

# Bose-Einsteinova kondenzacija u razrijeđenim parama: novo makroskopsko kvantno stanje materije

Slobodan Milošević<sup>1</sup>

## Uvod

U lipnju 1995. znanstvenim svijetom pronijela se vijest koja je uzburkala maštu fizičara. Carl Wieman sa Sveučilišta u Coloradu i Eric Cornell s Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju sa svojom grupom uspjeli su ohladiti paru rubidijevih atoma do tako niske temperature da se tisuće atoma sjedinilo u jedno isto kvantno stanje formirajući novo stanje tvari: Bose-Einsteinov kondenzat (BEC), [1].

Priču moramo početi s nekim osnovnim pojmovima iz svijeta kvantne fizike koji govore o spinu, bozonima, fermionima, njihovim statističkim raspodjelama itd. Krenimo nekim redom.

Jedno je od najznačajnijih saznanja s početka 20. stoljeća da je čitav svijet sastavljen od elementarnih čestica i njihovih složenica. Sve se one mogu razvrstati, na temelju spina<sup>2</sup>, u dvije grupe: bozone i fermione. Bozoni su čestice koje imaju cjelobrojni spin – njihov kutni moment je 0, 1, 2 itd. u jedinicama reducirane Planckove konstante  $h/2\pi$ . 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. Njihove složenice – atomi mogu biti ili bozoni ili fermioni zavisno o tome da li sadrže paran ili neparan broj elementarnih fermiona.

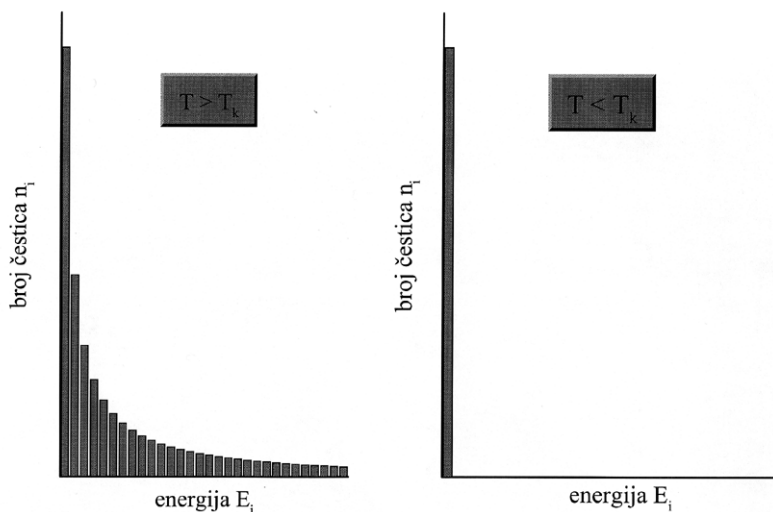
Bozoni i fermioni dobili su svoja imena po tome što njihove raspodjele po energetske stanjima opisuju različite funkcije: Bose-Einsteinova raspodjela i Fermi-Diracova raspodjela.

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

Bozoni su sušta suprotnost, oni vole biti svi u istom stanju, i ne samo to, nego što ih je više na okupu veća je vjerojatnost da im se pridruži još jedan. Njihova se raspodjela matematički prikazuje funkcijom  $n_i = 1/(e^{(E_i - \mu)/kT} - 1)$  (vidi sliku 1).

<sup>1</sup> Autor je znanstveni savjetnik u trajnom zvanju na Institutu za fiziku u Zagrebu gdje radi na području atomske i molekularne fizike (laserska spektroskopija); e-pošta: slobodan@ifs.hr. Članak je objavljen šk. god. 1998/99.

<sup>2</sup> Spin je kvantno fizikalno svojstvo koje se teško može zorno predočiti. Često ga predstavljamo kao rotaciju čestice (objekta) oko osi koja je u potpunosti neovisna o njenom gibanju i međudjelovanju s ostalim česticama. Kada se neka čestica ili objekt vrti, pridružujemo mu kutnu količinu gibanja (zama) za koji vrijedi zakon sačuvanja. U kvantnoj mehanici svaka se čestica matematički opisuje valnom funkcijom koja sadrži i kutni moment (količinu gibanja). Samo čestice koje imaju kutnu količinu gibanja, koja je cjelobrojni višekratnik od reducirane Planckove konstante  $\frac{h}{2\pi}$ , ostaju nepromijenjene nakon rotacije za  $360^\circ$ . No, postoje čestice čija se valna funkcija ne vraća u isto stanje nakon rotacije za  $360^\circ$  nego tek nakon rotacije za  $720^\circ$ . Te čestice imaju kutni moment koji je cjelobrojni višekratnik od  $\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$ . (To je situacija koja, na prvi pogled, proturiječi svakodnevnom iskustvu, no moguće ju je zorno predočiti uz pomoć puža na Möbiusovoj plohi. Zamislimo da puž napravi jedan krug po ovoj plohi, naći će se naglavce, mora napraviti još jedan krug od  $360^\circ$  da dođe u isto stanje kao na početku.)



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  $\mu$  određuje energiju potrebnu da se sistemu pridruži dodatna čestica. Lijeva strana prikazuje općenitu raspodjelu iznad kritične temperature  $T_k$ , desna strana prikazuje zauzetost najnižeg energetskeg stanja kad je  $T < T_k$ .

Ta težnja bozona za grupiranjem očituje se u prirodi u nekoliko fenomena kao što su supravodljivost u metalima, superfluidnost u tekućem heliju ili, već u svakodnevnom životu prisutnom laseru. U laseru se postiže da skup pobuđenih atoma zrači energiju u obliku monokromatskog pojačanja. Jedan spontano nastali foton (bozon), stimulira (navodi) emisiju drugih istih takvih fotona što rezultira lavinom istovrsnih fotona. To emitiranom svjetlu osim snage i jednobojnosti daje izuzetno visok stupanj koherencije.

### Bose-Einsteinova kondenzacija – fazni prijelaz

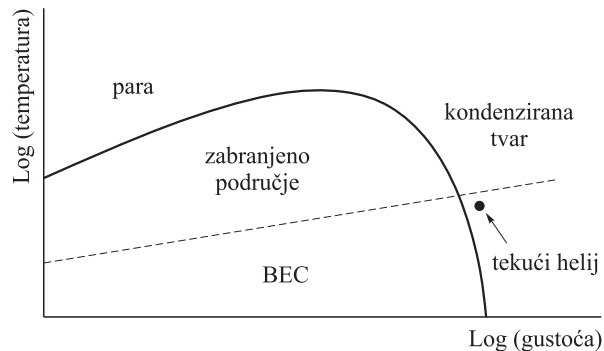
Da se približimo pojmu BEC-a promatramo zatvorenu posudu s nekim plinom. Kad bismo mogli promatrati pojedinačne molekule tog plina vidjeli bismo da se one sve kreću različitim brzinama i slučajno određenim smjerovima. Ako usrednjimo kvadrat brzine dobit ćemo veličinu koja je proporcionalna apsolutnoj temperaturi sistema,  $T \sim \frac{v^2}{k_B}$ , gdje je  $k_B$  Boltzmannova konstanta. Smanjiti temperaturu znači smanjiti prosječnu brzinu čestica.  $T = 0$  znači da su sve čestice u posudi u stanju mirovanja.

Na primjer, na sobnoj temperaturi brzina atoma je reda veličine  $10^5$  cm/s, dok ohlađeni na nekoliko mikrokelvina imaju brzinu svega nekoliko cm u sekundi.

Sljedeći pojam koji nam treba vezan je uz valnu prirodu tvari (materije). Atomi kao najmanji djelići na koje se tvar može rastaviti bez razdvajanja na nabijene čestice pokazuju matematička svojstva, ili čestica ili valova. De Brogliejeva valna duljina atoma jednaka je  $\lambda_{DB} = h/mv$ , gdje je  $m$  masa čestice. Povezujući taj izraz s temperaturom dobijamo  $\lambda_{DB} \sim \frac{1}{\sqrt{T}}$ .

Što je hladniji uzorak u posudi (atomi se usporavaju), veća je de Brogliejeva valna duljina (npr. na 100 K ona je reda veličine 0.1 nm, a na mikrokkelvinu oko 1 mikrometar). Ne možemo reći da su atomi narasli, nego se povećala veličina valnog paketa koji kvantnomehanički opisuje atom. U uvjetima tako velike valne duljine, kad je ona usporediva sa srednjom udaljenošću između atoma postaje važno jesu li oni fermioni ili bozoni. Fermioni će se početi odbijati u nastojanju da sačuvaju svoju teritorijalnu opstojnost. No bozoni počinju privlačiti jedan drugog, i u skladu s Bose-Einsteinovom statistikom, žele okupirati svi isto kvantno stanje – tvore Bose-Einsteinov kondenzat.

Postojanje tog efekta predvidio je Einstein još dvadesetih godina 20. stoljeća. Zašto je taj efekt opažen tek nedavno? Zato što nije trivijalno ohladiti neki plin a da se on pri tom ne skrutne i postane tvrdo tijelo (vidi sliku 2).



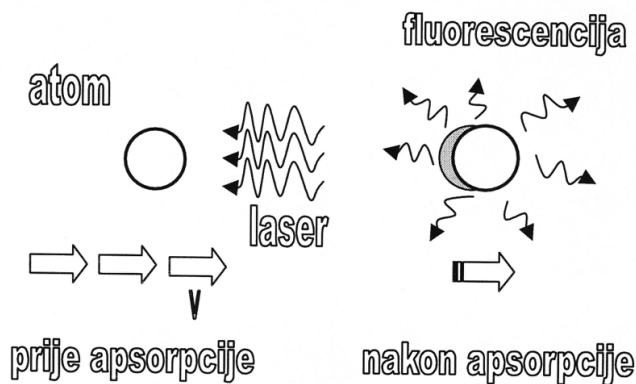
Slika 2. Univerzalni fazni dijagram može u principu biti primijenjen na sve tvari. On pokazuje kako se stanje tvari odnosi spram temperature i gustoće. Debeli linija označava faznu granicu. Na niskim gustoćama i visokim temperaturama sve je para. Na visokim gustoćama i niskim temperaturama sve je kondenzirano (zgasnuto) 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.

U tvrdom tijelu, za svaki se atom zna gdje je, nisu više nerazpoznatljivi i B-E statistika je neprimjenjiva. Iz svakodnevnog života poznato nam je što se dešava npr. hlađenjem vodene pare. Za stvaranje kapljica ili snježnih pahuljica potrebne su jezgre kondenzacije ili višestruki sudari nekoliko molekula istovremeno (znači velike gustoće) ili pak sudari sa zidovima posude (svakog hladnog jutra to su prozori mog auta). Naime, dvije čestice koje se sudare neće ostati zajedno (zakon sačuvanja impulsa!), potrebna je treća da odnese višak impulsa.

Za uspješno hlađenje potrebno je dakle imati vrlo čistu posudu i nekako spriječiti da čestice dodiruju zidove. Pored toga, glavni je trik raditi na tako malim gustoćama gdje su trostruki atomski sudari malo vjerojatni. No, to znači da treba postići izuzetno male temperature. Za ostvarenje tih zahtjeva trebalo je ispuniti neke tehnološke pretpostavke.

U zadnjih desetak godina atomski i molekularni fizičari razvili su posebne tehnike hlađenja (usporavanja) atoma temeljene na laserskom svjetlu i zarobljavanja atoma u magnetskim stupicama<sup>3</sup>. Za doprinose u tom polju trojica fizičara podijelili su Nobelovu nagradu 1997. godine (vidi MFL 1997./98. broj 3/191, str. 152).

<sup>3</sup> Lasersko hlađenje temelji se na prijenosu momenta impulsa sa svjetlosti (fotona) na atome. Foton ima moment  $p = h/\lambda$ . Atom koji apsorbira taj foton osjetit će promjenu u momentu i shodno tome promjenu u brzini u iznosu od  $p/m$ . Jedan foton malo može učiniti, no u laserskom svjetlu ima ih izuzetno mnogo istovrsnih. Atom apsorbira



Slika 3. Princip laserskog hlađenja.

### Tehnički opis BEC-a

Kako izgleda eksperiment C. Wiemana i E. Cornella? Pare rubidijevih atoma smještene su u maloj staklenoj kutiji ( $2.5 \times 2.5 \times 2.5$  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/cm<sup>3</sup>. 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 (vidi sliku 4). 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 oblika. Tu počinje ključni treći korak u postizanju BEC-a – *hlađenje isparavanjem*<sup>4</sup>. Polakim snižavanjem visine zdjelice dopušta se brzim (“vrućim”) atomima da pobjegnu iz stupice<sup>5</sup>. Na taj način preostali atomi postaju još hladniji (sporiji) i zauzimaju sve manji volumen. Njihova gustoća raste iako temperatura pada.

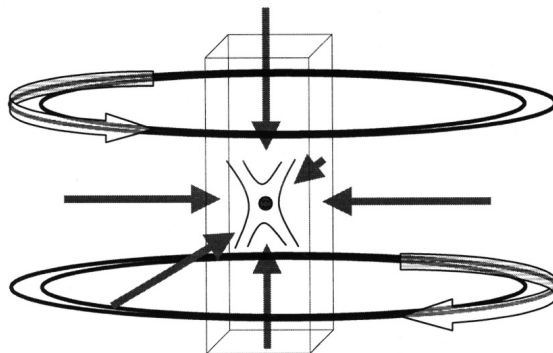
Da bi se dokazalo postojanje BEC-a, atomski oblak se obasjava laserskim snopom ugođenim na rezonanciju s atomskim prijelazom. Atomi raspršuju svjetlost u svim smjerovima. To stvara sjenu u spotu laserskog snopa koja se promatra na CCD kameri. Tamna područja odgovaraju velikoj gustoći atoma. Mjereći stupanj zatamnjenja

foton samo određene frekvencije koja odgovara energiji određenog elektronskog prijelaza. Kad se atom kreće, on vidi fotone pomaknute u frekvenciji za iznos Dopplerovog pomaka. Moguće je ugoditi lasersku frekvenciju tako da će samo atomi koji se kreću prema snopu raspršivati fotone. Na taj način, ako se snopovi pošalju iz svih smjerova prema zadanom volumenu, atomi u tom prostoru uvijek će osjećati silu protivnu njihovom smjeru gibanja. Bit će usporeni i uhvaćeni u “optičku molasu”.

<sup>4</sup> Princip *hlađenja isparavanjem* poznat je iz svakodnevnog života. Kad nalijemo vrući čaj u šalicu efikasno ćemo ga ohladiti ako ga ostavimo otklopljenog. Vruće molekule vode u vidu pare otići će u prostor, a preostala tekućina ostat će hladnija. Time se nešto malo tekućine izgubi, ali je hlađenje brzo.

<sup>5</sup> To se postiže primjenom radiofrekventnog magnetskog polja koje mijenja spin atoma od onoga “up” koji magnetska stupica privlači u “down”, koji stupica odbija.

atomskeg 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 na prvoj stranici omota ovog broja. Prosječna brzina atoma u šiljku kondenzata bila je 0.5 milimetra u sekundi.



Slika 4. Shematski prikaz ćelije za BEC.

---

### Slijed događaja

---

Ubrzo nakon objave prvih rezultata C. Wiemana i E. Cornella, nekoliko je drugih grupa također objavilo postizanje BEC-a. Velika utrka je počela. Lijep pregled događanja može se naći na web-stranici Sveučilišta Južne Georgije, [2]. Samo u zadnjih godinu dana prijavljeno je desetak novih opažanja BEC-a, na natriju, rubidiju i litiju. Prijelazi su opažani na temperaturama od 300 do 600 nanokelvina, uz  $10^4$  do  $10^7$  atoma u kondenzatu. Pravi prodor učinjen je prošlog ljeta kad su Thomas Greytak i Daniel Kleppner, vođe grupe s Massachusetts Institute of Technology (MIT), SAD-a, objavili postignuće BEC-a na atomskom vodik, [3]. Njihov se BEC prijelaz desio na većoj temperaturi, 50 mikrokelvina, (zbog manje mase vodikovog atoma) i obuhvatio  $10^9$  atoma u kondenzatu. To je znatno više nego kod alkalijskih atoma jer su gubici uslijed troatomske sudara u vodik zanemarivi. Time su zaokružili svoja, čak dvadesetogodišnja, nastojanja da postignu BEC u vodik i otvorili nove mogućnosti preciznijih usporedaba s teorijom.

---

### Značaj postignuća

---

Prva primjena BEC-a već je demonstrirana od strane grupe istraživača dr. W. Ketterlea također s MIT-a, 1997. godine. Oni su konstruirali uređaj – *atomska laser*, [4], temeljen na BEC-u, koji, analogno svjetlosnom laseru, emitira koherentni snop atoma. Primjenom radio valova na kondenzat natrijevih atoma u magnetskoj stupici, uspjeli su izbacivati pulseve kondenzata u formi snopa, analogno izlaženju svjetlosti (fotona) kroz jedno od zrcala laserskog rezonatora. Također, pokazali su koherentnost kondenzata – atomski valovi u kondenzatu putuju u istoj fazi (brijeg do brijega, dol do dola) kao i lasersko svjetlo. U tu svrhu stvorili su dva kondenzata “režući” početni kondenzat laserom i pustili ih da se nakon pada kroz vakuum ponovo prekriju i interferiraju, pokazavši

pritom atomsku verziju tamnih i svijetlih pruga u interferentnom 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. To je nagnalo mnoge skeptike da tvrde kako termin atomski laser uopće nije prikladan, s obzirom na druge velike razlike između fotona i atoma. No nedavno (Science, 13. veljače 1998.), ista Ketterleova grupa načinila je novi prodor pokazavši da je proces kojim se formira Bose-Einsteinov kondenzat analogan procesu stimulirane emisije, na način da atomi koji se već nalaze u kondenzatu, privlače dodatne atome iz okoline stupice. Nazvali su taj proces bozonskom stimulacijom odnosno koherentnim pojačanjem valova materije i prisilili skeptike da priznaju kako naziv atomski laser ima svoje puno opravdanje.

---

## Predviđanja

---

Još je rano za potpunije sagledavanje posljedica ovog velikog otkrića, no već sada se može s pravom očekivati 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), [5], [6].

Ima ljudi koji su skloni usporediti značaj događanja u atomskoj i molekularnoj fizici u zadnjih desetak godina (pored BEC-a, tu je atomska interferometrija, fizika hladnih sudara, mikroskopi sa skenirajućom probom) s postignućima s početka 20. stoljeća koja su bila preduvjet razvoja 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.

---

## Literatura

---

- [1] M. H. ANDERSON, J. R. ENSHER, M. R. MATTHEWS, C. E. WIEMAN, E. A. CORNELL, *Science*, **269** 198 1995.
- [2] Pregledi i događanja na webu: [http:// amo.phy.gasou.edu/bec.html/popular.html](http://amo.phy.gasou.edu/bec.html/popular.html)
- [3] D. G. FRIED, T. C. KILLIAN, L. WILLMANN, D. LANDHUIS, S. C. MOSS, D. KLEPPNER and T. J. GREYAK, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3811 (1998).
- [4] [http:// eskola.hfd.hr/ proc – za – vas/ proc-1/ proc1.htm](http://eskola.hfd.hr/proc_za_vas/proc-1/proc1.htm)
- [5] E. A. CORNELL i C. E. WIEMAN, *The Bose-Einstein Condensate*, Scientific American, March 1998, str. 26–31.
- [6] R. IRION, *Altered State*, New Scientist, June 1998, str. 27–30.