

Supravodljivost i suprafluidnost - uz Nobelovu nagradu za fiziku 2003 g.¹

Slaven Barišić²

Fizički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu,
Zagreb, Bijenička 32

Uvod

Supravodljivost je fizičko svojstvo koje znanstvenike fascinira još od kada ga je Kamerlingh Onnes 1911. g. otkrio i za to dobio Nobelovu nagradu (NN) 1913. g. Taj interes najbolje ilustrira činjenica da se od 96 NN koje su od 1901. g. dodijeljene za sva područja fizike čak njih devet (godine 1913., 1962., 1972., 1973., 1978., 1987., 1996., 2001., 2003.) izravno odnosi na supravodljivost i njoj srodnu suprafluidnost. Supravodljivost je i danas, 90-ak godina nakon njezina otkrića, jedno od najzanimljivijih područja istraživanja unutar fizike čvrstog stanja, odnosno, zajedno sa suprafluidnošću, unutar nešto šireg područja fizike zgusnute tvari. I prošlogodišnja Nobelova nagrada koju su dobili *Aleksej Abrikosov*,³ *Vitali Ginzburg*⁴ i *Anthony Leggett*,⁵ i koja je povod ovom tekstu, dodijeljena je za rezultate njihovih istraživanja supravodljivosti i suprafluidnosti.



Slika 1 Supravodič ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) lebdi iznad pola magneta jer je njegov magnetski moment M usmjeren suprotno od magnetskog polja H magneta.



Slika 2 Vlak lebdi na magnetskom polju centralne tračnice po principu slike 1 i kreće se bez kotača brzinom od oko 500 km/h.

¹ Rad je u izvornom obliku objavljen u Matematičko-fizičkom listu, LIV 3 (2003.-2004.) 161-169.

² sbarisic@phy.hr

³ Aleksej A. Abrikosov, američki i ruski državljani, rođen 1928. g. u Moskvi. Doktorat znanosti stekao 1951. g. na Institutu za fizičke probleme u Moskvi. Sada na položaju "istaknutog znanstvenika" u National Laboratory, Argonne, Illinois, SAD.

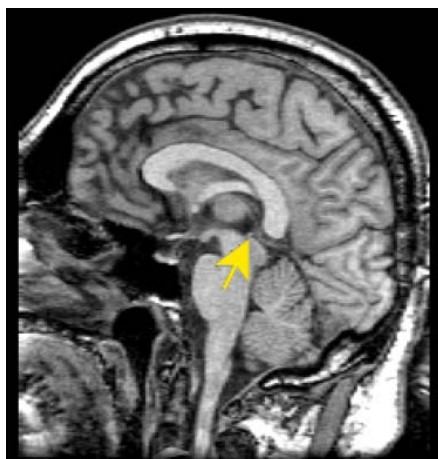
⁴ Vitali L. Ginzburg, ruski državljani, rođen 1916. g. u Moskvi. Doktorat znanosti stekao na Univerzitetu u Moskvi. Svojedobno pročelnik Teorijske grupe Lebedevljeva fizičkog instituta u Moskvi, Rusija.

⁵ Anthony J. Leggett, britanski i američki državljani, rođen 1938. g. u Londonu. Doktorat znanosti stekao 1964. g. na Univerzitetu u Oxfordu. Sada profesor na Sveučilištu Illinois u Urbana-Champaign, SAD.

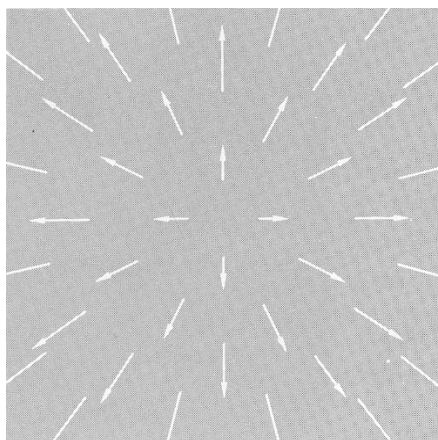
Dva su glavna razloga za tako izrazit interes znanstvenika, pa i šire javnosti, za supravodljivost i suprafluidnost. Ponajprije, fizička svojstva supravodljivosti iskorištena su, ili nagovještavaju da će biti još bolje iskorištena u revolucionarno novim visokim tehnologijama koja bi mogla promijeniti današnju sliku naše civilizacije. Tu treba ponajprije spomenuti prijenos električne energije bez za sada još velikih gubitaka, skladištenje proizvedene električne energije do trenutka vršne potrošnje, konstrukciju novih elektromotora i generatora.

Već se sve više širi proizvodnja moćnih magnetskih polja (sl. 1), upotrebljivanih u najrazličitije svrhe, od podizanja u lebdjenje čitavih ultrabrzih vlakova (sl. 2) do uvođenja novih medicinskih tehnika preciznog snimanja ljudskih organa (sl. 3) metodama nuklearne magnetske rezonancije (P.C: Lauterbur, P. Mansfield (fizičar), NN za medicinu (2003.)). Tu treba spomenuti i upotrebu supravodljivih kvantnih interferometara za mjerenje vrlo slabih magnetskih polja. Uz pojavu supravodljivih mikroelemenata (za velike računalne sustave), to su samo su neki primjeri novih visokih tehnologija o kojima se nedavno samo maštalo ili se još uvijek mašta.

Nadalje, na spoznajnoj razini, supravodljivost i suprafluidnost najfascinantije su manifestacije kvantne mehanike (KM) izravno dostupne ljudskim osjetilima (sl. 1). KM nam kaže da se položaj x i impuls p čestice (umnožak njezine mase i brzine) ne mogu ni najboljim



Slika 3 Snimka živog mozga nuklearnom magnetskom rezonancijom za koju su potrebna jaka i vrlo homogena magnetska polja.



Slika 4 Primjer vala $\psi(\vec{r}) = \psi_x(\vec{r}) + i\psi_y(\vec{r})$ u dvodimenzionalnom prostoru $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j}$. Vektori prikazuju $\psi = \vec{i}\psi_x + \vec{j}\psi_y$. Izabran je ψ s virom u $x=y=0$.

eksperimentom odrediti istovremeno, nego da su njihove odgovarajuće neodređenosti Δx i Δp najmanje takve da zadovoljavaju Heisenbergovu relaciju $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$, gdje je $\hbar$ Planckova konstanta, jednaka za sve čestice. Kada se ta relacija primijeni na objekte velike mase (npr. na bilijske kugle) vidi se da je kvantna neodređenost nevažna, odnosno da su tipične eksperimentalne pogreške u mjerenjima položaja i impulsa takvih objekata veće od odgovarajućih kvantnih neodređenosti. Njih se stoga može zanemariti i upotrijebiti zakone Newtonove klasične mehanike. S druge strane, za česticu male mase, kao što je npr. neutron, proton, elektron, ... ograničenja kroz $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$, odnosno zakoni KM, postaju važni. Kvantna se neodređenost za takvu česticu povezuje s njezinom dualnom, valnom prirodom: ponašanje takve čestice opisuje se valom kompleksne amplitude ψ (sl. 4) koji daje vjerojatnosti da se izmjeri položaj x i impuls p (valna duljina) čestice s neodređenostima Δx i Δp . Zato se pri otkriću KM početkom 20. stoljeća držalo da ona opisuje samo čestice male mase, mikrosvijet nama dostupan samo putem (složenih) mjernih uređaja. Kao što ćemo ovdje vidjeti supravodljivost i suprafluidnost su tome protuprimjeri: kod njih zakoni KM postaju važni i za objašnjenje zajedničkog ponašanja mnoštva malih čestica, tipično 10^{23} čestica po cm^3 . Doduše, pored supravodljivosti i suprafluidnosti postoje i druge makroskopske fizičke pojave, kao što je npr. pojava permanentnih magneta, čije objašnjenje zahtijeva upotrebu KM, no većina tih pojava može se opisati kroz analogiju (tzv. princip korespondencije) s klasičnim sustavima, dok takvog zora za supravodljivost i suprafluidnost nema.

Bose-Einsteinovo zgušnjavanje

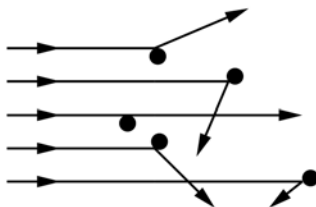
Heisenbergova relacija $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$ nam kaže da kvantnoj čestici možemo definirati impuls ($\Delta p \approx 0$) s tim da potpuno izgubimo informaciju o njezinu položaju. Kada se nadalje promatraju dvije ili više čestica, KM razlikuje (kroz tzv. Paulijev princip) fermione od bozona. Dok isti impuls p mogu imati najviše dva fermiona kad među njima ne djeluju nikakve sile, broj slobodnih bozona istog impulsa nije tako ograničen. Govoreći jezikom KM, val raspodjele vjerojatnosti ψ , koji opisuje jedan fermion može ih opisati najviše dva, dok val ψ koji opisuje jedan bozon može ponijeti njihovo mnoštvo. Radovima Bosea i Einsteina (BE) zatim je pokazano da je ispod neke kritične temperature T_c najvjerojatnije stanje sustava konačnog broja slobodnih bozona stanje u kojem su (gotovo) svi bozoni opisani *istim valom* ψ_0 impulsa $p = 0$. Takva se pojava naziva BE zgušnjavanje. Dok klasična fizika dozvoljava zgušnjavanje mnoštva čestica koje se ne gibaju ($p = 0$) u jednu točku (npr. $x = 0$), BE zgušnjavanje je najveće zgušnjavanje kojeg dozvoljava KM, u val ψ_0 s $p = 0$ i s potpuno neodređenim položajem.

Uključe li se sada (električne) sile među fermionima i/ili bozonima slika se obogaćuje i komplicira, ali koncept BE zgušnjavanja u jedan val približno preostaje. Doduše, BE zgušnjavanje ne obuhvaća tada sve bozone nego samo njihov dio (npr. nekoliko postotaka). S druge strane, međudjelovanjima se pojavljuje i jedna potpuno nova mogućnost - BE zgušnjavanje fermiona. Dva se naime fermiona mogu međusobno vezati u stanje niske energije - sjećamo se da Heisenbergova relacija $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$ ne zabranjuje dvama fermionima biti npr. u istoj točki prostora x , sada s potpuno neodređenim impulsima p . Tako nastali par fermiona, poznat kao Cooperov par, karakteriziran je prosječnim radijusom ξ i energijom veze Δ . Nadalje, Cooperov par, kao cjelina, ponaša se približno kao bozon: mnoštvo Cooperovih parova može se zgusnuti u stanje impulsa p *centra mase* jednog para. Dolazi se do situacije kada jedan jedini val, kažemo koherentno stanje, opisuje ponašanje mnoštva elementarnih ili složenih čestica, za razliku od situacije kada je svaka čestica posebno opisana svojim valom. Takva je slika u pozadini mikroskopskih objašnjenja supravodljivosti kao rezultata sparivanja elektrona u Cooperove parove (Bardeen, Cooper, Schrieffer, NN 1972. g.); suprafluidnosti

^4He (Kapitsa, NN 1978. g.), kao BE zgušnjavanje bozona ^4He (Landau, NN 1962. g.); suprafluidnost ^3He (Lee, Osheroff, Richardson, NN 1996. g.) kao rezultat sparivanja električki neutralnih atoma ^3He , koji su fermioni, u Cooperove parove i njihova BE zgušnjavanja (Leggett, NN 2003. g.); BE zgušnjavanja rijetkih plinova alkalnih atoma (Rb, K, Li) (Cornell, Ketterle, Wieman, NN 2001. g.) uključujući vodik.

Supravodljivost

Dva osnovna svojstva karakteriziraju supravodljivo stanje materije: *nestanak* električnog otpora R pri vođenju električne struje I i "*izbacivanje*" magnetskog polja B iz područja supravodljivosti. Električni otpor R nastaje kada se pojedini elektroni raspršuju na nasumično raspoređenim centrima raspršenja. Pri tome se kinetička energija gibanja centra mase svih elektrona pretvara u (unutarnju) energiju njihova nasumičnog gibanja, odnosno razvija se Jouleova toplina, snagom $P = RI^2$, gdje je R otpor, a I struja elektrona. Takva slika (sl. 5) podrazumijeva da je svaki pojedini elektron opisan posebno (u KM svaki svojim valom) i da se raspršuje nezavisno od drugih. Međutim, kada su, nakon BE zgušnjavanja, svi



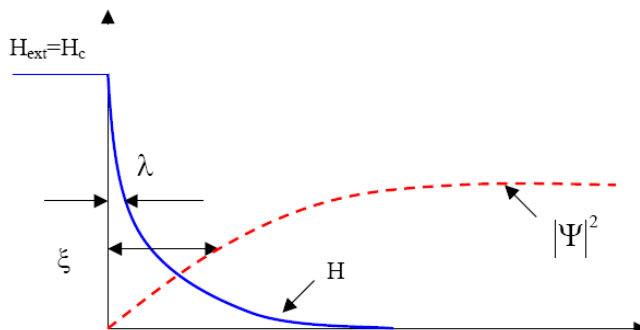
Slika 5 Elektroni nailaze na centre raspršenja i svoju energiju translacije pretvaraju u unutarnju energiju kaotičnog gibanja

elektroni opisani jednim te istim valom ψ , raspršenja ne mogu voditi nasumičnom gibanju pojedinih elektrona, jer su oni međusobno povezani, najprije u Cooperove parove, pa zatim u njihov BE kondenzat. Stoga tada električni otpor R nestaje. Kada se nadalje na supravodljivi sustav nametne vanjsko magnetsko polje H , kao na sl. 1, u supravodiču se prema Lentzovu pravilu pojavljuju struje čije je magnetsko polje M usmjereno suprotno od H , čineći $B = H + M$ malim. Pojava zgušnjavanja na konačnoj temperaturi T_c pri tome je suštinski važna, jer se na konačnoj temperaturi ni u načelu ne može izbjeći postojanje centara raspršenja za elektrone, nego se njihov utjecaj mora ukloniti zgušnjavanjem.

Ovogodišnja Nobelova nagrada dodijeljena je Abrikosovu i Ginzburgu za njihov doprinos razumijevanju gore opisanih osnovnih svojstava supravodljivosti i prije nego se zgušnjavanje Cooperovih parova u jedan val pojavilo 1957. g. kao približno objašnjenje opisa supravodljivog sustava (Bardeen, Cooper, Schrieffer, NN 1972. g.). Ginzburg je 1950. g., zajedno s Landauom (NN, 1962. g.), predložio da *samo jedan val* ψ opisuje čitav elektronski sustav (10^{23} elektrona po cm^3), ne ulazeći u njegovo porijeklo. Dakle, supravodljivi sustav opisan je jednom valnom funkcijom $\psi(x)$, tj. jednim kompleksnim brojem ψ u svakoj točki prostora x (sl. 4), $|\psi(x)|^2$ je identificiran s gustoćom supravodljivih elektrona oko točke x . Posluživši se Landauovom teorijom faznih prijelaza iz 1937. g. za prijelaz u kvalitativno (simetrijski) novo supravodljivo stanje, Landau i Ginzburg su pokazali da iz pretpostavke jednog vala slijedi i nestanak električnog otpora supravodiča i potpuno izbacivanje magnetskog toka, $B = H + M = 0$, iz područja supravodljivosti (Meissnerov efekt) za H manji od kritične vrijednosti H_c .

Izuzetak je samo usko prijelazno područje uz samu površinu supravodiča, gdje gustoća supravodljivih elektrona $|\psi(x)|^2$ progresivno raste prema unutrašnjosti supravodiča preko

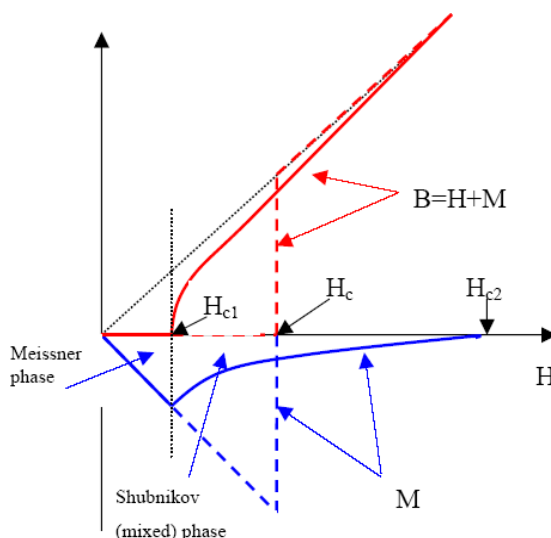
karakteristične udaljenosti ξ (koju je L. P. Gor'kov, Landauov student, kasnije identificirao kao radijus Cooperova para), a magnetsko polje B se gubi preko udaljenosti λ (sl. 6). Četrdesetak godina nakon otkrića supravodljivosti i unatoč mnogim naporima, to je bila prva teorija koja je *jednostavno* opisivala sve rezultate postojećih mjerenja na materijalima u supravodljivu stanju.



Slika 6 Raspodjela gustoće elektrona $|\psi(x)|^2$ i magnetskog polja $B(x)$ pri površini supravodiča *I.* vrste.

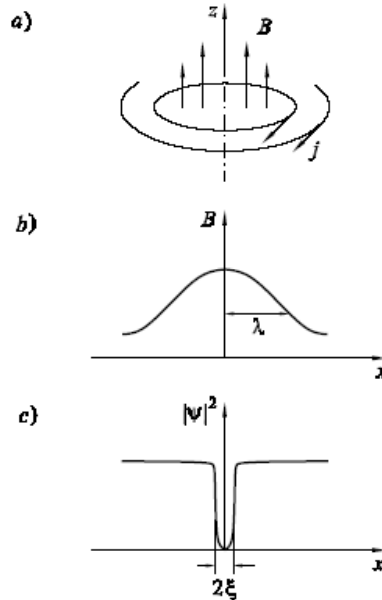
Ipak, ubrzo se ispostavilo da postoje materijali u kojim Ginzburg-Landauovo rješenje ne vrijedi. Već su i njih dvojica zapazili da njihovo rješenje sa sl. 6 podrazumijeva da je $\xi > \sqrt{2}\lambda$ ("supravodiči *I.* vrste"), ali da u obrnutom slučaju zahtijeva promjenu. Potaknut eksperimentima, taj je korak učinio unutar Ginzburg-Landauove teorije Landauov student Abrikosov i našao "supravodiče *II.* vrste", čija su svojstva bogatija i za primjenu mnogo važnija od onih supravodiča *I.* vrste. Magnetsko ponašanje supravodiča *II.* vrste prikazano je na sl. 7. U malim vanjskim poljima H i oni pokazuju potpuni Meissnerov efekt, $B = H + M = 0$. No kad H dostigne prvo kritično polje H_{c1} u supravodič lokalno proдре magnetsko polje oko kojeg cirkuliraju Lentzove dijamagnetske struje (sl. 8).

U valu ψ stvara se vir, (kao na sl. 4), u kojem su gustoća supravodljivih elektrona $|\psi(x)|^2$ i magnetsko polje $B(x)$ raspoređeni od centra vira prema obodu opet kao na sl. 6, ali s $\xi < \sqrt{2}\lambda$. Povećava li se dalje magnetsko polje H ukupni magnetski tok ϕ_0 kroz pojedini vir

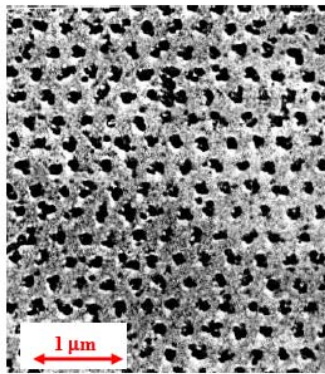


Slika 7 Prosječno polje $B=M+H$ kroz supravodič kao funkcija vanjskog polja H , te prosječni magnetski moment M supravodiča *II.* vrste.

se ne mijenja, no u materijal prodire sve više i više virova. Električni pak otpor R iščezava dok materijal između virova ostaje supravodljiv, $|\psi(x)|^2 \neq 0$, a virovi se ne gibaju. Abrikosov je pokazao da će se virovi urediti u triangularnu rešetku, koja je uskoro i opažena posipanjem površine supravodiča željeznom piljevinom (sl. 9). Tek na drugom kritičnom polju H_{c2} (sl. 7) virovi dolaze tako blizu da se počnu preklapati i supravodljivosti potpuno nestaje.



Slika 8 Raspodjela polja B i struja j , te gustoće elektrona $|\psi|^2$ oko vira sa slike 4.



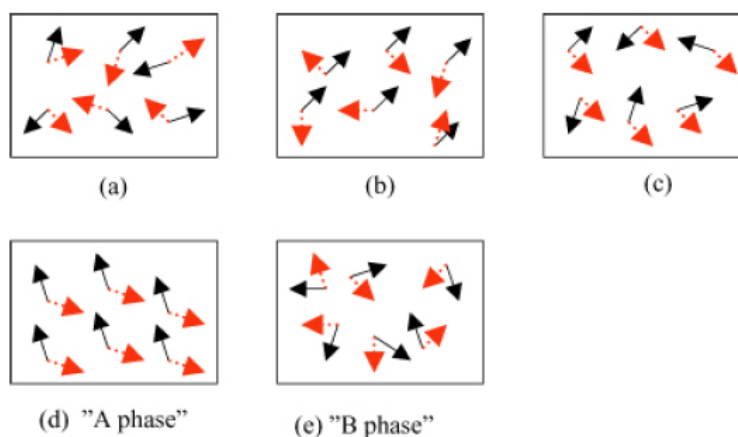
Slika 9 Abrikosovljeva rešetka virova posuta željeznom piljevinom.

Pronalazak i objašnjenje supravodiča II. vrste polovicom 20. stoljeća bili su važni iz dva razloga. Ponajprije, zadržavanje supravodljivosti do vrlo velikih magnetskih polja H_{c2} učinila ih je pogodnim za proizvodnju na drugi način nedostupno snažnih elektromagneta (sl. 2 i 3), no ostalo je ograničenje supravodljivosti na vrlo niske temperature (do 20-ak K): čim temperatura prijeđe energiju veze Δ Cooperova para, parovi se raspadaju, pa supravodljivosti nestaje iznad $T_c \approx \Delta$. Δ je mala energija jer su sile vezivanja u Cooperove parove slabe. Tek 1986. g. u kupratima rijetkih zemalja (sl. 1) nađeni su (Bednorz, Müller, NN, 1987. g.) supravodiči II. vrste sve do dosta visokih temperatura (oko 130 K), što otvara put širokim tehnološkim primjenama. Sa spoznajne pak strane, pokazano je da se magnetski tok kroz vodič mijenja u kvantima ϕ_0 , što je dokazalo da je priroda Ginzburg-Landauovog vala ψ

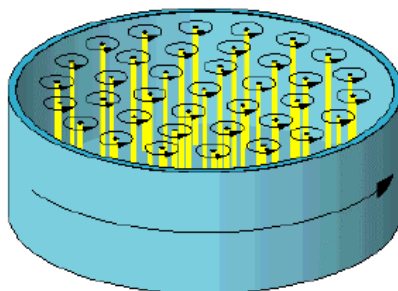
kvantna, a kao osnovni nosilac električnog naboja u definiciji ϕ_0 kasnije se pojavio Cooperov par naboja $2e$. Landau-Ginzburg-Abrikosovljeva teorija zato je jedan od najljepših primjera prožimanja spoznajnih i primjenjivih vidova istraživanja u fizici.

Suprafluidnost ^3He

Treći fizičar nagrađen Nobelovom nagradom za 2003., A. Leggett, istakao se u objašnjenju suprafluidnosti ^3He (2 protona + 1 neutron + 2 elektrona), rijetkog izotopa helija. Za razliku od ^4He , koji je sam bozon i postaje suprafluidan BE zgušnjavanjem ispod $T_c = 2,3\text{ K}$, atomi ^3He su fermioni i njihov sustav postaje suprafluidan ispod ekstremno niske temperature od približno $0,003\text{ K}$, zgušnjavanjem "Cooperovih parova" ^3He fermiona. No, kako je predložio Leggett, struktura tih parova znatno je složenija od Cooperovih parova koji ulaze u BCS teoriju supravodljivosti. Razlog tome je što se fermioni ^3He na malim udaljenostima jako odbijaju pa se tu i izbjegavaju. Odgovarajući KM problem je lako riješiv i Leggett je pokazao da uz val ψ koji opisuje gibanje centra mase dvije čestice treba upotrijebiti još dva trokomponentna vektora da bi se opisalo njihovo međusobno stanje. Zato nakon BE zgušnjavanja u to stanje opis sustava zahtijeva u svakoj točki prostora x pored dvije komponente valne funkcije ψ (kompleksan broj) još dva vektora (ukupno $2 \times 3 \times 3 = 18$ komponentata). Već prema međusobnoj orijentaciji ta dva vektora u svakoj točki prostora i



Slika 10 Moguća stanja (faze) ^3He u mirovanju. U fazi (a) dva su vektora proizvoljno orijentirana u svakoj točki i među raznim točkama prostora. U fazama (b)-(e) vektori se progresivno uređuju. Faze (d) i (e) opažene su u ^3He .



Slika 11 Virovi u suprafluidu koji se nalazi u rotirajućoj posudi.

između različitih točaka prostora moguća su različita uređenja ^3He , kao što je prikazano na sl. 10. Primijetimo da neke faze imaju preferiranu os ili osi, pa te faze imaju i različita svojstva u različitim smjerovima, anizotropne su, kao što je i opaženo.

Budući da su Cooperovi parovi ^3He električno neutralni u suprafluidnom ^3He magnetsko polje ne inducira Lentzove struje te ^3He ne pokazuje Meissnerov efekt i/ili odgovarajuću pojavu Abrikosovljevih virova. Ipak, stavi li se suprafluid u rotirajuću posudu u njemu se pojavljuju "pravi" virovi (sl. 11), strukture i porijekla sličnog onom nađenom u supravodičima II. vrste, tj. diktiranom kvantnom prirodom vala ψ . Naravno, vrtloženje suprafluidnog ^3He nije povezano sa zagrijavanjem sustava, za razliku od vrtloženja vode, koje s vremenom nestaje pretvaranjem energije vrtloženja u toplinu. Kao ni u supravodičima, niti u suprafluidima tijekom cirkularnih struja ne disipira energiju.

Završna riječ

Devedesetogodišnja saga o supravodljivosti i suprafluidnosti predstavlja iznimno poučan primjer općih značajki hoda moderne civilizacije, od čiste, romantične želje za spoznajom, do neočekivanih fundamentalnih otkrića, preko često vrlo apstraktnih koncepata potrebnih u razumijevanju nađenog, sve do odgovarajućih tehnoloških razvoja i primjena u cilju poboljšanja uvjeta svakodnevnog života. To nije jednosmjernan, pravocrtni hod, nego lanac pun povratnih veza, s visećim karikama i izgubljenim koracima, građen upornošću i hrabrošću mnogih generacija. U ovdje opisanom slučaju supravodljivosti i suprafluidnosti taj put ide, ovamo-onamo, od osnovnog otkrića (sl. 1) do njegovih primjena (sl. 2 i 3), preko izgradnje osnovnog konceptualnog aparata (sl. 4 i 5), sve do detaljnih opisa svojstava supravodiča i suprafluida (sl. 6 - 11). I devet Nobelovih nagrada, od 1913. do 2003. g., ilustrira taj nesigurni hod znanosti, koji ipak, izgleda, uvijek vodi naprijed: domet i značaj pojedinih koraka shvaćen je ponekad odmah ali još češće mnogo kasnije nego što su se zbili. Pa i sama Nobelova nagrada za 2003. g. primjer je takve prirode istraživačke avanture: dvojicu istraživača nagradila je za njihove davnašnje rezultate, a trećega za ono što je našao gotovo jučer. Mnogi su drugi zauvijek ostali u medijskoj sjeni ili možda još uvijek čekaju da budu shvaćeni, no najvažnije je da njihov rad služi dobrobiti čitavog ljudskog roda. Ili, kako je to slikovitije rekao Alfred Nobel, čovjek koji je svoje bogatstvo stekao na izumima i proizvodnji dinamita, "širiti znanje je širiti dobrobit". Mislio je naravno na opću a ne na pojedinačnu dobrobit i, mučen upotrebom svojih eksploziva u ratne svrhe, dodao ".... napredak znanstvenih istraživanja i stalno širenje njihovog kruga budi nam nadu da će mikrobi, kako mikrobi duše tako i mikrobi tijela, postepeno nestati, i da će jedini rat kojeg će u budućnosti čovječanstvo još voditi biti rat protiv mikroba". Kao svoje najživlje interese u "širećem se znanju" Nobel je 1890. g. naveo "međudjelujuće atome", pa odmah zatim "funkciju mozga, misao i memoriju". Kroz BE kondenzaciju međudjelujućih atoma ^4He , ^3He , Li, Rb, ..., kroz studije mozga nuklearnom magnetskom rezonancijom, (sl. 3) i slično, supravodljivost te suprafluidnost i Nobel pružaju odgovore na njegove najvažnije interese vezane uz njegovu želju za pobjedom protiv mikroba tijela i duše. Ipak, nakon čitavog stoljeća od Nobelovih razmišljanja, izgleda da čovječanstvu rat protiv mikroba tijela ide bolje nego rat protiv mikroba duše. No to je već jedna druga, nova priča.