

BOSE-EINSTEINOVA KONDENZACIJA: ATOMSKI LASER

S. Milošević, Institut za fiziku, Zagreb - e-mail: slobodan@ifs.hr

Skica predavanja za ljetnu školu mladih fizičara, 20.-26.6.1999 Božava:

Uvod: Kvantna mehanika, spin, bozoni, fermioni, statističke raspodjele, valna priroda tvari, valni paket, kvantna koherencija, nelokalnost

Bose-Einsteinova kondenzacija: fazni prijelaz, temperatura plina, De Brogliejeva valna duljina, hlađenje

Tehnički opis BEC-a: uređaj, lasersko hlađenje, hlađenje isparavanjem, magnetske i optičke stupice

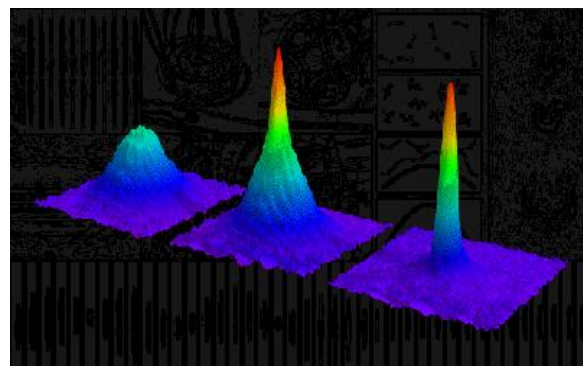
Razvoj događaja: prikaz postignuća, "all optical BEC", BEC u optičkim rešetkama, usporavanje svjetlosti, četverovalno miješanje, Bragg-ova spektroskopija -BEC u realnom vremenu, atomi vođeni žicom

Značaj postignuća: manipulacija valnom funkcijom, usporedba sa supravodljivosti i suprafluidnosti, analogije: Josephsonov efekt, razlaganje BEC-a, spora svjetlost

Atomski laser, prototip, atomski laseri nove generacije, NIST, München, Yale,

Predviđanja: degenerirani fermionski plin, atomska optika, atomska litografija, atomska interferometrija, atomski sat

Zaključak



Slika prikazuje raspodjele brzina u oblaku natrijevih atoma (lijevo) i ispod kritične temperature (desno) za Bose-Einsteinovu kondenzaciju. Preuzeta je, uz zahvalnu napomenu, sa stranice (<http://amo.mit.edu/~bec/>) grupe Dr. W. Ketterle, Massachusetts Institute of Technology, (MIT), USA.

Uvod:

Kvantna mehanika je teorija razvijena da objasni atome, elementarne sićušne djeliće svega što nas okružuje, strukturu i sastavne dijelove. Kako se radi o nečemu što je fenomenalno malo u odnosu na pojave koje svakodnevnom životu (npr. atomi su 10^{-10} metara u promjeru što je 10000 puta manje od promjera ljudske kose) kvantne mehanike ponekad teško možemo slikovito predstaviti.

Dvojna valno-čestična priroda atoma (materije) i svjetlosti centralna je misterija kvantnog svijeta, neposredno iskustvo, koncept kvantne neodređenosti koji kaže da nikad ne možemo, apsolutno točno, istovremeno znati položaj i gibanje objekta.

U svakodnevnom životu kvantna mehanika je danas nužna da bi shvatili što se dešava na *mikroskopskoj* razini, uređaja koji nas okružuju u kući i na poslu kao što su to npr. tranzistor ili laser. No u posebnim laboratorijskim uvjetima, ako sustav ohladimo ili se on nađe pod enormnim tlakovima, kvantni efekti bivaju silno pojačani i postaju vidljivi na *makroskopskim* udaljenostima. Najbolji takvi dosad poznati primjeri koji se pojavljuju u krutinama, tekućinama i plinovima su supravodljivost, suprafluidnost i Bose-Einsteinova kondenzacija u razrijeđenim plinovima. Prvi dva posljednja od posebne važnosti jer se dešava u najjednostavnijim sistemima, gdje postoje samo elementarni kvantni efekti olakšavajući interpretaciju u terminima kvantne teorije i provjeru njenih ključnih postavki. *Makroskopski* kvantni efekti značajni su, ne samo zbog praktičnih primjena, nego i iz čisto fundamentalnih razloga, u traženju granice između kvantne i klasične mehanike. Da li ta granica uopće postoji, da li je kvantna fizika nužna za objašnjenje funkcioniranja i tako kompleksnih sustava kao što je npr. ljudski mozak, otvorena su pitanja (1).

Zato je vijest koja se pojavila u znanstvenom svijetu u lipnju 1995. uzburkala maštu fizičara ali i drugih znanstvenika, biologa, pa i filozofa. A vijest je bila da su Carl Wieman sa Sveučilišta u Coloradu i Eric Cornell sa Cornellovim instituta za standarde i tehnologiju sa svojom grupom uspjeli ohladiti paru rubidijevih atoma ($Rb-87$) do temperature da se tisuće atoma sjedinilo u jedno te isto kvantno stanje formirajući novo stanje tvari: Bose-Einsteinovu kondenzaciju.

kondenzat (BEC) (2). Njima su se ubrzo pridružili deseci istraživačkih grupa širom svijeta stvarajući k raznovrsnim stupicama i s različitim atomima. Time je započet intenzivan razvoj jednog novog područja okuplja fizičare najrazličitijih profila (3).

Priču o BEC-u moramo početi spominjanjem nekih osnovnih pojmova iz svijeta kvantne fizike kao što su spin, bozoni, fermioni i njihove statističke raspodjele, valna priroda materije, princip neodređenosti itd.. Krenimo nekim redom.

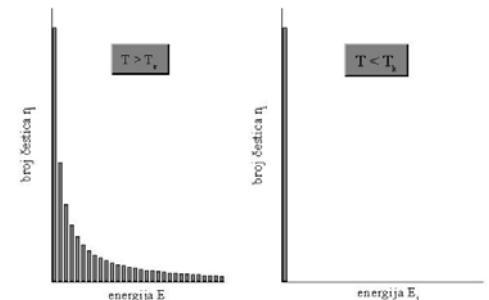
Preskočit ćemo revolucionaran razvoj znanosti s početka 20. stoljeća, konstatirajući samo jedno od najznačajnijih saznanja, da je čitav svijet sastavljen od elementarnih čestica i njihovih složenica (4). Sve se one mogu razvrstati, na temelju **spina** u dvije grupe: bozone i fermione. (5) Bozoni su čestice koje imaju cjelobrojni spin - njihov intrinzični kutni moment je 0, 1, 2 itd. u jedinicama reducirane Planckove konstante $\hbar/2\pi$. Fermioni su čestice koje imaju polucjelobrojni spin: 1/2, 3/2, 5/2 itd. Npr. fotoni i fononi su bozoni, dok su elektroni, neutroni, protoni, kao i najveći dio elementarnih čestica fermioni.

Spin je kvantno fizikalno svojstvo koje se teško predočiti. Često ga predstavljamo kao rotaciju čestice oko osi koja je u potpunosti neovisna o njoj međudjelovanju s ostalim česticama. Kada se neka čestica vrti pridružujemo mu kutnu količinu gibanja (zamah) zakon sačuvanja. U kvantnoj mehanici svaka se čestica opisuje valnom funkcijom koja sadrži kutni moment (ili kutnu količinu gibanja). Samo čestice koje imaju kutnu količinu gibanja cjelobrojni višekratnik reducirane Planckove konstante nepromijenjene nakon rotacije za 360° . No, postoje čestice čija valna funkcija ne vraća u isto stanje nakon rotacije za 360° već za 720° . Te čestice imaju kutni moment cjelobrojni višekratnik $1/2 \hbar/2\pi$. (To je situacija koja proturječi svakodnevnom iskustvu, no moguće ju je zamisliti na primjer uz pomoć puža na Moebiusovoj plohi. Za jedan krug po M. plohi, naći će se naglavce, za još jedan krug od 360 stupnjeva, da dođe u isto stanje početku).

Gledano samo na elementarne čestice, bozoni su čestice putem kojih fermioni kao sastavni dijelovi tvari međusobno djeluju. Njihove složenice - atomi mogu biti ili bozoni ili fermioni zavisno o tome da li sadrže paran ili neparan broj elementarnih fermiona. Bozoni i fermioni dobili su svoja imena po tome što njihove raspodjele po energetskim stanjima opisuju različite funkcije: Bose-Einsteinova raspodjela i Fermi-Diracova raspodjela.

Fermioni su usamljenici (asocijalci), iz tog njihovog svojstva (teritorijalnog ponašanja u kojem ne trpe niti dva čestice u istom prostoru) proizlazi Paulijev princip isključenja koji kaže da je dozvoljena samo jedna čestica u pojedinom energetskom stanju. To je osnovni princip na kojem su sazdana atomi kao osnovni elementi sve pojavne tvari.

Slika 1: Shematski prikaz Bose-Einsteinove raspodjele za sistem čestica na temperaturi T . Prikazan je prosječni broj čestica n_i koje se nalaze u stanju i s energijom E_i . Parametar μ određuje energiju potrebnu da se sistemu pridruži dodatna čestica. Lijeva strana prikazuje općenitu raspodjelu iznad kritične temperature T_k desna strana prikazuje zauzetost najnižeg energetskog stanja kad je $T < T_k$.



Bozoni su sušta suprotnost, oni vole biti svi u istom stanju, i ne samo to, nego što ih je više na okupu to je veća vjerojatnost da im se pridruži još jedan. Njihova se raspodjela matematički prikazuje funkcijom (vidi sliku 1)

$$n_i = 1 / (e^{(E_i - \mu) / kT} - 1)$$

gdje T predstavlja temperaturu a μ energiju potrebnu da se sistemu doda jedna čestica. (6)

Težnja bozona za grupiranjem osnovna je nit koja povezuje gore spomenute fenomene kao što su superprovodnost u metalima, superfluidnost u tekućem heliju ili, već u svakodnevnom životu prisutnom laseru. U laseru se pobuđeni atomi zrače energiju u vidu monokromatskog pojačanja. Jedan spontano nastali foton (bozon)

(navodi) emisiju drugih isto takvih fotona što rezultira lavinom istovrsnih fotona. To emitiranom svjetlu daje jednobojnosti daje izuzetno visok stupanj koherencije (Vidi: predavanje o laserima H. Skenderovića). Makroskopski kvantni efekti na neki način manifestacija efekta bozonske stimulacije.

Bose-Einsteinova kondenzacija - fazni prijelaz

U B-E raspodjeli pojavljuje se temperatura kao parametar. Koje je njeno značenje? I što je to hlađenje? Promatramo zatvorenu posudu s nekim plinom. Kad bismo mogli promatrati pojedinačne molekule tog plina, bismo da se one sve kreću različitim brzinama i slučajno određenim smjerovima. Ako usrednjimo kvadrat brzine, dobit ćemo veličinu koja je proporcionalna apsolutnoj temperaturi sistema, (7)

$$T \propto \frac{\langle v^2 \rangle}{k_B}$$

gdje je k_B Boltzmannova konstanta. Smanjiti temperaturu znači smanjiti prosječnu brzinu čestica. $T = 0$ bi značilo da sve čestice u posudi u stanju mirovanja. (Tu se treba ograditi: potpuno mirovanje je naravno moguće samo u slučaju relacija neodređenosti).

Na primjer na sobnoj temperaturi brzina atoma je reda veličine 10^5 cm/s, dok ohlađeni na nekoliko mikrokelvinu imaju brzinu svega nekoliko cm u sekundi. Sljedeći pojam koji nam treba vezan je uz valnu prirodu tvari (materije). Najmanji djelići na koje se tvar može rastaviti bez razdvajanja na nabijene čestice pokazuju matematička svojstva čestica ili valova. De Brogliejeva valna duljina atoma jednaka je

$$\lambda_{DB} = \frac{h}{mv}$$

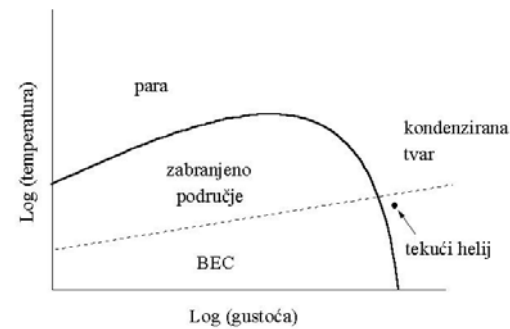
gdje je m masa čestice. Povezujući taj izraz s temperaturom dobijamo

$$\lambda_{DB} \propto \frac{1}{\sqrt{T}}$$

Na sobnoj temperaturi de Brogliejeva valna duljina je 10000 puta manja od prosječne udaljenosti na kojoj se nalaze u nekom plinu. Što je hladniji uzorak u posudi (atomi usporavaju), de Brogliejeva valna duljina je veća. Na 100 K ona je reda veličine 0.1 nm, a na mikrokelvinu oko 1 mikrometra). Ne možemo reći da su atomi naravno povećala veličina valnog paketa koji kvantnomehanički opisuje atom. Kad temperatura padne u područje niskih temperatura, valne duljine postaju usporedive sa srednjom udaljenošću između atoma. Tada postaje važno jesu li atomi bozoni. Fermioni će se početi odbijati u nastojanju da sačuvaju svoju teritorijalnu opstojnost. No bozoni će privlačiti jedan drugoga, i u skladu s Bose-Einsteinovom statistikom, žele okupirati svi isto kvantno stanje - Bose-Einsteinov kondenzat.

Postojanje tog efekta predvidio je Einstein još dvadesetih godina ovog stoljeća. Zašto je taj efekt opažen tek mnogo kasnije? Zato što nije trivijalno ohladiti neki plin a da se on pri tom ne skrutne i postane tvrdo tijelo, odn. tekućina (npr. helij). U tvrdom tijelu, za svaki se atom zna gdje je, nisu više neraspoznatljivi i B-E statistika je neprimjenjiva.

Slika 2: Univerzalni fazni dijagram (8) može u principu biti primijenjen na sve tvari. On pokazuje kako se stanje tvari odnosi spram temperature i gustoće. Debela linija označava faznu granicu. Na niskim gustoćama i visokim temperaturama sve je para. Na visokim gustoćama i niskim temperaturama sve je kondenzirano (zgusnuto) ili u tekućinu ili u čvrstu tvar. Ispod krivulje, zabranjeno je područje, u koje se ne može doći u uvjetima termičke ravnoteže. Crtkani pravac, koji leži duboko u zabranjenom području pokazuje prijelaz u stanje BEC-a. Slučaj tekućeg helija jedini je koji se nalazi izvan zabranjenog područja.

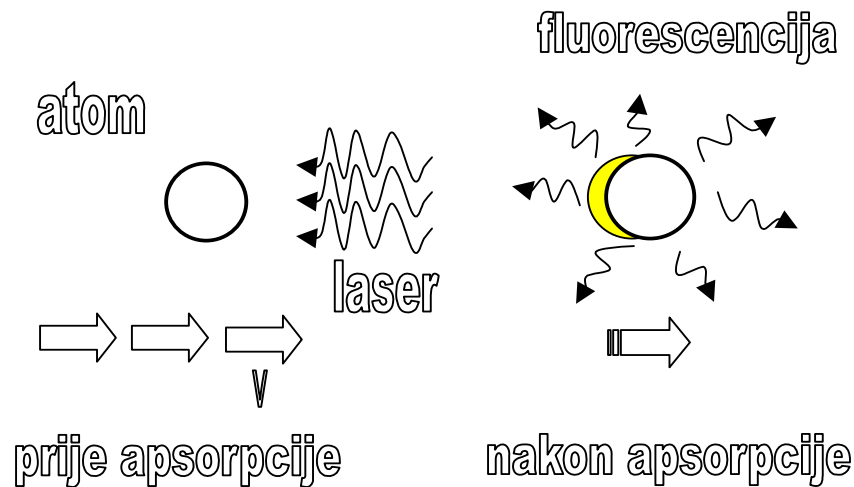


Iz svakodnevnog života poznato nam je što se dešava npr. hlađenjem vodene pare. Za stvaranje kapljica pahuljica potrebne su jezgre kondenzacije ili višestruki sudari nekoliko molekula istovremeno (znači veliki pak sudari sa zidovima posude).

Za uspješno hlađenje bez ukapljivanja potrebno je dakle imati vrlo čistu posudu i nekako spriječiti da česte sudare zidove. Pored toga, glavni je trik raditi na tako malim gustoćama gdje su trostruki atomski sudari manje vjerojatni (trostruki sudari mogu dovesti do stvaranja molekula i ukapljivanja i stoga su nepoželjni). No, to znači da su potrebne izuzetno male temperature.

Za ostvarenje tih zahtjeva trebalo je ispuniti, pored ultravisokog vakuuma (10^{-11} mbara), neke tehnološke preduhvaljavanja. U zadnjih desetak godina atomski i molekularni fizičari razvili su posebne tehnike hlađenja (usporavanja) atoma na interakciji s laserskim svjetlom i zarobljavanja atoma u magnetskim stupicama.

Slika 3: Princip laserskog hlađenja. Spontana emisija (fluorescencija) dešava se u bilo kojem smjeru i u prosjeku ne vodi promjeni



Tehnički opis BEC-a:

Kako izgleda eksperiment Carla Wiemana i Erica Cornell-a? Pare rubidijevih atoma smještene su u maloj staklenoj kutiji (2.5 x 2.5 x 2.5 cm), priključenoj na vakuumske pumpe koje mogu ostvariti ultravisoki vakuum (10^{-10} mbara). Šest laserskih snopova iz svih smjerova gura atome u sredinu i hladi ih. Uslijed toga atomi postaju vrlo hladni, do 10 mikrokelvina uz gustoću od 10^{11} atoma/cm³.

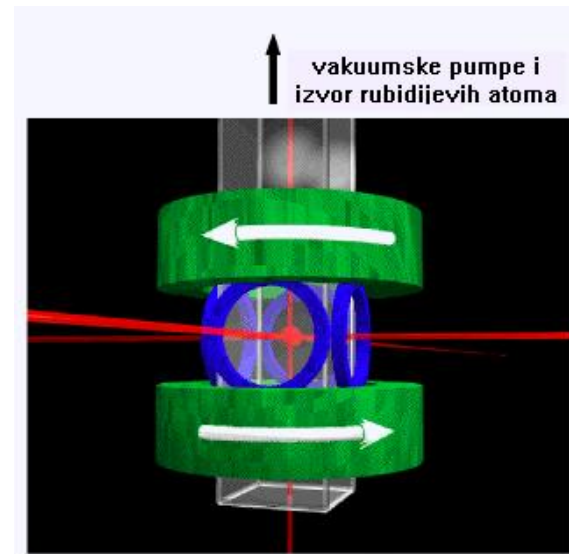
To je još daleko od uvjeta potrebnih za BEC, tek prvi korak. Laseri se isključuju, i da se ništa drugo ne poduzme hladni atomski oblak pao bi na dno posude pod utjecajem gravitacijske sile i tamo se kondenzirao. No kako se oni gibaju brzinom od svega nekoliko centimetara u sekundi moguće ih je zahvatiti u relativno slabom magnetskom polju. U tu svrhu služe zavojnice postavljene oko posude.

Puštanjem struje kroz zavojnicu stvori se magnetsko polje koje međudjeluje s magnetskim momentom atoma. Magnetsko polje se tako pripremi da atomi ostanu zahvaćeni u nečemu što izgleda kao zdjelica paraboličnog potencijala. Zatim se počinje ključni treći korak u postizanju BEC-a - **hlađenje isparavanjem**. Polaganim snižavanjem visine zdjelice

("vrućim") atomima da pobjegnu iz stupice. To se postiže primjenom radio-frekventnog magnetskog polja koje mijenja spin atoma od onoga "up" koji magnetska stupica privlači u "down", koji stupica odbija. Na taj način preostali atomi postaju još hladniji (sporiji) i zauzimaju sve manji volumen. Njihova gustoća raste iako temperatura pada. Da bi se dokazalo postojanje BEC-a, atomski oblak se obasjava laserskim snopom ugođenim na rezonanciju s atomskim prijelazom. Atomi raspršuju svjetlost u svim smjerovima. To stvara sjenu u spotu laserskog snopa koja se promatra na CCD kameri. Tamna područja odgovaraju velikoj gustoći atoma. Mjereći stupanj zatamnjenja atomskog oblaka, saznaje se njegova prostorna raspodjela, iz koje je moguće rekonstruirati raspodjelu po brzinama.

Takva je slika koja prikazuje prijelaz iz ohlađenog plina (desno) u Bose-Einsteinov kondenzat (lijevo) prikazana je na prvoj stranici. Prosječna brzina atoma u šiljku kondenzata bila je 0.5 milimetra u sekundi. Veličine kondenzata dosežu i do par stotina mikrona.

Lasersko hlađenje (slika 3) temelji se na prijenosu momenta od svjetlosti (fotona) na atome. Pored energije E , svjetlost foton ima moment $p=h/\lambda$ i intrinzični kutni moment. Atom koji apsorbira taj foton osjetit će promjenu momenta, odnosno promjenu u brzini u iznosu od p/m . Jednako se može učiniti (promjena brzine od nekoliko cm/s), raspršujući svjetlu ima ih izuzetno mnogo istovrsnih pa brojne atome proizvesti veliku promjenu brzine. Atom apsorbira foton određene frekvencije koja odgovara energiji određenog prijelaza. Kad se atom kreće, on vidi fotone pomaknute zbog iznosa Dopplerovog pomaka. Moguće je ugasiti svjetlost određene frekvencije tako da će samo atomi koji se kreću u određenom smjeru raspršivati fotone. To usporava brže atome i sužava brzina. Na taj način, ako se snopovi pošalju iz svih smjerova, prema zadanom volumenu, atomi u tom prostoru uvjetuju silu protivnu njihovom smjeru gibanja. Bit će usporedivo s "optičku melasu". Na taj način u vrlo kratkom vremenu, nekoliko mikrosekundi moguće je ohladiti atome u područje malog volumena. doprinose u tom polju trojica fizičara, Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji i Bill Phillips, podijelili su Nobelovu nagradu.



Slika 4: Shematski prikaz ćelije za BEC
<http://www.colorado.edu/physics/2000/bec>

Princip **hlađenja isparavanjem** poznat je iz svakodnevnog života. Kad nalijemo vrući čaj u šalicu efikasno ćemo ga ohladiti ako ostavimo otklopljenog. Vruće molekule vode u vidu para napuštaju prostor, a preostala tekućina ostat će hladnija. Time se tekućine izgubi ali je hlađenje brzo.

Razvoj događaja

Ubrzo nakon objave prvih rezultata C. Wiemana i E. Cornella, nekoliko je drugih grupa također objavilo postignuća. Velika utrka je počela. Lijep pregled događanja može se naći na web stranici Sveučilišta Južne Georgije. U zadnjih godinu dvije dana prijavljeno je dvadesetak novih opažanja BEC-a, na natriju, rubidiju i litiju. Opažani na temperaturama od 300 do 600 nanokelvina, uz 10^4 do 10^7 atoma u kondenzatu. Pravi prodor u područje BEC-a dogodio se 1998., kad su Thomas Greytak i Daniel Kleppner, vođe grupe sa MIT-a, SAD-a, objavili postignuće BEC-a na vodikovom jezgri (9). Njihov se BEC prijelaz desio na većoj temperaturi, 50 mikrokelvina, (zbog manje mase vodikovih atoma) obuhvatio 10^9 atoma u kondenzatu. To je znatno više nego kod alkalijskih atoma jer su gubici uslijed trošenja atoma u vodik zanemarivi. Time su zaokružili svoja čak dvadesetogodišnja nastojanja da postignu BEC u vodikovom jezgri nove mogućnosti preciznijih usporedaba s teorijom. U proteklih nekoliko godina tehnike kondenzacije su usavršene. Nakon hlađenja u magnetskoj stupici atomi se prebacuju u *optičku stupicu*. To dalje širi mogućnosti proučavanja kondenzata i njihovu manipulaciju npr. kao što se optičkim pincetama miču makro objekti. Optička stupica omogućava zadržavanje u kondenzatu atoma u različitim (hiperfinim) unutrašnjim stanjima. Nedavno su postignute optičke stupice koje zadržavaju atome i do 5 minuta (11).

Značaj postignuća

Bose-Einsteinova kondenzacija je trenutno jedan od najzanimljivijih fenomena u fizici. Zašto postoji tako veliko zanimanje za BEC? Ukratko, radi se o makroskopskoj manifestaciji valne funkcije i mogućnosti da se njome manipulira a da se izbjegne njena destrukcija što je inače osnovni problem mjerenja u kvantnoj fizici.

Naime kako mnoštvo atoma dijeli istu valnu funkciju opažanje "izbacuje" samo neke od njih. Posebnu pažnju privlače analogije s koherentnim pojavama vezanim uz suprafluidnost i supravodljivost. Tako je nedavno opažen i efekt Josephsonovom efektu u supravodičima i suprafluidnom heliju (12). (vidi predavanje o suprafluidnosti i efektu kvantnog tuneliranja magnetizacije (Zadro)) kao i efekt višeslojnosti BEC-a u različitim hiperfinim stanjima (npr. pojava u suprafluidnom He-3). BEC ne samo da nudi analogije nego i iznenađenja kao npr. uspoređivanje svjetlosti samo 17 m/s.

Optička stupica bazira se na sili (induciranom optičkom) kojom snažno lasersko polje djeluje na atome. Realizirana je pomoću fokusiranja lasera čija je frekvencija daleko iznad rezonancija ili stvaranjem stojnog vala pomoću jednog zrcala. Optička stupica djeluje na sve atome, uključujući i atome u magnetskim stupicama za koje je bitno postojanje magnetskih polja. Za ostvarenje o. s. važna je frekventna stabilnost i odličan ultravisoki vakuum.

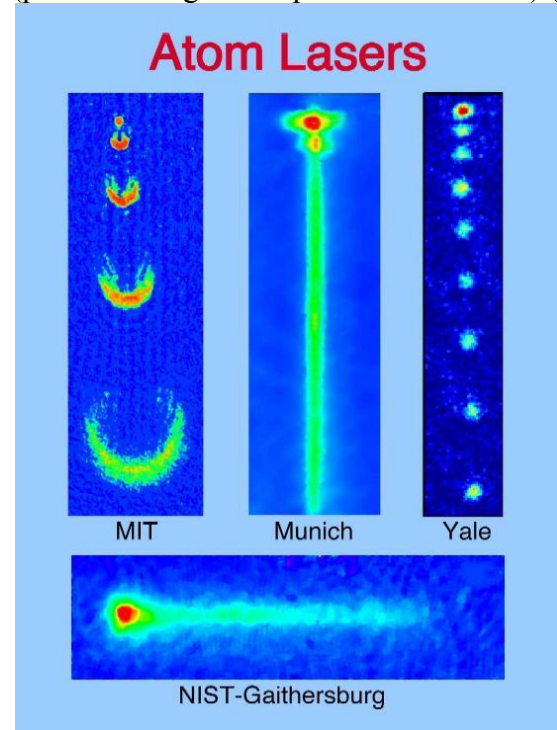
Atomski laser

Prvu primjenu BEC-a demonstrirala je grupa istraživača dr. Wolfganga Ketterlea sa MIT-a, 1997. godine. Konstruirali uređaj - **atomski laser** (14), temeljen na BEC-u, koji analogno svjetlosnom laseru, emitira koherentne valove atoma. Primjenom radio valova na kondenzat natrijevih atoma u magnetskoj stupici, uspjeli su izbaci kondenzat u formi snopa, analogno izlaženju svjetlosti (fotona) kroz jedno od zrcala laserskog rezonatora. Pokazali su koherentnost kondenzata, - atomski valovi u kondenzatu putuju u istoj fazi (brijeg do brijega), kao i lasersko svjetlo. U tu svrhu stvorili su dva kondenzata "režući" početni kondenzat laserom i pustili ih da se razdvoje i pada kroz vakuum ponovo prekriju i interferiraju, pokazavši pritom atomsku verziju tamnih i svijetlih interferentnog uzorku. Nakon prve objave rezultata ostalo je nejasno dolazi li u atomskom laseru do takvog procesa kao što je stimulirana emisija kod konvencionalnog lasera, koja dovodi do stvaranja jakog koherentnog snopa. Mnoge skeptike da tvrde kako termin atomski laser uopće nije prikladan, s obzirom na druge velike razlike između fotona i atoma. No u veljači 1998., ista Ketterleova grupa načinila je nov prodor pokazavši da je proces koji stvara Bose-Einsteinov kondenzat analogan procesu stimulirane emisije, to jest da atomi koji se već nalaze u kondenzatu privlače dodatne atome iz okoline stupice. Nazvali su taj proces bozonskom stimulacijom odnosno pojačanjem valova materije i prisilili skeptike da priznaju kako naziv atomski laser ima svoje puno opravdanje. Početkom 1999. godine pojavile su se nove generacije atomskih lasera (15). Grupa u NIST-u uspjela je

laserska snopa izdvajati koherentne atome iz kondenzata i time ostvariti atomski laser velike kolimacije u gravitaciji (16). Grupa u Münchenu postigla je prvi kontinuirani laser trajanja 100 ms (do pražnjenja zarobljavajući rubidijeve atome u posebno stabilnoj stupici (17). Grupa u Yale-u postigla je koherentno prebacujući kondenzat u periodičku optičku stupicu. Uslijed djelovanja gravitacije atomi tuneliraju kroz barijeru i šire se u vidu periodičkih pulseva koherentnih valova (proces analogan Josephsonovom efektu) (12).

Predviđanja

Ostvarenje BEC-a u razrijeđenim atomskim plinovima omogućava proučavanje problema više tijela i kvantnih statističkih efekata s preciznošću koju sa sobom nose eksperimenti atomske fizike. Još je rano za potpunije sagledavanje posljedica ovog velikog otkrića, no već sada se bilježi procvat [atomske optike](#), ogranka atomske i molekularne fizike u kojem se atomima barata kao što se u klasičnoj optici barata svjetlošću, posebno u razvoju [atomske interferometrije](#). Ne manje važno jest očekivanje unapređenja primarnih standarda vremena - [atomskih satova](#) i preciznosti mjerenja osnovnih fizikalnih konstanti. Značajne su i moguće primjene u [nanotehnologiji](#), npr. atomskoj litografiji (proizvodnji minijaturnih elektroničkih sklopova pomoću atomskih snopova) (18,19). Potvrdu izuzetnog širenja istraživanja daje i najnovije ostvarenje



Slika preuzeta s

<http://www.aip.org/physnews/graphics/html/alaser99>.

četverovalnog miješanja valova materije čime je započeto novo područje nelinearne atomske optike (20). Tehnike hlađenja atoma toliko su napredovale da je već moguće hladiti vrlo uspješno i fermione (npr. kalij oko 0.5 mikrokelvina (ožujak 1999. (22)), što je vrlo blizu tzv. Fermijevoj temperaturi (temperatura koja određuje energijsku razinu koju fermioni moraju imati čak i na apsolutnoj nuli zbog Paulijevog principa isključivanja). Ohlađeni plin bit će plin u kojem nema međudjelovanja između čestica, nudeći nove fantastične primjene. Degenerirani fermionski plin vjerojatno je, kao BEC danas, tema predavanja na nekoj od sljedećih ljetnih škola.

Zaključak:

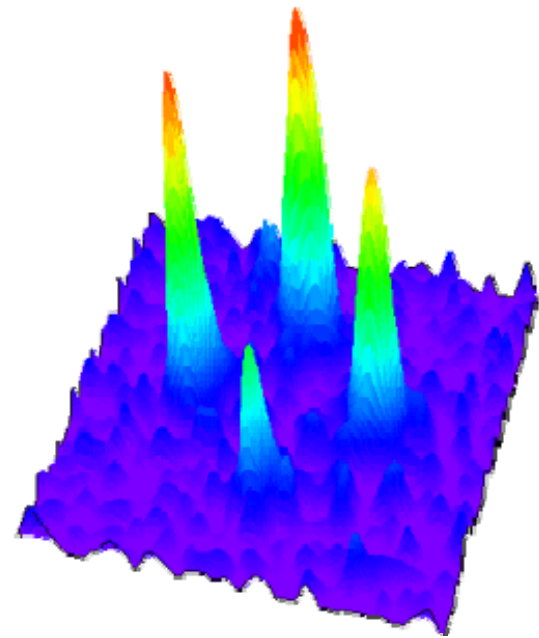
Za samo jedno predavanje, koje bi trebalo biti na popularnoj razini, previše je novih pojmova koje bi trebalo vezati uz BEC. Mnogi su zato samo spomenuti uz odgovarajuću referencu, s ciljem da ocrtaju obilježja događanja u jednom uzbudljivom području fizike. Reference su dostupne ili na internetu ili u bibliotekama I u Zagrebu.

Mnogo je ljudi koji su skloni usporediti značaj događanja u atomskoj i molekularnoj fizici i bliskim granama iz desetak godina (pored BEC-a, tu je atomska interferometrija, fizika hladnih sudara, manipuliranje pojedinačnim atomima pomoću mikroskopa sa skenirajućom probom (STM, AFM) itd.) s postignućima s početka ovog stoljeća predviđajući razvoj moderne kvantne fizike. To tek treba vidjeti, no utjecaj na nove tehnologije, prije svega nanotehnologiju, svakako će biti velik. Poticajno je biti suvremenikom tih otkrića

Četverovalno miješanje poznati je primjer efekta u nelinearnoj optici. Omogućuje ga snažno lasersko svjetlo koje prolaskom kroz medij mijenja njegov indeks loma. Tri laserska snopa, prekrivajući se, obasjavaju nelinearni medij i stvaraju četvrti val (snop). Frekvencija (boja) i moment generiranog vala jednak je sumi ili razlici frekvencija i momenata triju upadnih snopova.

U analognom eksperimentu na NIST-u (ožujak 1999, (21)), jedan Bose-Einsteinov kondenzat natrijevih atoma rascijepjen je uz pomoć laserskog snopa na tri koherentna vala materije različitih brzina (Tri veća roščića na slici). Ta tri vala su zatim pomiješana i stvorila putem nelinearnih atom-atom međudjelovanja četvrti novi val s različitim momentom. Naravno ukupni broj atoma je sačuvan, novi je snop koherentnih atoma crpio atome iz početna tri.

Očekuje se da će, kao što je nelinearna optika početkom 1960-tih godina ukazala na neobične kvantne pojavnosti svjetlosti (*kvantne optike*), ovaj eksperiment predstavljati temelj razvoja kvantne *atomske optike*.



Slika četverovalnog miješanja valova materije preuzeta s <http://physics.nist.gov/Division/Div842/Gp4/AtomOpt/>

Literatura

1. http://www.the-scientist.library.upenn.edu/yr1999/may/bunk_p16_990524.html
<http://www.reed.edu/~rsavage/terms.html>
2. M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, E. A. Cornell, Science, **269** 198 1995.
3. <http://amo.phy.gasou.edu/bec.html/popular.html>
4. <http://www.watertown.k12.wi.us/hs/teachers/buescher/atomtime.html>
5. <http://pdg.lbl.gov/cpep/classification.html>
6. <http://atomcool.rice.edu/local/bec/becdesc.html>
7. http://www.avh.de/engl/Mitt9711_Mey.htm
8. <http://physics.nist.gov/Pubs/Bec/j4cornel.pdf>
9. D. G. Fried, T. C. Killian, L. Willmann, D. Landhuis, S. C. Moss, D. Kleppner and T. J. Greytak, Phys. Rev. Lett. **81**, 3811 (1998).
10. D. M. Stamper-Kurn et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 2
11. <http://focus.aps.org/v3/st29.html>
12. B.P. Anderson and M. A. Kasevich, Science, **282**
13. <http://eskola.hfd.hr/proc\ za\ vas/proc-7/proc7.h>
14. <http://eskola.hfd.hr/proc\ za\ vas/proc-1/proc1.h>
15. Physics Today, April 1999, p. 17
16. E. W. Hagley et al., Science **283**, 1706 (1999).
17. I. Bloch et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 3008 (1999).
18. E. A. Cornell i C. E. Wieman, The Bose-Einstein
Scientific American, March 1998, str. 26-31;
19. R. Irion, Altered State, New Scientist, June 1998,
20. http://www.nist.gov/public_affairs/releases/n99-0
21. L. Deng et al., Nature, **398** 218 (1999).
22. M. R. Andrews, Nature, **398** 195 (1999).