

Supereroankortasuna eta aplikazio biomedikoak (I)

Fernando Plazaola

Elektrizitatea eta Elektronika Saila
UPV/EHU Zientzia eta Teknologia Fakultatea
Pk 644, 48080 Bilbo

Laburpena: Izenburuak adierazten duenez, supereroankortasunaren aplikazio biomedikoak azaltzea da lana honen helburuetariko bat. Helburu hau deskribatu ahal izateko, ezinbestekoa da aurretik supereroankortasuna zer den eta supereroankortasunaren ezaugarriak zeintzuk diren aztertzea. Beraz, lana bi artikulutan banatuta dago eta lehenengo honetan bide historikoari eutsi eta supereroankortasunaren aurkikuntza, garapena eta propietateak deskribatuko dira. Artikuluaren amaieran, tenperatura handiko supereroaleak deskribatuko dira eta agerian jarriko da 60. hamarkadan garaturiko material supereroaleena dela supereroaleek eragindako benetako iraultza teknologikoa.

Abstract: As written in the title, one of the goals of the article is to describe the biomedicine applications of superconductivity. To describe this goal it is necessary to explain beforehand what superconductivity is and what its main characteristics are. Therefore, the work is divided in two articles. In this first article, following an historic way, we describe the discovery of superconductivity, its development and its main properties. This article ends describing high temperature superconductivity and citing that until present the unique actual technological revolution caused by superconductivity is the one of the superconductor materials developed in the 60s.

1. SARRERA

Ikerketa zientifikoan, Lurraren edo espazioaren esplorazioan gertatzen den bezalaxe, aurkikuntza berrien probabilitatea izugarri handitzen da inor aurretik zuzendu gabeko, iritsi gabeko edo bideratu gabeko tokira zuzenduz gero. Colonek, Ozeano Atlantikoa zeharkatu zuen, Elkanok Lurra inguratu zuen eta Heike Kammerling Onnesek (1 irudia) materialen propietateak neurtu zituen ordura arte inor sekula heldutako tenperatura baxuenetan.



1. irudia. Heike Kamerling Onnes zientzialari neerlandarra. 1911. urtean supereroankortasuna aurkitu zuen

XX. mendearen hasierako urteetan Onnes eta beste fisikari batzuek tenperatura gero eta baxuagoak esploratu zituzten. Tenperatura jaisten den heinean, gasak likido bilakatzen dira, eta likidoak solido; gainera, solidoen barnean atomoen azarezko bibrazio-higidura motelduz doa, zero tenperatura absolutuan desagertu arte.

Kammerling Onnesen taldea lehenengoa izan zen (Leydeneko Unibertsitatean, 1908.ean) hain tenperatura baxuak lortzen; izan ere, He gasa (gasetan gasena) lehedabiziko aldiz likidotzea lortu zuten. Esan daiteke He likidoaren lorpenarekin, zalantzarik gabe Lur planetaren iturri hotzenaren jabe bihurtu zela Leydeneko laborategia. Horrelako tenperatura hotzetan, tenperaturak kelvinetan (K) neurtzen dira. Lor daitekeen tenperaturarik baxuena gradu horietan zero absolutua da (teorian posible ez bada ere). Kammerling Onnesek materialen propietateak tenperatura hain baxuetan (Guinness errekorrekoak) azter zitzakeenez, materialen propietate elektrikoak neurtzea erabaki zuen. Ohar gaitezen; urte haietan bere taldeak bakarrik ahal zuela horrelako neurketarik egin. Metalean zehar korrante elektrikoak (I) igaroarazten zuten, tentsio elektrikoak (ΔV) neurtzen zuten bitartean, era horretan erresistentzia elektrikoaren ($R=\Delta V/I$) aldaketa tenperatura jaitsi ahala neurtuz. Espero zuten metalak isolatzaile bilakatuko zirela hoztean, baina beste gauza bat behatu zuten: igo beharrean, erresistentzia elektrikoak (R) jaitsi egiten zen, eta gainera efektu hori areagotuz zihoan, metal puruagoa erabiltzen zihoazen neurrian. Hala ere, behatutakoa ez zen ezuste handia izan. Izan ere, dagoeneko jakina zen atomoen bibrazioek (fonoiek) zerikusirik handia zutela erresistentzia elektrikoan, bibrazioa hoztu ahala erresistentzia gutxitzen baitoa.

Ustekabea 1911. urtean gertatu zen, neurketa elektrikoak merkurio-hari batekin egitea erabaki zutenean. Merkurioa erabili zuten, garai hartan erra-

zen purifika zitekeen metala zelako. Izan ere, merkurioa, likidoa da eta beraz, giro-tenperaturan erraz lor daiteke purutasun handian. Merkurio-hariaren neurketa elektrikoak hozte-tenperaturaren arabera egiten ari zirelarik, He likidotzen den temperaturara iristean, zur eta lur geratu ziren erresistentzia elektriko bat-batean zerora jaisten egiten zela ohartuz!!! Hots, korroneak haritik barrena jariatzen jarraitzen zuen bitartean, tentsio elektriko zero zen; merkurio-hariaren tenperatura $T=4,2$ K zenean, $\Delta V = 0$ V neurtzen zuten, baina $I \neq 0$ A izanik $\rightarrow R = \Delta V/I = 0 \rightarrow R = 0 \Omega$.

Kammerling Onnesek supereroankortasuna aurkitu berria zuen. Leydeneko taldea berehala jabetu zen merkurioa ez zela erresistentzia elektriko galtzen zuen metal bakarra, hots, ez zela supereroale bilakatzen zen metal bakarra. Izan ere, eztainua, beruna, indioa eta beste metal batzuek ere erresistentzia elektriko bat-batean galtzen zuten «tenperatua kritiko» baten azpitik. Tenperatura kritiko hauek metal bakoitzaren menpeko ziren, baina kasu guztietan oso baxuak ziren, gradu gutxi batzuk zero absolutuaren gainetik.

Kammerling Onnesek ikasi zuen tenperatura kritikoaren azpitik jaitsiz, metal batzuek korrone elektriko garraia zezaketela tentsio elektrikorik gabe eta beraz, erresistentzia elektrikoaren eraginez gertatzen den berotze-ohmikorik gabe ($R = 0$ baita), hots, energia galerarik gabe. Tenperatura kritikoaren azpitik gertatzen zen zerbaitek elektroiak marruskadurarik gabe higitzea onartzen zuen.

Material hauekin zer egin daiteke? Zertarako balio dezakete? Kammerling Onnes berehala jabetu zen material horiekin eremu magnetiko oso bortitzak sor zitezkeela. Solenoidea erabiltzea da eremu magnetiko bat lortzeko bide arruntena eta zuzenena. Korrone elektriko solenoidetik igarotzen denean, sortutako eremu magnetikoa korronearen proportzionala da. Solenoideak Cu-zkoak izaten dira, baina Cu-aren ρ erresistibitatea txikia izan arren ($R=\rho L/S$, non L hariaren luzera eta S bere sekzio zuzena diren), ez da erresistibitate nulua, eta korronea igarotzean solenoidea berotzen da, energia elektriko energia termiko bilakatzen delako, hots, galera elektrikoak Cu-aren berotzea dakar ($P=RI^2$) eta berotze horrek mugatzen du solenoide horiekin (elektroiman arruntekin) lor daitekeen gehieneko eremu magnetikoa. Solenoideak eremu magnetikoak sortzeko erabiltzen direnean elektroiman deitu ohi zaie esparru teknologikoan, korrone elektrikoaren eraginez iman bihurtzen direlako, hau da harri-imanen propietate berdinak erakusten dituztelako.

Gainera, solenoideak sortutako eremu magnetikoa handiagotzeko, elektroimanek «gune» izeneko erdialdean, badaramate burdina edo bestelako material magnetiko bat, «gune magnetikoa» deritzona.



2. irudia. Ereku magnetikoa sortzeko biribilkaturiko Cu-zko hariak osatzen du solenoidea edo harila.

Supereroaleek erresistentzia elektrikorik ez dutelarik, zergatik ez elektroimanak hari supereroaleekin eraiki? Era honetan, korrante elektriko ikaragarriak erabil litezke eremu magnetiko oso handiak sortzeko. Izan ere, Kammerling Onnesek 1913an honako hau idatzi zuen:

«Egoera honen ezaugarri miragarria erabil daiteke eremu magnetiko bortitzak sortzeko, harila supereroaleen laguntzaz, burdina-gunerik erabili gabe. Teorian behinik behin, nahi bezain eremu magnetiko bortitzak lor daitezke. Egin behar den gauza bakarra da behar bezain beste ampere-bira jarri eremu magnetikoa lortu nahi den eskualderen inguruan (eta horrela iman supereroalea lortu)... Esaterako, 30 cm diametroko harilarekin 100.000 gausseko eremu magnetikoa lor daiteke (eremu geomagnetikoa Lurraren azalean 0,5 gauss ingurukoa da). He-rekin egin beharreko hozketa Leydenen eraiki daiteke diru-laguntza handirik gabe»

Kammerling Onnesek-ek, lortu zuen eskatu zuen diru-laguntza, baina ez zuen iritsi bere helburua; hots, ez zuen erdietsi 100.000 gauss sortzen zuen elektroimana (iman supereroalea) eraikitzea. Zientzialari gehienek, ikerketa-egitasmoak aurrera emateko dirua eskatzen dutenean, ez dute pentsatzen planteatutako helburuak ez dituztela lortuko. Kammerling Onnesek, ordea, buruan izan zuen aukera hori: «Gerta daiteke erresistentzia elektrikoa berragertzea supereroalean eremu magnetikoaren kausaz». Zoritxarrez horrela izan zen. Ikertu zituen metal guztiek, superoankortasuna galdu egiten zuten beraiek sortutako eremu magnetikoa ehundaka gaussekoa (10^{-4} tesla) zenean.

Kammerling Onnesek aski ongi ikasi zuen supereroankortasuna galdu edo desagertu egiten dela 1) tenperatura kritiko bat (T_C) gainditzen bada, 2) eremu magnetiko kritiko bat (H_C) gainditzen bada eta bai 3) korrante elektrikoak korrante kritiko bat (I_C) gainditzen badu ere.

Supereroankortasunaren fenomenoak miwesgarria da, baina aldi berean oso delikatua. Tenperatura, eremu magnetikoa edo korrante elektrikoa altu-egiak badira supereroankortasuna desagertu egiten da. Supereroankortasuna mantentzeko, hiru kantitate horiek, aldi berean material bakoitzaren ezaugarri diren balio kritikoen azpitik behar dute egon.

Iman supereroale (hau da hari supereroalez eginiko solenoide) baten bidez 100.000 gauss lortzeko, imanaren hari supereroaleak korrante kritiko handia izan behar du neurri horretako eremu magnetikoaren aurrean. Izan ere, aipaturiko helburua lortzea ez da batere erraza eta mende erdia igaro zen (1911-1961) helburu hori erdietsi aurretik. 1961. urtean, Bell laborategietako zientzialariek iragarri zuten niobio eta eztainuko konposatu bat gai zela superkorrante oso handiak garraiatuz supereroalea izaten jarraitzeko, tartean eremu magnetiko oso bortitzak badaude. Handik gutxira, General Electric entpresan Kammerling Onnesek proposaturiko helburua lortu zuten: 100 kgauss-eko (10 teslako) eremu magnetikoak ekoizten zituzten elektroiman supereroaleak (edo iman supereroaleak) eraikitzea.

Egun, jakin badakigu aleazio askok eta konposatu askok eremu magnetiko kritiko oso altuak dituztela eta korrante kritiko handiak jasan ditzaketela supereroaleak izateari utzi gabe, baina Kammerling Onnesek eta bere garaiko zientzialariek baldintza horiek jasaten ez dituzten metal puruetara mugatu zituzten hainbat urtean ikerketa guztiak. Bell Laborategietako, General Electric-eko eta beste industria batzuetako zientzialariak izan ziren eremu magnetiko handiak eta korrante elektriko handiak jasan ditzaketan supereroaleak euren propietateak galarazi gabe garatu zituztenak. Epe laburrean eremu magnetiko altuak jasateko moduko iman supereroaleak lortu zituzten merkaturatzeko moduan.

Urte horietan ikasi zen korrante elektriko kritikoek (eremu magnetiko altuko iman supereroaleak eraikitzeko ezinbestekoek) menpekotasun oso handia dutela supereroaleen mikroegiturarekin, hau da, aleazioaren atomoen ordenamenduarekin maila mikroskopikoan. Aleazio berberaren bi harik, begirada arin batean berdinak badirudite ere, korrante kritiko oso desberdinak izan ditzakete (1.000ko faktorean desberdinak izatera hel daitezke), materialaren prozesamendua desberdina bada eta beraz, mikroegitura desberdinak badituzte.

Egungo iman supereroale gehienek 5 eta 9 tesla tarteko eremu magnetikoak sortzen dituzte; hauek, Nb/Ti hariak izaten dira (aleazio hau duktila da eta horiekin erraz egin daitezke hainbat kilometroko luzera duten hariak). Eremu magnetiko altuagoko iman supereroaleak, 20 teslarainokoak, Nb/Sn aleaziozko harilez egiten dira, baina aleazio hau oso hauskorra da eta kableak egiteko beste materialak baino eraikitze-teknika korapilatsuagoak behar ditu.

2. SUPEREROANKORTASUNAREN EZAUGARRIAK¹

Goian esan bezala supereroankortasuna Heike Kamerlingh Onnes fisikari neerlandarrak aurkitu zuen 1911. urtean. Goian aipaturiko tenperatura baxuko ikerketengatik Fisikaren Nobel saria jaso zuen 1913. urtean. Zero erresistentzia elektrikoa benetakoa zela agerian geratu zen ondoko esperimentuan: Kamerlingh Onnesek eraztun supereroale batean korrante bat induzitu eta handik urtebetera egindako neurketa doiek frogatu zuten ez zela korrontearen beherakada neurgarririk gertatu. Neurketa horietatik ondoriozta zitekeen ezen korrontearen erresistibitate-beherakadak, gertatuz gero, 10⁹ urteko gutxieneko periodoan gertatu behar zutela!

Hainbat urtean pentsatu izan zen erresistibitate elektriko nulua (hots, eroankortasun elektriko infinitoa) izateaz gain, supereroaleek material arrunteen propietate beretsuak zituztela. Uste hori hutsala bilakatu zen 1933an supereroaleak erabateko diamagnetikoak direla aurkitu zenean. Supereroaleen propietate elektrikoak bezain harrigarriak dira propietate magnetikoak. Supereroalearen barnean erresistentzia elektrikoa zehazki zero egiten duten mekanismo fisiko kuantiko berberak *egiten dute zero barne eremu magnetikoa ere*. Supereroaleak material diamagnetiko perfektuaren antzera jokatzen du; izan ere, induzitzen diren korronteak supereroalearen barneko edozein eremu magnetiko ezabatzen dute. Berebat esan ohi da eremu magnetikoaren lerroak *kanporatzen* direla supereroaletik, eta fenomeno horri *Meissnerren efektua* deritzo; fenomeno bi zientzialarik aurkitu zuten: W. Meissner eta R. Ochsenfeld, hain zuzen; baina fenomeno izendatzeko bat bakarrik dugu gogoan. Supereroalearen barnetik eremu magnetikoa kanporatzeak haren suszeptibilitate magnetikoaren berri ematen du. Barne eremu magnetikoa (**B**) zero izan behar duenez,

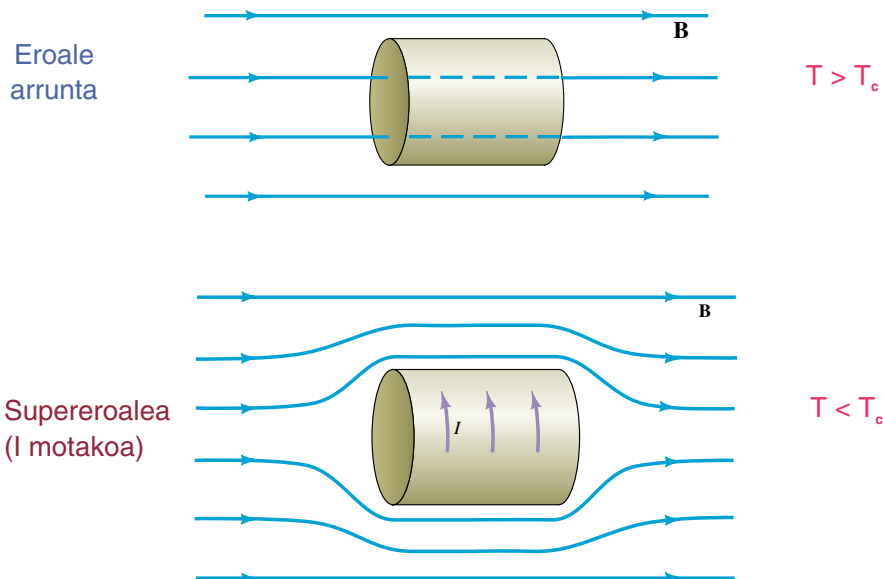
$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} = 0.$$

¹ Pasarte hau irakurri gabe ere ez da hildoa galtzen.

H intentsitate magnetikoak, korronte askeak (solenoiden ezarri diren korronte elektrikoak) ditu sorburu, eta beraz, ez da zero. Hortaz, $1 + \chi_m = 0$: hau da,

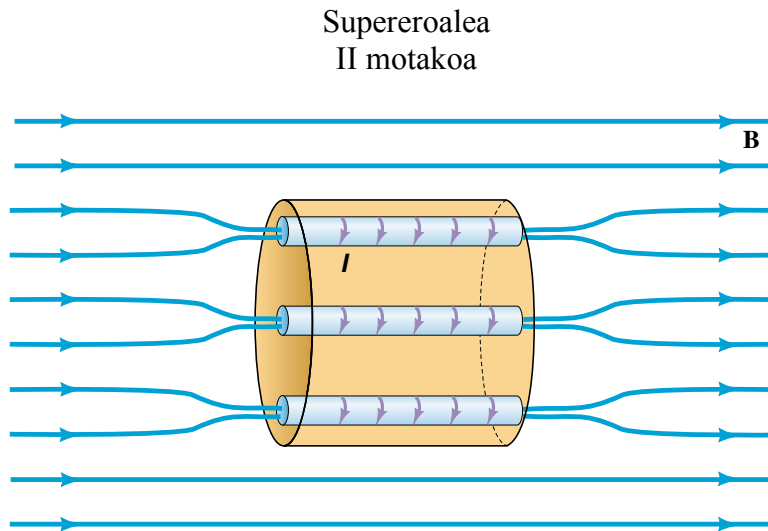
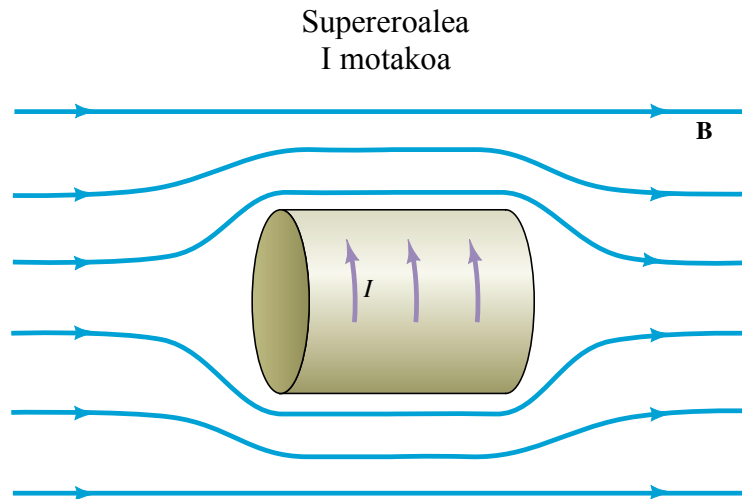
$$\chi_m = -1.$$

Supereroalearen barnean eremu magnetikorik ez dagoenez, ezin daiteke barnean korronterik egon. Hori horrela izan behar duela frogatzeko, demagun supereroalearen barneko eskualderen batek korronte garraiatzen duela. Orduan, eskualde horren inguruan alegiazko begizta bat irudika dezakegu eta Ampèreren legea aplikatu. Lege horren arabera, begiztan zehar korronterik balego, eremu magnetikoa legoke; baina hori ezinezkoa da. Ondorioztatu behar dugu, beraz, 3 irudian erakusten den bezala, *supereroaleek garraiatzen dituzten korronte guztiak beraien azaletatik garraiatu behar direla* (fase supereroalearen eta ezsupereroalearen arteko muga da azala). Behar bezain eremu magnetiko indartsua (hau da, *eremu kritikoa*) ezartzen bada, fase supereroalean dagoen materialak jauzi egiten du supereroalea ez den fase arruntera, tenperaturak aldaketarik gabe irauten badu ere. Hori arazo larria izan liteke: supereroaleak elektroiman handien eraikuntzan erabiltzen dira batez ere; iman horietan barrena garraiatzen diren korronteek, oso handiak badira ere, ez dute Joule efektuaren bidezko beroketarik eragiten, baina bai eremu magnetiko handiak (eremu kritikoaren gainekoak), eta eremu horiek supereroankortasuna deusezta dezakete. II motako supereroa-



3. irudia. Meissner efektua. Ezarritako eremu magnetikoak eragozpenik gabe zeharkatzen du eroale arrunta, baina supereroaleak (I motakoa) berriz, kanporatu egiten du eremu magnetikoa.

leek harizpietatik bideratzen dute eremu magnetikoa, eta era horretan supereroale hauek eremu kritiko askoz ere handiagoak dituzte. Azken material hauek dira iman supereroaleak eraikitzeko erabiltzen direnak (4 irudia).



4. irudia. I motako supereroaleek erabat kanporatzen dute eremu magnetikoa; II motakoetan berriz, eremu magnetikoa partzialki zeharka dezake supereroalea.

Meissner efektuaren aurkikuntzak, supereroaleen elektromagnetismoaren teoria formulatzeko aukera eman zuen 1934ean. Teoria horrek, supereroaleetan sartze-sakonera elektromagnetiko bat dagoela aurrean zuen; izan ere, aurreko paragrafoan esana dugu supereroalearen azaletik garraiatu be-

har dela korrante elektrikoa, eta teoria elektromagnetikoak dio azaleko korrante elektriko hori supereroalean sar daitekeela apur bat, sartze-sakonera-
ren balioko tarte labur batean hain zuzen. Aurrean hori esperimentalki
baieztatu zen 1939an.

Bestalde, 1950ean argi geratu zen lehen aldiz supereroankortasunaren
teoria batek kontuan hartu behar zituela kristal-egiturako atomoen bibra-
zioak (fonoiak); izan ere, kristal baten elektroi askeek kristal egitura defini-
tzen duten atomoen bibrazioen eragina jasaten dute. 1953an jabetu ziren,
berriz, supereroaleen eroankortasun termikoa aztertzean, elektroi askeen
energien banaketa supereroale batean ez dela uniforme, hots, elektroi aske-
etarako energia-tarte debekatu bat dagoela.

Honaino aipaturiko teoriek behaturiko fenomenoaren arteko lotura erakus-
ten zuten, baina ez ziren gai fenomeno horiek fisikaren oinarritzko legeen
ondorio bezala azaltzeko. Kamerlingh Onnesen aurkikuntza ostetik ia 50 ur-
tez zientzialariak ez ziren gai izan supereroankortasunaren oinarritzko teoria
bat garatzeko. Azkenik, 1957an, John Bardeen, Leon N. Cooper eta John
Robert Schrieffer fisikari estatu batuarrek (5 irudia) aurkeztu zuten oina-
rritzko teoria hori, eta 1972eko Fisikako Nobel saria irabazi zuten. Egun, be-
raien omenez BCS teoria deritza, eta teoria horretan oinarrituta dago ondo-
rengo lan teorikoa.



5. irudia. 1972eko Fisikako Nobel saria irabazi zuten John Bardeen, Leon N. Cooper eta John Robert Schrieffer fisikari estatu batuarrek.

BCS teoriak, aurretik proposaturiko eredu baten oinarriak ere ematen ditu. Eredu hori, propietate elektromagnetikoak ulertzeko oso baliogarria izan da eta Lev Davidovich Landau eta Vitaly Lazarevich Ginzburg sobiet batasuneko fisikariek aurkeztu zuten 1950ean. Eredu horrek, mekanika ko-
antikoan oinarrituz, aurrean zuen supereroale baten barnean barne fluxu

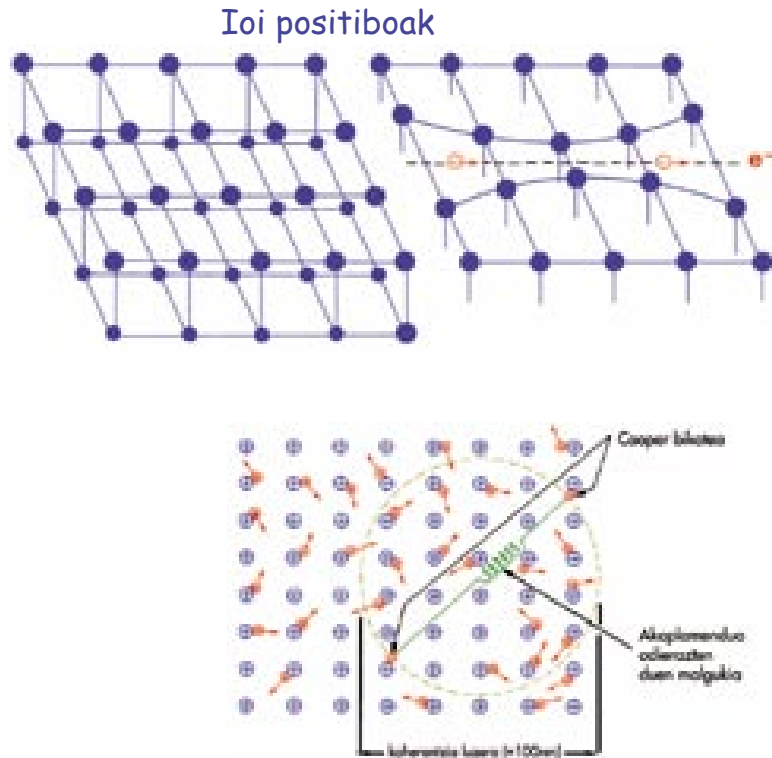
magnetikoa kopuru diskretuetan bakarrik egon daitekeela; hau da, fluxu magnetikoa koantizaturik dago. Efektu hori 1961an esperimentalki baieztatu zen.

2.1. Cooperren bikoteak eta BCS teoria²

Supereroankortasunaren fenomenoaren jatorria elektroien eta metal bateko ioi-sare bibrakorren arteko elkarrekintzan datza. Arrazoi korapilatsuen ondorioz, elektroioi/ioi elkarrekintzak erakarpen ahul bat sortzen du Fermiren energiaren inguruko energia duten elektroien artean. Leon Cooperrek aurkitu zuen erakarpen hori, arinki loturiko elektroioi bikoteak eratzen dituen eta Cooperren bikoteak deritzona. Bikotea osatzen duten bi elektroioiak 100 nm-rainoko distantziara egon daitezke elkarrengandik (gogora dezagun sareko ioien arteko tartea 0,1 nm-tik 0,4 nm-ra bitartekoa izan ohi dela), eta, beraz, bikote horiek ez dute atomoen pareko egitura txikirik osatzen. Alabaina, bikote bateko elektroien higidurak koerlazonatuak daude, eta, eskualde jakin batean, «loturak» korapilatsuak dituzten Cooperren bikote anitz egoten dira (6 irudia). Bikoteek elektroioi askeek baino energia txikiagoak dituztenez (bikoteko elektroioiak bata bestearengandik bereizteko energia behar da), Fermiren (E_F) energiaren inguruan energia-tarte debekatu bat garatzen da, $2\Delta \approx 10^{-3}$ eV-eko zabalerakoa. Horrek esan nahi du ez dagoela $E_F - \Delta$ eta $E_F + \Delta$ tartean elektroioi-egoerarik. Fermiren energiaren aldean, tarte debekatuaren zabalerak hori txikia da.

John Bardeenek, Leon Cooperrek eta Robert Schriefferrek 1957. urtean gauzatu zuten BCS teoriak, garai hartako supereroaleei buruzko behaketa guztiak egokiro azaltzen zituen. Material supereroale gehienetarako Cooperren bikotearen momentu angeluar osoa 0 da. Izatez, helio atomoaren kasuan ez bezala, ezin esan daiteke Cooperren bikote bat bosoi bat denik, hots, ez da elkarrezintasun printzipioa betetzen duen partikula bat. Hala ere, zenbait propietate erabakigarri ditu. Bereziki, BCS teoriak haxe proposatzen du: tarte-debekatuaren zabaleraren eta Boltzmann konstantearen arteko zatidura, T_C tenperatura kritikoaren baliokoa da, eta materialaren tenperatura T_C baino txikiagoa denean, Cooperren bikote guztiak egoera berean kondentsatzen dira. Kondentsazio honek metalaren propietateak erabat aldatzen ditu, likidotik solidorako fase-aldaketan gertatzen denaren antzera.

² Pasarte hau irakurri gabe ere ez da hildoa galtzen.



6. irudia. Goian Cooper bikotea nola sor daitekeen erakusten da era eskematikoan. Elektroi batek kristala zeharkatzean, indar elektrostatikoa dela-eta ioi positiboak erakartzen ditu, eta erakarpen honek ioiak elkarren artean hurbilarazten ditu. Ondorioz apurtxo bat hurbildu diren ioi positiboek atzetik duten beste elektroi bat erakartzen dute eta era honetan bi elektroien artean erakarpen-lotura ahul bat agertzen da. Beheko eskemak adierazten du Cooper bikotea osatzen duten bi elektroiak erlatiboki urrun egoten direla elkarrengandik.

2.2. Supereroaleen propietate elektromagnetikoak

T_C -ren azpitik azaltzen duten erresistibitate nulua da supereroaleen propietarik aipagarriena. Fenomeno hori egoera supereroalearen koherentziari esker azaltzen da, hau da, ordenamenduari esker. Metal elektriko arruntetan, elektroi batzuk ez daude bakarkako atomoei loturik, eta hortaz askeak dira materialean barrena higitzeko; elektroi horien higidurak korrante elektrikoa sortzen du. Metal arruntetan, eroankortasun-elektroi direlako horiek, ezpurutasunek, dislokazioek, grano-mugek eta sare-bibrazioek sakabanatzen dituzte. Beraz, metal arruntetan, behin korrante elektrikoa hasiz gero korrante hori iraunaraziko lukeen potentzial-diferentziarik ez badago, elektroiak sarean sakabanatzen dira, eta, ondorioz, energia galdu eta beroketa

ohmiko gisa azaltzen da eta beraz, korrontea azkar desagertzen da. Supereroaleetan, aldiz, elektroi bikote anitz elkarrekin higitzen dira, era koordinatu bati jarraituz. Beraz, korronte elektrikoak inolako erresistentziarik gabe dabil supereroaleetan. Supereroaleak energia gal lezan, *egoera koherente (ordenatu) osoa apurtu beharko litzateke*, eta horretarako energia kantitate handia eman beharko litzateke bat-batera. Elektroi bikoteen kopuru makroskopiko bat (10^{22} inguru) *bat-batera* balaztatuko bada, ohiko erresistentzia elektrikoaren mekanismoak ezin ibil daitezke. Hauxe dugu metal arruntaren eta supereroalearen arteko ezberdintasun horren parekoa: eskua ur likidoan zehar sakatzearen parekoa izango litzateke metalaren parekoa eta izotz-burruntziaren aurka sakatzea supereroalearen parekoa. Lehen kasuan, erraz gerta daiteke energia apurrak galtzea: nahi bezain txikiak diren uhin eta zurrunbiloak sor daitezke. Bigarren kasuan, behingo energia kantitate handia soilik gal daiteke izotz-burruntzia apurtzen denean. Elektroi higitzeko era koordinatu horri, Cooper-bikotegintza deritzo (6 irudia), eta horretan elektroiaren momentuak elektroiaren posizioak baino garrantzi handiagoa du. Ordenamendu horretan loturiko energia, oso txikia da elektroi bakoitzeko; izan ere, erreakzio kimiko bat gertatzen denean, elektroi bakoitzak aldatzen duen energiaren milako bat da gutxi gorabehera energia hori. Eroale arrunta/supereroalea trantsizioarekin loturiko energia-aldaketa horiek hain txikiak izanik, supereroankortasunaren garapen osoa hain luze jotzeak ziuraski eragin zuen.

Meissner efektua dugu supereroaleen beste propietate bat: eremu magnetikoak ezin barnera daitezke supereroaleetan, eta, metal batean eremu magnetikoa dagoenean, eremu magnetiko hori kanporatu egiten da, metala T_c -ren azpiko tenperaturara hoztuz gero (3 irudia). Supereroaleen barrutian eremu magnetiko bat ezartzeko dagoen ezintasuna ere egoera supereroalearen koherentziaren ondorio dugu. Supereroale baten barneko eremu magnetikoa areagotzen saiatuz gero, Faradayren legearen arabera indar elektroeragilea sortuko genuke. Horren ondorioz, fluxu magnetikoaren aldaketari aurre egingo liokeen korronte elektriko sortuko litzateke. Baina, Cooperren bikote guztiek batera eragiten dutenez, fluxu magnetikoaren aldaketarik txikiak ere eremu sortzailea erabat ezeztatuko lukeen korronte elektriko sortzeko.

2.3. Fluxuaren kuantizazioa

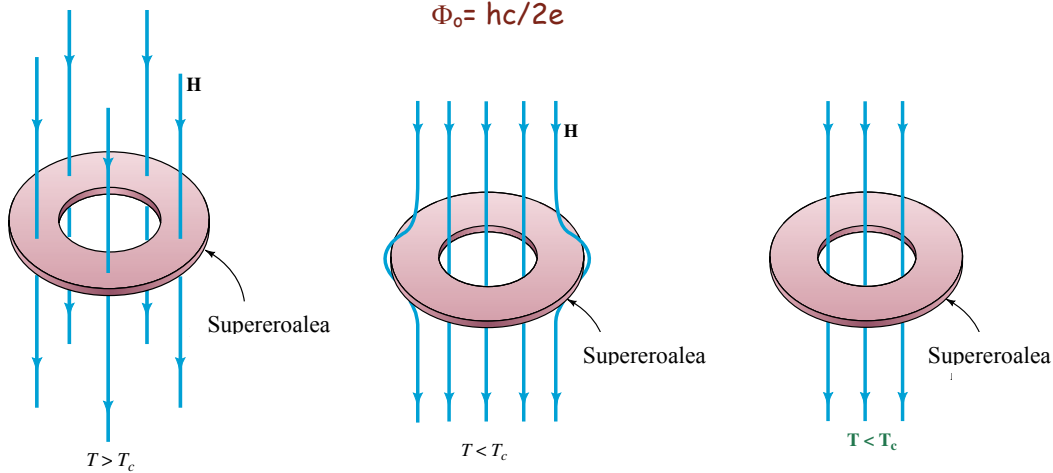
Demagun eraztun supereroale bat bere tenperatura kritikoaren gainetik dagoela eta eremu magnetiko baten eraginpean jartzen dugula (ezkerreko 7

irudia). Eratzun supereroalea eremuaren norabidearekiko perpendikularra den planoan datza. Ondoren, eratzunaren tenperatura T_c -ren azpira beheratuko dugu, eratzuna supereroale bilaka dadin. Ondorioz, eremua kanporatu egingo da, eta eremu-lerro guztiak eratzunaren kanpoaldera edo barnealdera mugaturik egongo dira (erdiko 7 irudia). Ondoren, aplikaturiko eremu magnetikoa kentzen badugu, eratzunaren kanpoko eremu magnetikoa desagertu egingo da, baina barnean zegoena, kuantizaturiko fluxu magnetikoa ($n\Phi_0$) hain zuzen, ez da ezabatuko (eskumako 7 irudia) eta ezarritako eremu magnetikoa kendu arren hor jarraituko du.

Fluxu Magnetikoaren Kuantizazioa

$$\Phi = n\Phi_0; \quad n=1,2,3\dots$$

$$\Phi_0 = hc/2e$$



7. irudia. Fluxu magnetikoaren kuantizazioa.

BCS teoria erabiliz froga daiteke egoera supereroalearen koherentzia dela bide, *eratzunean zeharreko fluxu magnetikoa $h/2e$ unitateetan kuantizatua dagoela*:

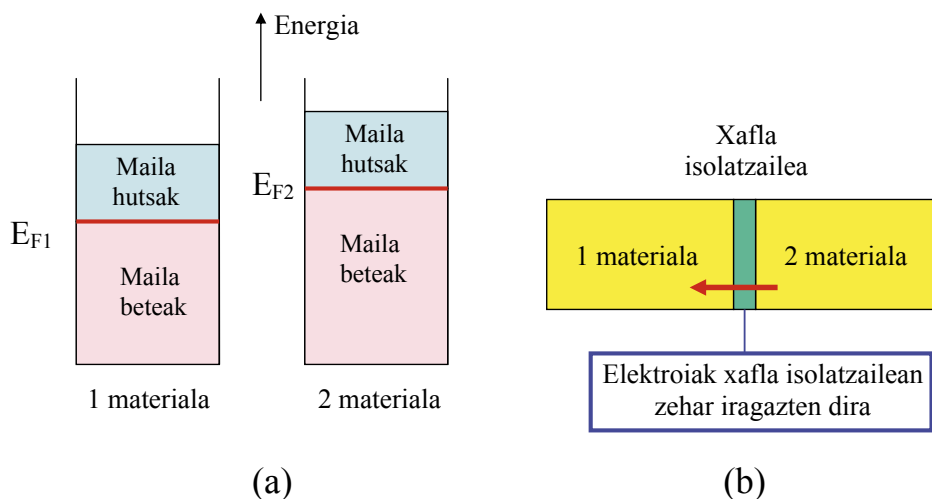
$$\Phi_B = nh/2e = n\Phi_0, \quad \text{non } n = 1, 2, 3, \dots \text{ den.}$$

Φ_0 kantitatea *fluxu magnetikoaren kuantua* dugu; haren balioa $2,07 \times 10^{-15}$ Wb = $2,07 \times 10^{-15}$ Tm² da. Hor ageri den $2e$ karga Cooperren bikote baten karga dugu eta h Plancken konstantea. Esperimentuek arrakastaz egiaztatu ahal izan dute fluxua kuantizaturik dagoelako iragarpena.

2.4. Bikoteen iragazpen kuantikoa eta Josephsonen efektua

1962. urtean Brian D. Josephson fisikariak aurrean zuen kontaktupean baina tarte isolatzaile batez banatutako bi xafla supereroalek propietate elektromagnetiko oso berezi batzuk erakutsiko dituztela. Propietate horiek, hainbat esperimintutan behatu dira, eta horrela efektu mekaniko-kuantikoak eskala makroskopikoan frogatu dira.

Iragazpen kuantikoa (edo tunel-efektua) hainbat junturatan zehar gerta daiteke: metal arrunten artean, metal arrunten eta supereroaleen artean, eta supereroaleen artean. Hemen, «juntura» bi metal-zatiren arteko tarte isolatzaile (xafla isolatzaile) mehe-meheari esaten diogu. Lurrundu ondoren geruza uniforme eta meheen eran jalki daitekeen materialaz osatua dago tarte isolatzailea. Xafla isolatzailea behar bezain mehea (10 nm-tik 20 nm-ra bitartekoa) baldin bada, elektroi bat metal batetik bestera iragan daiteke, tarte hori iragaziz. Demagun bi metal arruntek (1 metala eta 2 metala) E_{F1} eta E_{F2} Fermiren energiak dituztela hurrenez hurren. Baldin $E_{F2} > E_{F1}$ bada (8a irudia), elektroiak bete gabeko energia maila hutsak aurkitzen dituzte eta 2 metaletik 1 metalera igaro daitezke, tarte isolatzaileko langa iragaziz (8b irudia). Bi metalak berdin-berdinak baldin badira, —oso tenperatura baxuetan, behinik behin—, ez da iragazpenik gertatuko bete gabeko egoerarik ez baitago. Ostera, kanpo potentziala (V_{kanpo}) ezartzen baldin bada, junturaren alde bateko mailak beste aldeko mailez beherago eraitsiko dira, eta iragazpen kuantikoa gertatu ahal izango da.

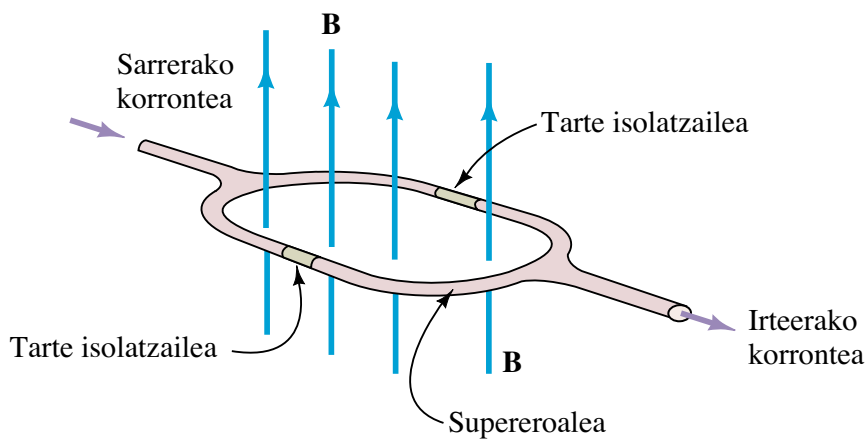


8. irudia. (a) Bi metal arrunten energia-eskemak; E_{F1} eta E_{F2} metal bien Fermiren energia mailak dira, $E_{F2} > E_{F1}$ delarik. (b) Xafla isolatzaile mehe batez banatzen diren juntura bat eraikiz, elektroi batzuk xafla isolatzailean zehar iragazten dira.

tzial-diferentzia konstantea dagoenean, haien artean dabilen korronteak oszilatu egiten du, honako maiztasun angeluarrarekin:

$$\omega = (4\pi/h)V.$$

Fenomeno honi *AC Josephsonen efektua* deritzo. Maiztasunak doitasun handiz neur daitezkeenez, efektu horrek tentsioaren neurketak araupetzeko ezagutzen den erarik zehatzena eskaintzen die fisikariei eta ingeniariari. Era berean, oinarritzko $2\pi e/h$ zatiduraren neurketarik zehatzena ahalbidetzen du.



10. irudia. Paraleloan uztauriko Josephsonen bi-junturatatik igarotzen den korrantea fluxu magnetikoa inguratzen duen balioaren menpekoa da.

Azter ditzagun paraleloan uztauriko Josephsonen bi-juntura (10 irudia). Korrante erresultanteak interferentzia-patroia azaltzen du, zirrikitu bikoitza zeharkatzen duen elektroiak bezala. Interferentzia-patroi hori juntura bikotearen bi besoek ingura dezaketen Φ_B fluxu magnetikoaren arabera da. Fluxu horrek bi zirrikituen esperimentuko zirrikituen arteko distantziak bezala jokatzen du. Korronteak Φ_B fluxu magnetikoarekiko duen mendekotasuna honako hau da:

$$J = J_{\max} \cos(2\pi e \Phi_B / h).$$

Fenomeno honek aukera ematen du fluxu magnetikoa zehaztasun handiz neurtzeko. SQUID gailua [*Superconducting Quantum Interference Device* (Interferentzia Kuantikoko Gailu Supereroalea)], deskribatu dugun fenomeno horretan oinarriturik dago, eta fluxu magnetiko txiki-txikiak doitasun handiz neurtzeko erabiltzen da maizenik: 10^{-13} T adinako eremu magnetiko txikiak neurtu dira. SQUIDen funtzionamenduari esker, fenomeno mekaniko-kuantiko esoteriko bat medikuntza-diagnosietako tresna teknologiko ga-

rrantzitsua bilakatu da; horrela, bihotzak edo burmuinak sorturiko korrante elektrikoen aldaketa txiki-txikiak neur daitezke, aldaketa horiek sortzen dituzten eremu magnetikoen bitartez [1].

Supereroankortasunaren teoria hainbat eratan aztertu da, esperimentu mota anitzen bidez, adibidez xurgapen ultrasonikoen ikerketen bidez, spin-nuklearreko fenomenoen bidez, maiztasun baxuko xurgapen infragorrien bidez, eta elektro-tunel esperimentuen bidez. Esperimentu horien neurketek laguntza eman dute supereroale desberdinen xehetasunak ondo ulertzeko.

3. ZER MATERIAL DIRA SUPEREROALE

Ehundaka material supereroale bihurtzen dira tenperatura baxuetan. 27 elementu kimiko, guztiak metalak, supereroale dira tenperatura baxuetan, kristal egitura arruntean eta presio arruntean (hau da presio atmosferikoan). Horien artean, aluminio, eztainu, beruna eta merkurio metal arruntak daude. Beste metal arraragoak, renioa, lantanoa eta protaktinioa ere supereroale dira. Gainera, 11 elementu kimiko, metalak, erdimetalak edo erdieroaleak direnak, tenperatura baxuetan supereroale dira, baina presio altupean. Horien artean uranioa, zerioa, silizioa eta selenioa daude. Bismutoa eta beste 5 elementu, nahiz euren kristal egoera arruntean supereroale ez bilakatu, supereroale bihurtzeko tenperatura oso baxuetan, egonkorak bihurtzen diren egoera oso desordenatuetan prestatuz. Supereroankortasuna ez da agertzen kromio, manganeso, burdina, kobalto eta nikel elementu magnetikoetan.

EZAGUTZEN DIREN ELEMENTU SUPEREROALEAK

■ URDINA: GIRO TENPERATURAN
■ BERDEA: PRESIOPEAN SOILIK

1	IA	H	IA	2	He																																														
2	IIA	Li	Be	3	III	B	4	IVA	C	5	V	N	6	VA	O	7	VIA	F	8	VII	Ne																														
3	IIIA	Na	Mg	9	IIIB	Al	10	IIIV	Si	11	IIIV	P	12	IIIV	S	13	IIIV	Cl	14	IIIB	Ar																														
4	IVB	K	Ca	21	VB	Sc	22	VB	Ti	23	VB	V	24	VB	Cr	25	VB	Mn	26	VI	Fe	27	VI	Co	28	VI	Ni	29	VI	Cu	30	VII	Zn	31	VIII	Ga	32	VIII	Ge	33	VIII	As	34	VIII	Se	35	VIII	Br	36	VIII	Kr
5	VIB	Rb	Sr	39	VIB	Y	40	VIB	Zr	41	VIB	Nb	42	VIB	Mo	43	VIB	Tc	44	VIB	Ru	45	VIB	Rh	46	VIB	Pd	47	VIB	Ag	48	VIB	Cd	49	VIB	In	50	VIB	Sn	51	VIB	Sb	52	VIB	Te	53	VIB	I	54	VIB	Xe
6	VII	Cs	Ba	57	VII	*La	58	VII	Hf	59	VII	Ta	60	VII	W	61	VII	Re	62	VII	Os	63	VII	Ir	64	VII	Pt	65	VII	Au	66	VII	Hg	67	VII	Tl	68	VII	Pb	69	VII	Bi	70	VII	Po	71	VII	At	72	VII	Rn
7	VIII	Fr	Ra	87	VIII	+Ac	88	VIII	Rf	89	VIII	Ha	90	VIII	106	91	VIII	107	92	VIII	108	93	VIII	109	94	VIII	110	95	VIII	111	96	VIII	112																		

73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

1. taula.

Supereroale ezagun gehienak aleazioak edo konposatuak dira. Konposatu bat supereroalea izan daiteke nahiz bera osotzen duten elementu kimikoak hala ez izan; Ag_2F eta C_8K dira honen adibide onak. Konposatu erdie-roale batzuk, SnTe adibidez, supereroale bilaka daitezke ezpurutasun egokiez dopatuz gero.

1986. urteaz geroztik T_C trantsizio-tenperatura oso altua duten konposatuak aurkitu dira: kuprea eta oxigenoa dituzten konposatuak (kupratuak deituak). Tenperatura altuko supereroale hauen propietateak 1986 aurreko supereroaleen, hots, supereroale klasikoen propietateen desberdinak dira zenbait arlotan. Jarraian doan eztabaidan bi supereroale motek dituzten propietateak aztertuko dira, baina hala ere arreta jarriko da T_C -altuko materialen desberdintasunetan. Beste sailkapen arazo bat erakusten dute supereroale diren karbono-konposatuek, zenbaitetan beste atomo batzuekin dopaturik, eta karbono atomoak kristal egitura esferiko edo esferoidala duten klusterren gainazalean kokatuta daudelarik. Konposatu hauei, 1980ean aurkituak, fullerenoak deritze (bakarrik karbonoa badago) edo fulleridoak (dopaturik egonez gero). Hauek supereroale klasikoen tenperatura kritikoak baino altuagoak dituzte. Hala ere, ez da oraindik ezaguna konposatu hauek oinarrian T_C -altuko supereroale kupratuen antzekoak ote diren.

3.1. Supereroaleen propietate termikoak. Tenperatura kritikoak

Elementu supereroale ezagun gehien-gehien tenperatura kritikoak 1 K eta 10 K tartean daude. Elementu kimikoen kasuan, tugstenoa da T_C txikiena duena (0,015 K), eta niobioa altuena (9,2 K). Tenperatura kritikoa, orokorrean oso sentikorra da ezpurutasun magetikoekiko. Adibidez, zinka (Zn) Mn atomo gutxi batzuk erabiliz (miliona batzuk) dopatzen bada, trantsizio-tenperatura asko jaisten da.

3.2. Supereroaleen propietate magnetikoak eta elektromagnetikoak. Ereku magnetiko kritikoa

Supereroale bat egoera arruntera behartu daiteke ereku magnetiko bat ezarriz. Trantsizio hori behartuko duen gutxieneko erekuari ereku kritikoa (H_C) deitzen zaio (laginak zilindro luze eta mehea behar du izan, edo bestela elipsoide bat eta erekuak ardatz luzearekiko paraleloa behar du. Konfigurazioa beste era batekoa bada, lagina supereroale egoeratik tarteko egoera ba-

tera aldatzen da; bertan eskualde batzuk arruntak dira eta besteak supereroaleak; azkenean egoera arruntera pasako da lagina). Ereku magnetiko kritikoa tenperatura jaistean handituz doa. Elementu supereroaletarako, honako tarte honetan kokatzen da zero absolutu tenperaturaren duen balioa: 1,1 oersted tungstenorako eta 830 oersted tantalumerako.

Ereku magnetiko kritikoa buruz esandakoa baliogarria da, bai supereroale arruntetarako (I motakoetarako) zein II motako supereroaletarako.

3.3. Supereroaleen propietate magnetikoak eta elektromagnetikoak. Meissner efektua

Goian esan bezala I motako supereroaleak (eitea zilindro luze eta mehearena edo elipsoidearena) tenperatura finko batean ereku magnetikoa (H_C baino ahulagoa) laginaren ardatz luzearekiko paraleloa aplikatzen denean, supereroale beraien barnetik kanporatzen dute ereku magnetikoa; hau erraz aurrean zitekeen elektromagnetismoaren legetatik, supereroaleak erresistentzia elektrikorik ez duela jakinik. Fenomeno harrigarriagoa gertatzen da, lagin berberari era berean ereku magnetikoa T_C baino tenperatura handiagoan ezartzen zaionean eta ereku magnetikoa aldatu gabe tenperatura jais-ten bada. Laginak fluxu magnetikoa kanporatzen du supereroale bilakatzean. Honi Meissner efektua deritzo. Fluxu magnetikoaren kanporatze osoa (Meissner efektu osoa) I motako supereroaleetan gertatzen da, baina baka-rik aipaturiko geometria duten laginetan. Eite desberdineko laginetan, egitura-hutsak barne, fluxu magnetikoaren zati bat harrapatua gera daiteke, Meissner efektu partziala edo ezosoa agertuz.

II motako supereroaleen portaera magnetikoa ezberdina da. Honelako jokaera erakusten dute Niobioak eta Vanadioak (elementu kimikoen artean II motakoak diren bakarrak), aleazio eta konposatu batzuek, eta T_C -altuko supereroaleek. Eitez zilindro luze eta mehea edo elipsoidea den II motako lagin bati laginaren ardatz luzearekiko paraleloa den ereku magnetiko gutxikorra ezartzen zaionean, magnetizazioaren handitzea, ez da bat-batean gertatzen. Izan ere, H_C eremura heltzean, apurka-apurka gertatzen da. Goi ereku kritiko (H_{C2}) batean hasten da eta osotu egiten da beste behe ereku kritiko (H_{C1}) batean. Lagina beste eite batekoa bada, zuloren bat badu edo homogenoa ez bada edo tentsionatua badago, orduan fluxu magnetikoren bat harrapatua geratzen da eta laginean magnetizazioaren bat gera daiteke, ezarri den ereku magnetikoa itzaltzen denean. Ezagutzen diren H_{C2} -ren balioak 6×10^5 oerstederaino iristen dira ($PbMo_6S_8$).

Fluxu magnetikoaren kanporatzea I motako supereroaleetan H_C azpitik edo II motako supereroaleetan H_{C1} azpitik, ez da sekula esan den bezain erabatekoa, zeren eremua beti sartzen da laginean distantzia labur batean, sartzesakonera elektromagnetikoa deiturikoan hain zuzen. Sartzesakoneren balioak elementu supereroaleetarako tenperatura baxuan 390-1300 angstron tartean dago. Tenperatura T_C -ra hurbiltzen denean, sartzesakonera oso handia egiten da.

4. T_C ALTUKO SUPEREROANKORTASUNA

Kammerlingh Onnesek merkurioa 4 K inguruan supereroale bilakatzen dela aurkitu ostean, zientzialariak trantsizio tenperatura, T_C altuagoko supereroaleen bila ibili dira. 1986 urtera arte Nb_3Ge zen T_C altuena zuen materiala, 23 K; hots, 20 gradu baino handipen txikiagoa (T_C -rena) lortu zuten 75 urtez ikerketan ibili ostean. Ikerlari gehienek pentsatzen zuten antzeko aleazio metalikoetan gertatuko zela T_C -ren hurrengo handipena, eta gehienez bat edo bi gradukoa izango zela. 1986ean Karl Alex Müller eta Johannes Georg Bednorz fisikariek (11 irudia), metal oxidoekin 3 urtez ikertu ostean, 30 K balioko tenperatura kritikoa zuen supereroalea aurkitu zuten ustekabean. 1987an Fisikan Nobel saria lortu zuten, eta haien aurkikuntzak mundu guztiko zientzialariak kitzikatu zituen gero eta T_C handiagoko oxido supereroaleen atzetik ibiltzera.



11. irudia. T_C altuko supereroankortasuna aurkitu zuten Karl Alex Müller eta Johannes Georg Bednorz fisikariak.

T_C altuko supereroale horiek zeramikazkoak dira eta elementu asko dituzte egiturari. Lantanoa, Ytriuma edo beste lur-arraro bat izaten dute; halaber, bismutoa edo talioa; hauez gain arrunta da bariuma edo estrontzioa (biak elementu alkalinoak) erabiltzea ere; eta oinarri bezala kuprea eta oxigenoa. Beste espezie atomikoak ere sar daitezke ordezkapen kimikoaren bidez T_C altuko propietateak mantenduz. Orain arte lorturiko T_C altuena 134

K da. Familia desberdinetakoak dira T_C altuko supereroale hauek, familia bakoitzean aldatzen den bakarra estekiometria izaki. Bismutoari eta taliu-mari dagokien familietan desorden atomikoa handia dago beti, hots, atomoak kristalaren posizio «okerretan» kokaturik daude, eta ezpurutasun fa-seak dituzte. Izan daiteke, desorden hori beharrezkoa izatea konposatu horiek termodinamikoki egonkorak izan daitezen.

4.1. T_C altuko supereroankortasuna. Erabilerak

Material berri hauen xafra meheek tresna askotarako behar diren baino korrante handiagoak garraia ditzakete supereroankortasun egoerari eutsiz. T_C altuko supereroale hauen aplikazio potentzialak honako hauek dira: (xafra eitea edo bulk eitean) ordenagailuen zatiak (gailu logikoak, memoria elementuak, etengailuak, eta konexioak), oszilagailuak, anplifikagailuak, partikula azeleragailuak, eremu magnetikoak, tentsioak eta korronteak neurtzeko tresna oso sentikorak, MRIrako imanak, energia metatzeko sistemak, abiadura handiko tren lebitatuak, motorrak, sorgailuak, transformadoreak, eta transmisio-lerroak. Potentzia galera urria, operazio-abiadura handia eta sentikortasun handia izango lirateke abantaila handienak. T_C altuko supereroaleekin egindako tresnak merkeagoak lirateke, oso merkea den nitrogeno likidoarekin hoztu daitezkeelako (irakite-tenperatura, 77 K), beti garestia den He likidoa erabili beharrean (irakite tenperatura, 4,2 K). Hala ere, zeramikek gainditu beharreko arazoak dituzte tresna erabilgarriak izateko. Honako hauek dira arazoetariko batzuk: hauskortasuna, materialen ez-egonkortasuna ezegonkortasuna ingurune kimiko batzuetan eta ezpurutasunen joera azaletan eta grano-mugetan hauspeatzeko, non egoera supereroalean korrante elektriko handiaren garraioa oztopatetzen duten.

5. SUPEREROANKORTASUNAREN BENETAKO IRAULTZA

1957. urtean John Bardeen, Leon Cooper eta Robert Schrieffer zientzialariek tenperatura baxuko supereroaleen jokaera azaltzen duen BCS teoria plazaratu zuten. Hala ere, 1961. urtea aurretik, supereroankortasuna zientzia-arazo oso erakargarria zen baina aplikazio garrantzitsurik gabekoa. Eremu magnetiko altuko supereroaleak garatu ostean, berriz, Nb/Ti eta Nb/Sn aleazioen supereroankortasuna instrumentu teknologiko oso garrantzitsua bilakatu zen, bereziki, eremu magnetiko altuko elektroiman supereroale bezala.

Iman supereroaleen egungo merkatuko erabilera nagusia MRIa da (erResonantzia Magnetiko bidezko Irudigintza). Beste merkatu-aplikazio batzuk ere badaude, adibidez, supereroaletan oinarritutako kondentsadore dinamiko sinkronoak (argindar mozketak eragozteko argindarraren eskaerak oso handiak bilakatzen direnean). Era berean, argindarraren garraiorako kable supereroaleak ditugu zorupeko transmisioan hirietan. Haril supereroaleak erabiltzen dituzten erakusketa-proiektuen artean, honelako hauek daude: sorgailu elektrikoak, abiadura handiko trenen lebitazio magnetikoa eta itsasontzien propulsioa. Hala ere, aplikazio hauek atzera geratu dira iman supereroaleek oso indartsu sartu baitira oinarritzko ikerketako laborategietan, bai laborategi txikietan eta bai eskala handiko laborategietan (adibidez, energia altuko fisikarako azeleragailu handietan eta fusio proiektuetan, partikula kargatuen ibilbideak kontrolatzeko).

1986. urtean tenperatura altuko supereroaleak aurkitu ziren. Honek interes itzela sortu zuen zientzialarien artean (ikerketan hau moda bihurtu baitzen) eta mass-median. Aurkikuntza hori prentsa idatziaren lehen orrian agertzen zen. Adibidez, Time egunkari estatubatuar ezagunean Paul Chu (Houston Univ.) honelakoak zioen «Elektrizitatearen aurkintza bezain garrantzitsua izan liteke». Erakargarritasun honen adierazle garbia da Berdnoz&Müllerrek, T_C altuko supereroaleen aurkitzaileak hurrengo urtean Nobel saria lortu izana. Inoiz, inork ez du sekula lortu hain arin horrelako sari preziatua, hots, aurkikuntza egin eta urte betera.

Harrezkero lan itzela egin da mundu zabaleko unibertsitateetan zein industrietan, T_C altuko supereroaleen korrante elektriko kritikoak hobetzeko eta zenbait aplikazioetan erabiltzeko. Hala ere, aitortu beharra dago egungo perspektiba kontuan izanda, teknologia-iraultza handiena, Bell laborategietan aurkituriko Nb/Sn iman supereroaleena dela.

Kammerling Onnesek eta aro hartako zientzialariek ikertu zituzten elementu supereroaleek (Hg, Pb, Sn), eremu magnetiko kritiko oso baxuak dituzte. Hala ere, eremu kritiko horren azpikoen kasuan, eremu magnetikoak supereroaletik erabat kanporatzen ziren (I motako supereroaleak), eta beraien ezaugarri garrantzitsuak bi dira: 1) supereroankortasuna (eroale elektriko perfektuak) eta 2) superdiamagnetismoa (material diamagnetiko perfektuak, eremu magnetikoa oso-osorik materialetik kanporatzen dute). Baina, eremu magnetikoek eremu kritikoa gaindituz gero, supereroankortasuna galtzen galdu egiten dute, eta material arrunt bilakatzen dira.

1960. hamarkadan garaturiko eremu magnetiko altuko supereroaleak berriz, II motakoak dira. Aurrekoak bezala, eroale elektriko perfektuak dira,

baina, fluxu magnetikoa supereroaletik erabat kanporatu beharrian, fluxuaren quantuen (fluxuoiak) sarrera partziala eta indibiduala onartzen dute. Ez dute galarazten I motako supereroaleak bezainbeste, eremu magnetikoaren sarrera supereroalean, baina supereroankortasuna (erresistentzia elektrikoa 0) eremu magnetiko askoz altuetaraino mantentzen dute.

Kable supereroaleek, eremu magnetiko altuko iman supereroale modura jokatu ahal izateko, II motako supereroale horiek gai izan behar dute erresistentzia elektrikorik gabe korrante handiak garraiatzeko eremu magnetiko handien pean; izan ere, korrante handi horrek berak sortzen du eremu magnetiko altua. Elektroiman batean korrontearen jarioa eremu magnetikoaren perpendikularra da; beraz, hala da fluxoien norabideena ere. Ohar gaitzen, eremu magnetikoarekiko perpendikularra den korrante elektrikoak indar bat eragiten duela, eremuarekiko eta korrontearrekiko ($\mathbf{F} = I \mathbf{L} \times \mathbf{B}$) era perpendikularrean. Beraz korrante horrek fluxoiekiko perpendikularra den indarra egiten du. Indar horri erantzunez fluxoiak higitzen badira, higidurak beroketa eta erresistentzia elektrikoa sortzen ditu. Ondorioz, korrante kritikoak baxuak izango dira, eta material hori ez da baliogarria izango iman supereroaleen kabletarako.

Baina, demagun, materialak «grano-mugak edo kristal-mugak», ezhomogeneotasun kimiko edo/eta beste akats asko dituela. Mikroegituraren ezaugarri horiek gai badira fluxoien higidura eragozteko, supereroale «gogorak» izango ditugu, hots, korrante elektriko kritiko altuko supereroaleak. Hori horrela da, eta zientzialariek 1960-70 hamarkadan ikasi zuten mikroegituraren ezhomogenotasunak nola lortu Nb/Ti, Nb/Sn eta II motako eta eremu altuko beste supereroaleetan. Era horretan gai izan ziren fluxoien higidura eragozteko, eta beraz, korrante elektriko kritiko altuak lortzeko. Horri esker, egun baditugu MRI, partikula azeleragailuak eta eremu altuko supereroaleen beste hainbat aplikazio.

1986. urtean aurkituriko oxido zeramikoen tenperatura kritikoa (T_c) eta eremu magnetiko kritikoa (H_c), Nb/Sn eta Nb/Ti aleazioena baino askoz altuagoa da. Beraz, ahalmena eduki badaukate iman supereroaleen hariletan erabiliak izateko eta egungo eremu magnetikoak baino askoz handiagoak lortzeko, edo tenperatura altuagoetan antzeko eremuak sortzeko (MRIak helio likidoa gabe nitrogeno likidoa behar balu askoz merkeagoa litzateke). Aipaturikoa lortu ahal izateko ezinbestekoa da fluxoien higidura ongi ekiditeko mikroegitura egokiak eraiki ahal izatea, eta ondorioz korrante elektriko kritiko (I_c) altuagoak lortzea. Tenperatura altuko supereroale horien «gogortasuna» ez da nahikoa eremu altuko iman supereroaleetan erabiltzeko. Ma-

terial zeramiko berri horien eragozpen batzuk gainditzeko erronka handia da: adibidez, supereroankortasunaren ahultzea kristaltxoan mugetan, hau da «weak link» problema izenaz ezagutua. Aurrerapenak lortu dira, eta ahaleginetan dihardute oraindik, baina, zoritxarrez tenperatura altuko supereroaleentzat ez da erraza «gogorrak» izatea.

BIBLIOGRAFIA

[1] «Neurketa magnetikoak» J.M. BARANDIARAN EKAIA 3 (1995)37

Gehiago irakurtzeko

- [2] «Fisika Zientzialari eta Ingeniarientzat» PAUL M. FISHBANE, STEPHEN GASIOROWICZ, STEPHEN T. THORNTON. UPV/EHUko argitarapen zerbitzua. Leioa 2008.
- [3] «Driving force, the natural magic of magnets» J.M. LIVINGSTON, Harvard University Press, Cambridge, 1996
- [4] «Superconductivity» J. B. KETTERSON, S.N. SONG, Cambridge University Press, 1999.