

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Luka Cavaliere Lokas

HLAĐENJE ATOMA OPTIČKIM
FREKVENTNIM ČEŠLJEM

Seminar PSEI

Mentor: dr. sc. Damir Aumiler

Zagreb, 2017.

UVOD

U posljednjim desetljećima napravljeni su iznimni pomaci u području fizike hladnih atoma i molekula. Prva ideja o laserskom, odnosno Dopplerovom hlađenju predstavljena je 1975. godine, a prva eksperimentalna demonstracija uslijedila je 1978. U današnje vrijeme se ovim načinom hlađenja lako uspostavljaju temperature u mikrokelvinskom području. Također, napretkom tehnika zarobljavanja i dodatnog hlađenja bilo je moguće proučavati razne fenomene koji su prethodno bili teoretski predloženi kao što su Bose-Einsteinov kondenzat, kvantna računala, hladni sudari, atomska spektroskopija i atomski satovi te razne druge pojave. Budući da su se do nedavno za eksperimentalne realizacije laserskog hlađenja atoma koristili samo laserski izvori kontinuiranog zračenja u vidljivom i infracrvenom području valnih duljina, a velik broj vrsta atoma, među kojima se najčešće hladi rubidij, imaju niskoležeće prijelaze u ultraljubičastom području spektra, nastao je problem zbog nepostojanja kontinuiranih laser u tom području spektra. To je bila motivacija znanstvenicima za uvođenje nove metode hlađenja pomoću ultrakratkih pulseva koji u spektralnoj domeni čine frekventni češalj.

TEORIJSKA POZADINA

Na samom početku razmatranja ovakvih sustava nameće se pitanje promatramo li sustav koji se ponaša klasično ili ga možemo opisati samo kvantnom fizikom. Odgovor se zapravo nalazi u sredini jer se u ovakvim eksperimentima susreću klasična i kvantna fizika obje podjednako bitne za opis ponašanja sustava hladnih atoma. Prvo je potrebno vidjeti kako hladiti atome i što uopće znači „hladno“ u područjima mikrokelvinskog područja. Ideja hlađenja atoma laserima bazira se na prijenosu impulsa s fotona na atom u ciklusima spontane apsorpcije i emisije. Kod atoma koji je apsorbirao foton dolazi do prelaska u pobuđeno stanje te se njegov impuls mijenja u smjeru širenja apsorbiranog fotona za iznos impulsa istog tog fotona. Potom taj isti atom prelazi u osnovno stanje spontanom emisijom fotona te mu se na isti način mijenja impuls. Budući da se spontane emisije događaju u nasumičnim smjerovima, nakon niza ponovljenih ciklusa prosječni impuls emitiranih fotona, odnosno promjena impulsa atoma nestaje te preostaje samo promjena uzrokovana apsorpcijama. Tako se postiže efekt gdje atomi osjećaju silu u smjeru laserskih zraka koja se naziva silom zračenja. Ta se sila se opisuje poluklasičnom jednadžbom te daje rezultat koji kaže da je njezin iznos jednak umnošku impulsa prenesenog s fotona na atom i broja apsorbiranih fotona u jedinici vremena.

Za određivanje prosječne kinetičke energije uzima se Maxwell-Boltzmannova raspodjela brzina koja je u vezi s temperaturom atoma što nas upućuje na novo poimanje ideje da je nešto hladno, to zapravo znači da se atomi tog sustava vrlo sporo gibaju i da imaju male kinetičke energije. Da bi došlo do apsorpcije fotona, što vodi smanjenju brzine, frekvencija dolaznih fotona mora biti manja od frekvencije atomskog prijelaza zbog Dopplerovog efekta. Ako promatramo iz sustava atoma, ona zraka koja se giba u suprotnom smjeru od smjera gibanja atoma je bliže rezonanciji s frekvencijom prijelaza pa atom preferira apsorpciju te zrake umjesto one koja se giba u istom smjeru kao i on. Na taj način sila zračenja djeluje u suprotnom smjeru od smjera gibanja atoma čime mu smanjuje brzinu te automatski i temperaturu. Problem koji se javlja kod dugog hlađenja je taj da atomi difundiraju iz područja hlađenja te ih je potrebno na neki način zarobiti. To se ostvaruje pomoću magneto-optičke stupice što je kombinacija optičke melase i gradijenta magnetskog polja. Magnetsko polje se stvara pomoću dviju paralelnih zavojnica u anti-Helmholtzovoj konfiguraciji kojima teku struje u suprotnim smjerovima čime se postiže da je polje u sredini, u točki presjecišta triju parova okomitih kružno polariziranih laserskih zraka jednako nuli, a udaljavanjem od centra se polje pojačava. Time se također postiže uklanjanje degeneracije podnivoa pri čemu je energija cijepanja linearno ovisna o položaju atoma od centra stupice zbog Zeemanovog efekta. Pored ovih efekata postoje ograničenja na hlađenje kontinuiranim laserima zbog ujednačavanja sile u vremenu te je moguće izračunati Dopplerovu temperaturu odnosno onu ispod koje se ne može ići primjenom Dopplerovog hlađenja, a ona za rubidij iznosi $146 \mu\text{K}$. Da bismo postigli temperature od četrdesetak mikrokelvina što je red veličine manje moramo posegnuti za novijim metodama hlađenja kao što je hlađenje frekventnim češljem. Optički frekventni češalj je spektar niza međusobno jednako vremenski razmaknutih femtosekundnih laserskih pulseva. Za generiranje takvih pulseva koristi se metoda sprezanja modova gdje se stvara konstantni fazni odnos između longitudinalnih modova laserskog rezonatora što znači da u vrlo kratkom trenutku svi modovi interferiraju stvarajući ultrakratki i intenzivni puls svjetlosti. Ti longitudinalni modovi zadovoljavaju uvjete stojnog vala u rezonatorskoj šupljini. Tako generirani pulsevi obuhvaćaju širok frekventni spektar, odnosno protežu se od infracrvene do ultraljubičaste svjetlosti u obliku relativno oštrih spektralnih linija vrlo male širine. Time se dobija efekt da svaka spektralna linija na atom kao zasebni kontinuirani laser, a način hlađenja je podjednak onome kod kontinuiranih lasera i baziran na principu Dopplerovog hlađenja.

EKSPERIMENTALNI POSTAV

Glavni dio eksperimenta u kojem se čitav proces glađenja odvija je vakuumska komora u kojoj je vakuum reda veličine 10^{-8} milibara. U nju se pomoću dispenzera dovodi rubidij koji se na sobnoj temperaturi nalazi u obliku srebrnkastog praha i kao takav se zagrijava prolaskom struje kroz dispenzer koji evaporira plinoviti rubidij. Komora ima nekoliko prozora kroz koje prolaze zrake lasera te se na jednom nalazi kamera koja snima fluorsecirajući oblak atoma. Budući da laserske zrake moraju biti vrlo stabilne kako bi sustav stalno bio u ravnoteži, koriste se dvije metode spektroskopija, to su polarizacijska i saturacijska. Takvim načinom se jedna spektroskopija koristi kao referentna, dok se druga ravna prema njoj. Sam postav sastoji se od velikog stola s brojnim zrcalima, prizmama, kivetama u kojima se nalazi plinoviti rubidij te raznim drugim elektroničkim napravama koje nastoje ustabiliti lasersku zraku za hlađenje. Na stolu se također nalazi 4 kontinuirana lasera te jedan femtosekundni. Bitno je istaknuti da je čitava aparatura vrlo osjetljiva na bilo kakve pomake i vibracije. Sva zrcala se ručno namještaju te je na nekim mjestima potrebna mikronska preciznost pomaka kako bi se dobila optimalna izlazna snaga lasera. Da bi se spriječile vibracije uzrokovane hodanjem prostorijom i samim vibracijama zgrade, stol na kojem je postavljena aparatura ima mogućnost punjenja četiriju noga zrakom. Time se dobija efekt da stol lebdi na zračnim jastucima što drastično uklanja svaki efekt vibracija poda i zgrade te omogućuje prisutnost većeg broja ljudi u prostoriji za vrijeme mjerenja. Za stabilnost lasera odgovorni su piezzo elementi i njih regulira Lock-In sustav. Također, spektroskopije u kombinaciji imaju takav utjecaj da jedna na drugu djeluje sustavom negativne povratne veze čime automatski u slučaju nekog poremećaja nije potrebno obje zrake iznova namještati već samo onu referentnu. Nakon stabilizacije zrake ona se optičkim vlaknima prenosi do drugog dijela stola tj. do komore s rubidijem. Uz već spomenute dijelove valja napomenuti da utjecaj Zemljinog magnetsko polja kao i polja koje stvaraju pumpe za vakuum nije zanemariv te su zbog toga posebno motane dodatne zavojnice koje otklanjaju takve efekte na komoru. Također se pojavljuje problem velikog šuma koji nastaje induciranja vrtložnih struja na površini stola koja je izrađena od aluminija. Ti su utjecaji donekle bili pojačani prethodno navedenim zavojnicama pa zbog toga pri izvođenju eksperimenta te zavojnice nisu uvijek uključene. S druge strane zavojnice magneto-optičke sutpice moraju uvijek biti uključene i trebaju vodeno hlađenje što uvjetuje postojanje priključka na vodu u labosu. Sama mjerenja izvode se promatranjem slike koju kamera šalje na monitore. Razlog zbog kojeg se uvodi dodatno hlađenje frekventnim češljem je taj što se u ciklusima snima oblak atoma na sljedeći način. Prvo već postojeći oblak

obasjavamo zrakom femtosekundnog lasera, pri čemu je zraka kontinuiranog lasera za hlađenje fizički prekinuta, kad u kratkom vremenu oblak interagira s frekvencijskim češljem te se potom pali kamera i kontinuirani laser kako bi se snimio fluorescirajući oblak i kako bi se atomi ponovno ohladili. Mjerenje se vrši u trenucima kad dolazi do ekspanzije atomskog oblaka i postupak snimanja se ponavlja u ciklusima pri čemu se vrijeme između ekspanzije oblaka i snimanja postupno povećava. Uz pretpostavku Maxwell-Boltzmannove raspodjele brzina atoma, njihova prostorna raspodjela u oblaku dana je Gaussovom raspodjelom iz čega jednostavnom formulom možemo uvidjeti direktnu vezu radijusa oblaka o temperaturi i proteklom vremenu od gašenja lasera.

ZAKLJUČAK

Kao rezultat ovakvog kombiniranja dviju tehnika hlađenja moguće je postići vrlo niske temperature na kojima se odvija fizika drugačija od one uobičajene kad govorimo o atomima. Na tim nivoima moguće je balansirati između klasične i kvantne mehanike koje zajedno opisuju stanja sustava atomskog oblaka. Fizika hladnih atoma i molekula ocijenjena je kao vrlo važna grana koja će se u budućnosti dodatno razvijati s ciljem boljeg razumijevanja kemijskih i međumolekularnih reakcija te atomskih sustava što može dovesti do razvoja novih tehnologija kao što su kvantna računala, uz već postojeću primjenu ove grane fizike kod atomskih satova gdje smo u mogućnosti precizno definirati jednu od najbitnijih mjernih jedinica, sekundu. Posjet labosu za hladne atome me se posebno dojmio i smatram ga jednim od mogućih izbora u odabiru buduće karijere.

LITERATURA

- A. Cipriš, Hlađenje atoma optičkim frekventnim češljem, diplomski rad, (2017.)
- D. Aumiler i T. Ban, Simultaneous laser cooling of multiple atomic species using an optical frequency comb, Phys. Rev. A 85, 063412 (2012.)