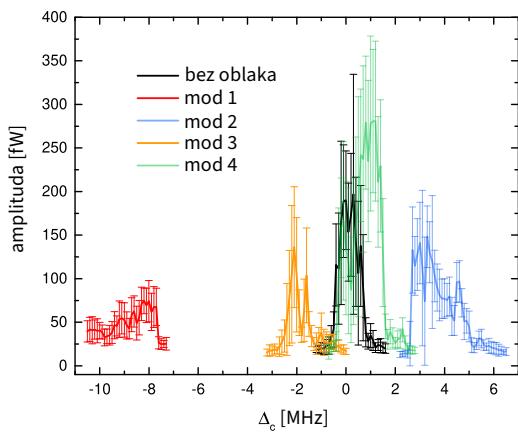
Do podjele envelope spektra na dva manja vrha pri pomaku prema plavom dolazi zbog disperzije optičkog rezonatora. Pomakom modova frekventnog češlja prema plavom više nije ispunjen uvjet preklapanja za centralne modove, ali postaje ispunjen za modove simetrično postavljene oko centralnih (slika 3). Spektar se stoga dijeli na dva niža vrha.

B. Pomak modova rezonatora

Na slici 6 prikazani su rezultati mjeranja transmisije frekventnog češlja kroz optički rezonator metodom udara. Na x-osi označena je promjena frekvencije frekventnog češlja pomoću AOM-a. Kao ishodište odabrana je frekvencija za koju se postiže maksimum transmisije frekventnog češlja u situaciji bez atoma u optičkom rezonatoru. Tada je postignuto optimalno preklapanje modova frekventnog češlja s modovima optičkog rezonatora. Pomak frekventnog češlja nužan za povratak transmisije nakon stavljanja oblaka atoma u optički rezonator odgоварa pomaku modova optičkog rezonatora Δ_c .



Slika 5. Spektar frekventnog češlja nakon transmisije kroz optički rezonator. Gore lijevo: bez oblaka hladnih atoma. Gore desno: s oblakom hladnih atoma. Dolje lijevo: s oblakom hladnih atoma, uz pomak frekventnog češlja za $\Delta = -200$ kHz. Dolje desno: s oblakom hladnih atoma, uz pomak frekventnog češlja za $\Delta = +200$ kHz.



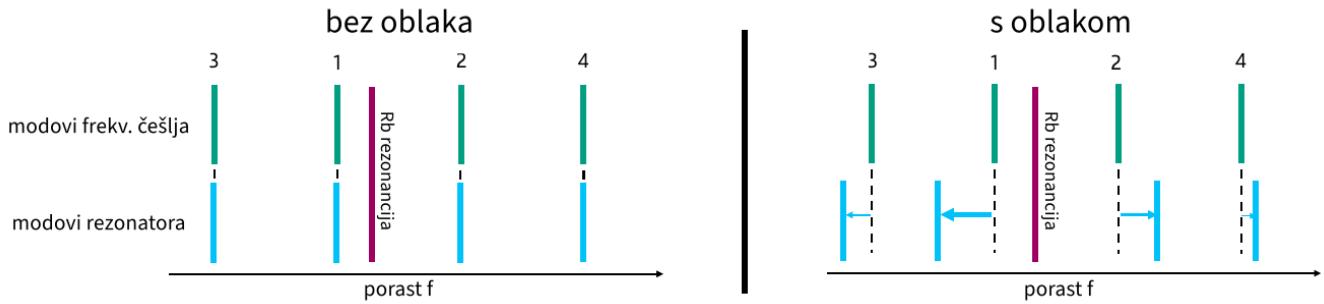
Slika 6. Pomak modova optičkog rezonatora oko rezonancije ^{87}Rb .

Udari su numerirani prema tome koliko su promatrani modovi optičkog rezonatora udaljeni od rezonancije ^{87}Rb . Može se uočiti da je pomak najveći za mod

najблиži rezonanciji te da je pomak sve manji za modove dalje od rezonancije. Modovi koji su se nalazili na nižim frekvencijama od rezonancije (1 i 3) pomaknuli su se u negativnom smjeru (prema crvenom), dok su se modovi koji su se nalazili na višim frekvencijama (2 i 4) pomaknuli u pozitivnom smjeru (prema plavom). Već za četvrti mod pomak je dovoljno mali da dolazi do preklopa sa situacijom bez atoma, što znači da je došlo i do transmisije daljih modova. Smjer pomaka modova u skladu je s teorijskim predviđanjem (jednadžba 4).

Pad i porast transmisije oko rezonancije sa slike 5 sada je moguće interpretirati kao posljedicu pomaka modova optičkog rezonatora uslijed interakcije s oblakom hladnih atoma. U slučaju u kojem je oblak upaljen dok je transmisija bila najveća, došlo je do pada transmisije oko valne duljine D2 prijelaza Rb. Modovi frekventnog češlja oko te valne duljine ne poklapaju se s pomaknutim modovima optičkog rezonatora, pa se ne vežu u rezonator i ne transmitiraju.

Pomakom cijelog frekventnog češlja prema crvenom ($\Delta f_0 < 0$) modovi frekventnog češlja crveno od rezonancije rubidija približavaju se zbog disperzivne interakcije crveno pomaknutim modovima optičkog rezonatora i ponovno se uspostavlja njihova transmisija. To dovodi



Slika 7. Skica pomaka modova optičkog rezonatora oko rezonancije ^{87}Rb .

do porasta s crvene strane uočenog pada transmisije. Iz istog razloga pomakom cijelog frekventnog češlja prema plavom dolazi do povećane transmisije samo onih modova frekventnog češlja koji se nalaze plavo od rezonancije rubidija. Skica pomaka modova dana je na slici 7.

Hladni atomi rubidija koji se nalaze unutar optičkog rezonatora efektivno mijenjaju indeks loma na pojasu frekvencija oko atomske rezonancije širine 5.8 GHz čime mijenjaju uvjet transmisije kroz optički rezonator za četiri moda rezonatora.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prvi je put pokazana interakcija oblaka hladnih atoma rubidija s velikim brojem modova optičkog rezonatora, upotrebom frekventnog češlja. U spektru frekventnog češlja nakon transmisije kroz optički rezonator uočen je pad amplitude oko D2 rezonancije Rb, kao i oštar porast amplitude ovisan o udaljenosti najbližeg moda češlja od rezonancije. Promatranjem transmisije pojedinih modova frekventnog češlja pokazano je da je uzrok pada i porasta transmisije pomak modova optičkog rezonatora zbog disperzivne interakcije s oblakom hladnih atoma. Smjer pomaka modova odgovara teorijskom predviđanju.

-
- [1] T. Kovachy, P. Asenbaum, C. Overstreet, C. A. Donnelly, S. M. Dickerson, A. Sugarbaker, J. M. Hogan, and M. A. Kasevich, Quantum superposition at the half-metre scale, *Nature* 10.1038/nature16155 (2015).
 - [2] C. Gross and I. Bloch, Quantum simulations with ultracold atoms in optical lattices, *Science* **357**, 995 (2017).
 - [3] L. Pezzè, A. Smerzi, M. K. Oberthaler, R. Schmied, and P. Treutlein, Quantum metrology with nonclassical states of atomic ensembles, *Rev. Mod. Phys.* **90**, 035005 (2018).
 - [4] A. Negretti, P. Treutlein, and T. Calarco, Quantum computing implementations with neutral particles, *Quantum Information Processing* 10.1007/s11128-011-0291-5 (2011).
 - [5] H. Ritsch, P. Domokos, F. Brennecke, and T. Esslinger, Cold atoms in cavity-generated dynamical optical potentials, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 553 (2013).
 - [6] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, *rubidij*, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/rubidij>, Pristupljeno 11. siječnja 2025.
 - [7] D. A. Steck, Rubidium 87 D line data, <https://steck.us/alkalidata/rubidium87numbers.pdf>, Pristupljeno 11. siječnja 2025.
 - [8] L. Kardum, *Simultana disperzivna interakcija više linija frekventnog češlja s hladnim atomskim oblakom*, diplomski rad (2024).
 - [9] R. Paschotta, *Optical Resonators*, RP Photonics Encyclopedia, https://www.rp-photonics.com/optical_resonators.html (), Pristupljeno 12. siječnja 2025.
 - [10] R. Paschotta, *Rabi oscillations*, RP Photonics Encyclopedia, https://www.rp-photonics.com/rabi_oscillations.html (), Pristupljeno 20. siječnja 2025.
 - [11] M. Đurić, *Utjecaj učinaka dekoherencije na svojstva optičkih kvantnih memorija*, diplomski rad (2022).
 - [12] M. Đurić, *Stabilizacija optičkog rezonatora*, samostalni seminar iz istraživanja u fizici (2021).
 - [13] Phase and frequency locking of diode lasers, <https://www.toptica.com/application-notes/phase-and-frequency-locking-of-diode-lasers>, Pristupljeno 29. prosinca 2024.
 - [14] Acousto-optic modulator, https://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator, Pristupljeno 29. prosinca 2024.
 - [15] Optical spectrum analyzers, https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=5276, Pristupljeno 29. prosinca 2024.