

SUPEREROANKORTASUNA

AZTIKERIA BERRIA?

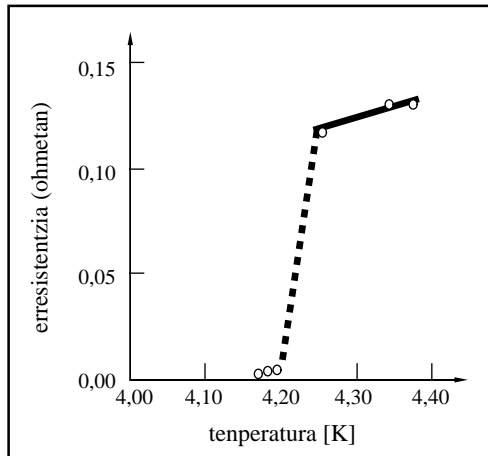
P.M. Etxenike eta J. M Ugalde*

*Supereroankortasuna
Kamerlingh Onnes-ek Leyden-
en (Holandan) 1911.ean aurkitu
zuen fenomeno da, hots,
merkurioaren erresistentzia
elektrikoa eta ondorioz energi
disipazioa, desagertu egiten zela
ikusitu zuen. Material askok
propietate hau zero absolututik,
hots, -273°C tik, gertu agertzen
dute. Zero absolutua Kelvin (K)
temperatur eskalaren jatorri-
puntua da. Beraz 30°C
temperatura 303K da eskala
absolutuan.*



Kamerlingh Onnes

KAMERLINGH Onnes-ek merkurioaren erresistibitate elektrikoa estudiantzean, metal honek bere erresistentzia erabat eta bapatean galdu egiten zuela, 4Kez azpitiko tenperaturatan, aurkitu zuen (ikus 1. irudia). Erresistentzia zero egoera horri supereroankortasun-egoera deritzo.



1. irudia. Kamerlingh Onnes-ek 1911.ean aurkitutako supereroankortasun-fenomenoa. Tenperatura kritikoaz azpitik eroalearen erresistentzia zero da.

Supereroankortasuna aurkitu eta laster, propietate hau tenperatura balio batetik gora igotakoan desagertu egiten aurkitu zuen. Tenperatura horri tenperatura kritiko deritzo (T_c). Alabaina, supereroankortasuna eremu magnetiko eta elektrikoen balio batzuetatik gora ere galdu egiten da. Balio hauek eremu eta korrante kritiko izenez ezagutzen dira.

Merkurioan supereroankortasuna aurkitu eta hurrengo urteetan, beste zenbait metalean ere tenperatura baxuetan propietate hori bera zegoela aurkitu zen (Ikus 2. irudia). Baina fenomenoa azaltzeko printzipioetan oinarritutako lehenengo teoria gauzatzea ez zen hasiera batean posible izan. Izan ere, 1957. urtera arte ez zen BCS izeneko teoria sortu, non fenomenoa fisikaren hastapenetatik abiatuz adierazten zen. Aipatutako data baino lehen, zenbait teoria plazaratu zen; London eta Ginzburg-Landau-ren teoriak adibidez, zeintzuk teoria fenomenologikoak ziren (hots, gertakizun esperimentalen deskribapen matematikoak), baina ezin dute fenomenoa bera fisikako legeen arabera azaldu.

2. irudia. Magnetismo eta supereroankortasunaren arteko erlazioa iradokitzen duen diseinaturiko taula. Supereroankortasunak substantzia magnetikoetan ez agertzeko joera badu ere, agian etorkizunean teoriaren batek aldi berean portaera magnetikoa eta supereroankortasun-portaera agituko ditu.

1933.ean supereroaleen beste propietate bat aurkitu zuten W. Meissner eta R. Ochsenfeld fisikari alemaniarrek; supereroaleak eremu magnetikoa kanporatu egiten zuela; ia diamagnetismo perfektua zuela alegia. Material arruntetan, eremu magnetikoa materialetan barrena sartzen da, nahiz bertan hartzen duen balioa kanpokoarekiko desberdina izan. Supereroaletan, eremua nahikoa txikia denean, eremu magnetikoa materialaren barnean zero da. Fenomeno honi “Meissner efektu” deritzo, eta supereroaleen ezaugarri garrantzitsuenetariko bat da (ikus argazkia).

Alde batetik supereroalea erresistentzia elektrikoa zero duen material soila baino zerbait gehiago dela erakusten du, zeren konduktibitate infinituki txikiak (erresistentzia zero) ez du diamagnetismo perfektua dagoela esan nahi. Beraz supereroankortasuna, materiaren “egoera” berritatu hartu behar izan zen. Bestalde Meissner efektuak ohizko egoeratik supereroale-egoerainoko trantsizioa, trantsizio termodinamiko itzulgarria dela (ikus 3. irudia) erakusten du.

1934.ean F. London fisikari ingelesak, supereroankortasunaren teoria fenomenologiko bat argitaratu zuen eta eremu magnetikoaren sartze-luzeraren existentzia auresan ere bai. Sartze-luzera honen esplikazio fisikoa samurra da, hots, supereroaleetan eremu magnetikoa ateratzea gainazal-korronteak sortutako indukzioari sor zaio. Beraz materialarekiko

SUPEREROANKORTASUNAREN HISTORIA

- 1911 Kamerlingh Onnes (Leyden)
- 1933 Meissner-Ochsenfeld (Leyden)
- 1934 Fitz-London (Bristol) Heinz-London

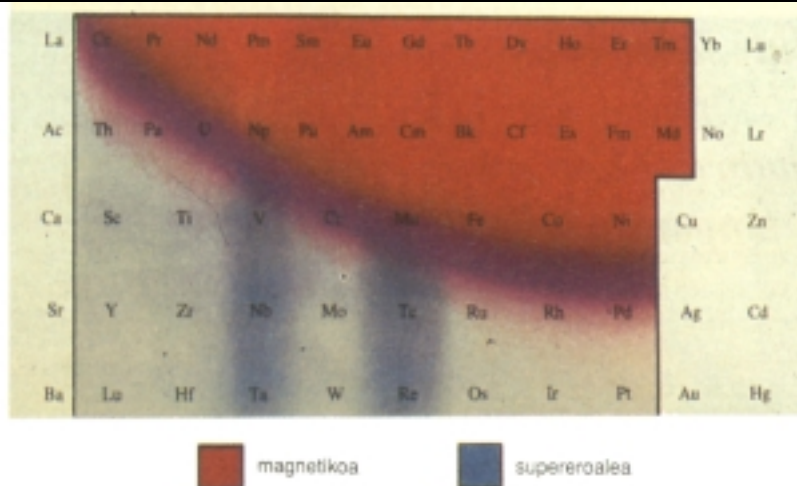
$$B(z) = B(0) e^{-z/\lambda_L} ; \lambda_L = \left(\frac{mc^2}{4\pi nq}\right)^2 (Al \ \& \ 160\text{\AA})$$

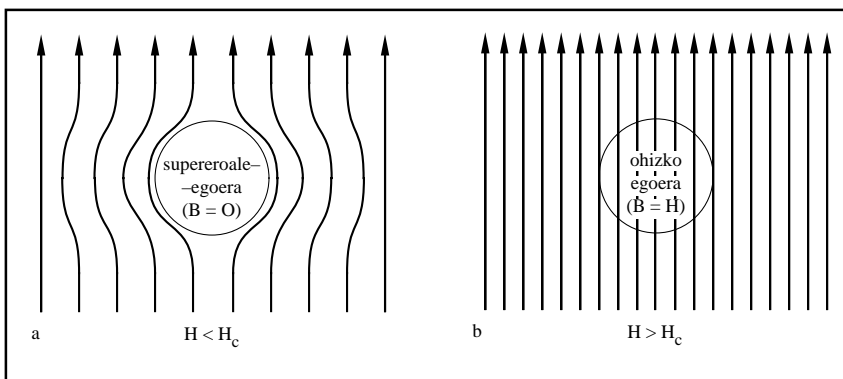
- 1939 Eremu magnetikoaren sartze-luzeraren neurketa
- 1950 Frölich (Liverpool)-Sarearen eragina
- 1950 Maxwell (MIT)-Serin-Efektua Isotopikoa
- 1953 B. Pippard (Cambridge) Koherentzi luzera

$$\xi_0 = \frac{2\hbar v_F}{\pi E_g} (16000 \text{\AA})$$

- 1957 J. Bardeen, L. Cooper, J. Schrieffer-BCS

- B. Matthias-Material berriak
- 1973 John Gavalers-Nb₃Ge $T_c = 23.2K$
- 1986 A. Müller eta Bednorz (IBM-Zurich) La_{2-x}B Cu O₇ Txu (Houston), Tanaka (Tokio), Zhao (Beijing), Batlogg (ATT) Azken errekorra: 125K





3. irudia.

a) Esfera supereroalean eremu magnetikoa materialetik egotzi egiten da (Meissner efektua).

b) Eremu magnetikoa H_c balio kritikoa baino handiagoa bada, materialera sartu eta supereroankortasuna desagertu egiten da.

distantzia txikitara pantailatze-korrontea dabilen ingurutik, eremu magnetikoa ezin daiteke erabat kanporatu. Honek sartze-luzera ematen du, zeina 1939.ean esperimentalki baieztatu zen.

S. Berin-ek 1950.ean egindako esperimientuek, teoria egokiak korrontea garraia dezaketen elektroiak atomo edota inguruetako ioien kristal-sarean duten oreka-lekuekiko bibrazioen menpekotasuna kontuan hartu behar zuela frogatu zuten. Kristal-sareko atomoen bibrazioak esplikatzeke eredu eta eremu elektromagnetikoaren kuantizazio-eremua antzekoak dira. Adibidez, kuantizazioari fotoi deituriko kuantuak dagozkion bezala, sarearen bibrazio-kuantuei fonoi deritze.

Urte haietan Frölich elektroifonoi interakzioa estudiatzen ari zen; ohizko supereroankortasunaren oinarria dena hain zuzen. Eta 50. urte berean V. L. Ginzburg eta L. D. Landau fisikari sobietarrek, teoria berri bat plazaratu zuten ohizko egoeratik supereroale-egoerainoko trantsizioaren propietate termodinamikoak esplikatzeke.

1957.ean, supereroankortasunaren aurkikuntza baino 56 urte geroago, J. Bardeen, L. N. Cooper eta T. R. Schieffer fisikari amerikarrek beren inzialak daramatzan BCS teoria mikroskopikoa argitaratu zuten. Honek ordurainoko efektu ezagun guztiak esplikatu zituen, fenomenoaren jatorria ulergarria bihurtu zuen, eta Londonen eta Landau eta Ginzburgen teoria fenomenologikoak ere esplikatu zituen. Teoria hau materia kondentsatuaren fisikako dotoreenatarikoa da.

Bost urte geroago, 1962. urtean, Brian Josephson Cambridgeko Unibertsitateko Cavendish Laborategi ospetsuko doktore-ikasle zenean, BCS teorian oinarriturik bi metal supereroaleen ukipen-gainazalean propietate bereziak agertu behar zituela aurrean zuen. Azaldu behar zuten propietateen artean hau zegoen: xafla isolatzaile mehe batez berezitateko bi supereroaleen artean korronte elektrikoa pasatu ahal izatea, nahiz supereroaleen arteko potentziala zero izan. Propietate hau (Josephson efektua, alegia), beharbada supereroaleen propietate oinarritzkoen eta garrantzitsuenetariko bat da, eta jadanik laborategian ikusi ahal izan da. Horrela fisika kuantikoaren ondorio makroskopikoak

agerian jarri izan dira. Esan dezagun Josephson-ek lan honegatik 1973.ean Nobel saria jaso zuela.

Urtetan igo nahi izan da supereroaleen tenperatura kritikoa. BCS teoriak ez du bilatze-prozesu honetarako argibide zehatzik eskaintzen, materialen egitura elektronikoa zehatz ezagutzea eskatzen duelako. Ordenadore ahalsuekin batera aurrerapen handiak lortu ziren. Izan ere, B. Matthias fisikari amerikarraren (alemaniarra jaiotzez) lanak aipagarriak dira. John Gavaler-ek 1973.ean Westinghouse-ko laborategian Niobio eta Germaniozko supereroale berri bat lortu zuen, zeinaren tenperatura kritikoa 23,2Kekoa den.

Duela denbora gutxi arte ezin izan da tenperatura hori gainditu. Honek, zenbait

konsiderazio teorikorekin batera, fisikari asko 30K gorako supereroankortasuna ezin zela gertatu edota supereroankortasunaz dena esana zegoela pentsatzera bultzatu zuten.

TENPERATURA ALTUKO SUPEREROANKORTASUNA

1986.eko urtarrilean bi fisikari alemaniarrek (K.A. Müller eta J.G. Bednorz-ek) Zurichen IBMk dituen laborategietan Lantano (La), Bario (Ba) eta Kobre (Cu) oxido bat 30K baino



tenperatura handiagoan supereroale zela aurkitu zuten. Aipatutako oxidoaren formula kimikoa $La_{2-x}Ba_xCuO$ (non x aldakorra den) da. Lan honegatik Nobel saria jaso dute eta aro berri bat ireki da. Izan ere, urtebeteren buruan zenbait taldek (Tanaka (Tokio), Txu (Houston), Zhao (Beijin) eta Batlogg (AT&T Bell Labs)), emaitza berriak lortu dituzte. Supereroankortasunaren muga 90K baino gorago eraman dute lur arraroak dituzten oxido ternarioen bidez.

Gaur egun tenperatura kritikoren errekorra 125Ketan dago.

FASE-TRANTSIZIOAK

Supereroankortasuna ematen duten mekanismo mikroskopikoak azaldu aurretik, ikus dezagun ea fase-trantsizioen baldintzak betetzen diren.

Fenomeno fisiko bat eskema orokor batean sailkatzearen garrantzia antzeko portaera duten materialen mekanismo amankomunak argitzean datza. Lurrin/likido eta likido/solido trantsizioak egunero ikusten ditugun fase-trantsizioak dira. Fasea, materialak agertzen duen itxura edo egitura konkretuari deitzen diogu. Oso garrantzitsua da honako hau azpimarratzea: lurrin/likido/solido fase-trantsizioetan ez direla materia osatzen duten atomoak aldatzen (atomoak berdinak dira, nahiz eta agertzen diguten itxura aldatu den). Gas-fasea tenperatura handitan lortzen da, jaistean lurrina kondentsatu egiten da, eta beherago materiala solidotu egiten da.

Tenperatura laborategian kontrola daiteke, eta horrela fase-trantsizioak eragin daitezke. Baina fase-trantsizioa zein tenperaturatan gertatuko den ezin dezakegu aurrean, besterik kontrolatzen ez badugu.

Jakina denez, uraren irakite-tenperatura jaitasi egiten da itsas mailatik gora abiatzen garen neurrian. Presioa finkatzen dugunean atomo-multzo bakoitzari tenperatura bat, non fase-trantsizioa gertatzen den, dagokio. Eta presio eta tenperatura era kontrolatuan alda daitezkeenez gero, presio eta tenperaturari "aldagai termodinamiko" esango diegu.

Baina, zer gertatzen zaio substantziaren bolumenari?, galde liezaguke edonork. Baldin presioa eta tenperatura kontrolatzen baditugu, bolumena beste aldagaien balioek finkatzen dute. Beraz tenperatura eta bolumena aukera geni-

tzakeen, eta orduan presioa geratuko litzateke finkatuta. Izan ere, atomo-multzo bat emanda bi edozein aldagai termodinamikok hirugarrena finkatzen dute. Aldagai termodinamikoaren arteko erlazio honek, "egoera-ekuazio" izeneko errepresentazio matematikoa ematen digu.

Kontura gaitetzen BI aldagaiez bakarrik MILIOIKA atomoen portaera deskriba dezakegula. Alegia, egoera-ekuazioa ezagutzeak presio- eta tenperatur baldintza ezberdinen menpeko materialen portaera argitzen digu. Aldiz ezaguera honek materia nola erabili erakusten digu. Baina fisikariarentzat egoera-ekuazioa ezagutzea, amaia ez eta enbido baten hasiera da. Nola portatzen dira atomo-multzo handi horiek?, galdegiten diogu geure buruari; nola antolatzen dira?; zergatik agertzen zaizkigu fase ezberdinetan?.

Azter ditzagun, bada, gas-fasearen ezaugarriak. Atomo edo molekulak erraz higitzen dira bolumen osoan zehar. Beraz partikula bakoitza momentu batean non dagoen esatea ezinezkoa da, eta are gutxiago molekula guztien bilakaera gogoratzea. Oso sistema desordenatuaren aurrean gaude. Tenperaturak desordena eragiten du edozein substantzian. Baina desorden-maila substantziaren menpeko da. Hizkera teknikoan desordenari entropia deritzo. Tenperatura jaistean, desordena jaitasi egiten da, hots, entropia. Hau da, likidoa gasa baino sistema ordenatuagoa da; eta solidoa hain da ordenatua, ze atomo-kopuru txiki baten posizioak ezagututa beste guztien posizioak aurrean bait genitzake. Esandakoa X izpiez egindako argazkiez baieztatzen da.

Harrigarria bada ere, egoera-ekuaziorik errazena egoera desordenatua-

rena da. Alegia, haren arabera baldin bolumena konstante mantentzen badugu eta tenperatura (Kelvin gradutan) bikoizten badugu, presioa ere bikoiztu egingo da, zein gas darabilgun berdin zaiolarik. Honek ez liguke oso arrarogertatu behar, zeren gas-atomoek duten higikortasunari esker bere kidearen alboan atomo bakoitzak hain denbora gutxi ematen duenez, hura "ezagutzea" ezinezkoa egiten bait zaio. Beraz, gas-atomo batentzat beste guztiak berdinak dira eta ezin ditu bereiztu. Baina tenperatura jaitasi atomoek denbora gehiago ematen dute elkarren ondoan, eta denbora gehiago dute elkar ezagutzeko. "Ezagutu" hizkera fisikoan interakzionatu da. Atomoak elkar interakzionatzean, ezagutu egiten dira; hots, ente hautakorra da besteen artean, aukera dezakeelako.

Tenperatura jaistearekin batera atomoak ordenatu egiten dira. Elkarrekin zehar esker, gasa likido bihurtzen da eta gero hau solido-fasera pasatzen da. Solidoan atomo-mota desberdinak sare geometrikoko tokietan daude kokatuta, ordena osoa bailitza. Beraz entropia zero izango litzateke. Baina ez da horrela. Atomoak toki konkretuetan badaude ere, oraindik posizio horren inguruan bibrazio txikiak egin ditzakete. Zero absolutuan bakarrik (-273°C) da entropia zero.

Orain, aztertu dugun informazioa bildu eta substantzia gobernatzeko duen lege bat eman dezakegu: tenperatura altuetan entropia da nagusi, aldiz baxuetan atomoen arteko interakzioak nagusitzen dira eta desordenaren eragina murriztu egiten da. Entropia eta energiaren arteko interakzioak substantziaren portaera determinatzen dute. ○

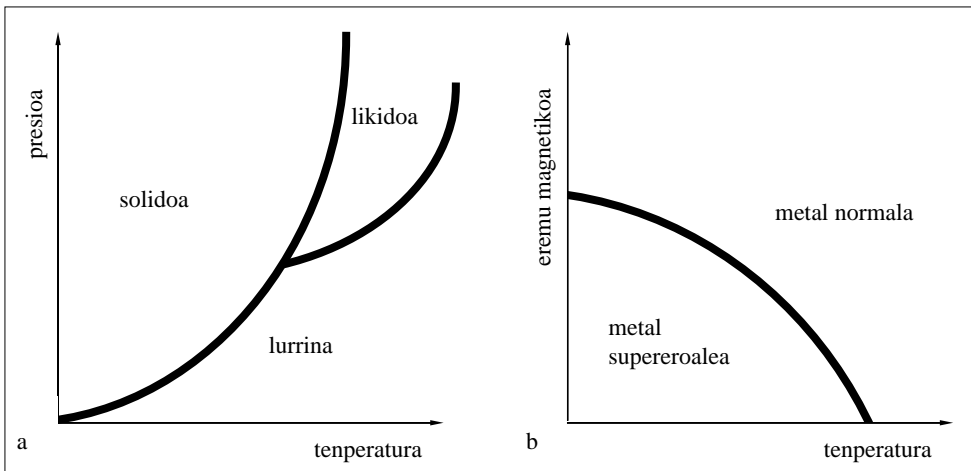
Helio likidoaren tenperaturaren supereroankor diren materialekiko, supereroale zaharrekiko alegia, diferentzia kualitatiboa da, zeren supereroale berriak nitrogeno likidoaren tenperaturaren bait dira supereroale. Nitrogenoaren gas/likido trantsizioa 77Ketan gertatzen da. Gainera nitrogeno likidoa oso ugaria eta esnea bezain merkea da.

SUPEREROANKORTASUNAREN GAKOA

Material supereroaletan gertatzen dena ezagutzeko, materiaren fase-trantsizioak kontutan hartzea oso komenigarria da (ikus errekoadroa). Supereroankortasun-trantsizioa aztertzeke, bertan zein partikula-motak hartzen duen parte jakin behar dugu. Supereroankortasuna metalek agertzen duten ezaugarri bat da, eta erresistentzia elektrikoaren desagerketaz igartzen da. Eroankortasun elektrikoak, metalaren atomoen ar-

tean karga elektrikoaren garraiatze-efektuan datza, elektroioak garratzaile direlarik. Beraz supereroankortasuna elektroimultzoari dagokio. Tenperaturak ez du gauza handirik laguntzen supereroankortasuna gerta dadin; hots, fenomenoaren tenperatura baxuetan bakarrik gertatzen da. Beraz, supereroankortasuna fase-trantsizioa denez gero, egoera elektroniko ordenatuagoaren isladapena da. Entropia gutxiagoko egoeraren trantsizioa, elektroien arteko interakzioen eraginaren ondorioa da. Interakzio hauek materiala tenperatura baxuetan ipintzean agertzen dira betebetan; tenperatura kritikotik beherako tenperaturetan alegia.

Ikusi dugunez supereroankortasun-trantsizioa gerta dadin tenperatura aldagai termodinamiko eraginkorra da. Baina kasu honetan, presioa ez da trantsizio-tenperatura determinatzen duen beste aldagaia.



4. irudia. a) Solido/likido/lurrin-sistemaren fase-diagrama. b) Metal normala/metal supereroale-sistemaren fase-diagrama.

Supereroankortasuna deuseztatu egiten da eremu magnetikoan, baldin nahikoa handia bada. Ereduaren intentsitatea, materialaren temperaturaren menpekoa da, zero absolutuan maximoa da eta zerorantz jotzen du temperatura kritikoan inguru hurbilean. Likido/lurrin trantsizioan presioak jokatzen duen papera eremu magnetikoaren intentsitateak jokatzen du kasu honetan. Horregatik bi aldagai termodinamiko ditugu kasu honetan ere, zeintzuek materialaren supereroankortasuna gobernatzen duten.

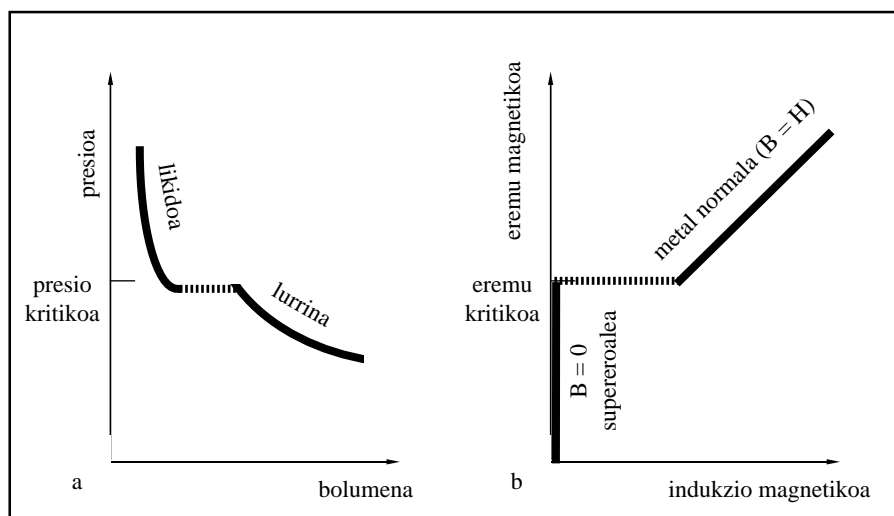
4. irudian fase-diagramak erakusten dira, hots, aldagai termodinamikoaren eremuak eta hauen arabera bakoitzean materiala zein fasetan agertzen zaigun. Solido/likido/lurrin eta metal arrunta/metal supereroale aukeratu ditugu.

Supereroankortasuna determinatzen duten aldagaiak aurkitu baditugu ere, oraindik trantsizio honetan bolumenaren papera zeinek egiten duen geratzen zaigu argitzeko. Esan dugunez supereroankortasunaren kasua termodinamikoki aztertua izan zedin esperimendueta garrantzitsuena Meissner efektua izan zen, hots, supereroaleek eremu magnetikoa

bakoitzari dagokion aldagai-multzoa erabiliz bi trantsizioak erakusten ditugu: presioa eta bolumena likido/lurrinarentzat eta eremu magnetikoa eta indukzio magnetikoa supereroalearentzat. Aldagai hauek aukeraturakoan egoera-ekuazioak temperatura finkatzen du eta horregatik kurba hauei isoterma deritze. Bi trantsizioetan bolumen-eremu bat ageri da, non fase biak batera egon daitezkeen, hots, fase likidoa (ura) eta gaseosoa (lurrina/ura), hau da, irakite-puntua; eta material supereroalea ($B = 0$) material arruntarekin ($B = H$).

Supereroankortasun-trantsizioak gas bat likido-fasera pasatzerakoan antz handia duela ikusi dugu. Supereroankortasunaren kasuan karga elektrikoa garraiatzen duen elektroimultzoa bat kondentsatzen da. Zer esan nahi ote du kondentsatu hitzak kasu honetan? Fase-trantsizioak sistemaren ordenaren aldaketaz deskriba daitezke (ordena hori neurtzen duen parametro batez). Ohizko fase-trantsizioetan, gas/likido trantsizioan esaterako, orden espaziala da aldatzen dena. Likidoa, gasa baino ordenatuagoa dago.

Supereroankortasun-trantsizioan jokoan jartzen den ordena



5. irudia. a) Presio/bolumen-diagramako isoterma. Presio kritikoa lortzen denean, likidoa eta lurrina batera daude (lerro etena). b) H/B-diagramako isoterma. Eremu magnetiko kritikoa lortzen denean, ohizko fasea eta supereroankortasun-fasea batera daude (lerro etena).

kanporatzea. Ereduaren intentsitatea nahikoa txikia denean kanporaketa erabatekoa izan daiteke.

Hala ere, imanak sortzen duen eremu magnetikoa eta materialaren barruko eremu magnetikoa bereiztu egin behar ditugu. Temperatura eta imanaren H eremu magnetikoak finkatutakoan, materialaren barruko (B) ere finkatuta geratzen da. B-ri indukzio magnetiko deritza. Kasu honetan egoera-ekuazioa B, H eta T arteko erlazioa da. Likido/lurrin eta supereroankortasun-trantsizioen arteko antza azpimarratzeko, 5. irudian

5. irudian

erakusten ditugu: presioa eta bolumena likido/lurrinarentzat eta eremu magnetikoa eta indukzio magnetikoa supereroalearentzat. Aldagai hauek aukeraturakoan egoera-ekuazioak temperatura finkatzen du eta horregatik kurba hauei isoterma deritze. Bi trantsizioetan bolumen-eremu bat ageri da, non fase biak batera egon daitezkeen, hots, fase likidoa (ura) eta gaseosoa (lurrina/ura), hau da, irakite-puntua; eta material supereroalea ($B = 0$) material arruntarekin ($B = H$).

Supereroankortasun-trantsizioak gas bat likido-fasera pasatzerakoan antz handia duela ikusi dugu. Supereroankortasunaren kasuan karga elektrikoa garraiatzen duen elektroimultzoa bat kondentsatzen da. Zer esan nahi ote du kondentsatu hitzak kasu honetan? Fase-trantsizioak sistemaren ordenaren aldaketaz deskriba daitezke (ordena hori neurtzen duen parametro batez). Ohizko fase-trantsizioetan, gas/likido trantsizioan esaterako, orden espaziala da aldatzen dena. Likidoa, gasa baino ordenatuagoa dago.

Supereroankortasun-trantsizioan jokoan jartzen den ordena

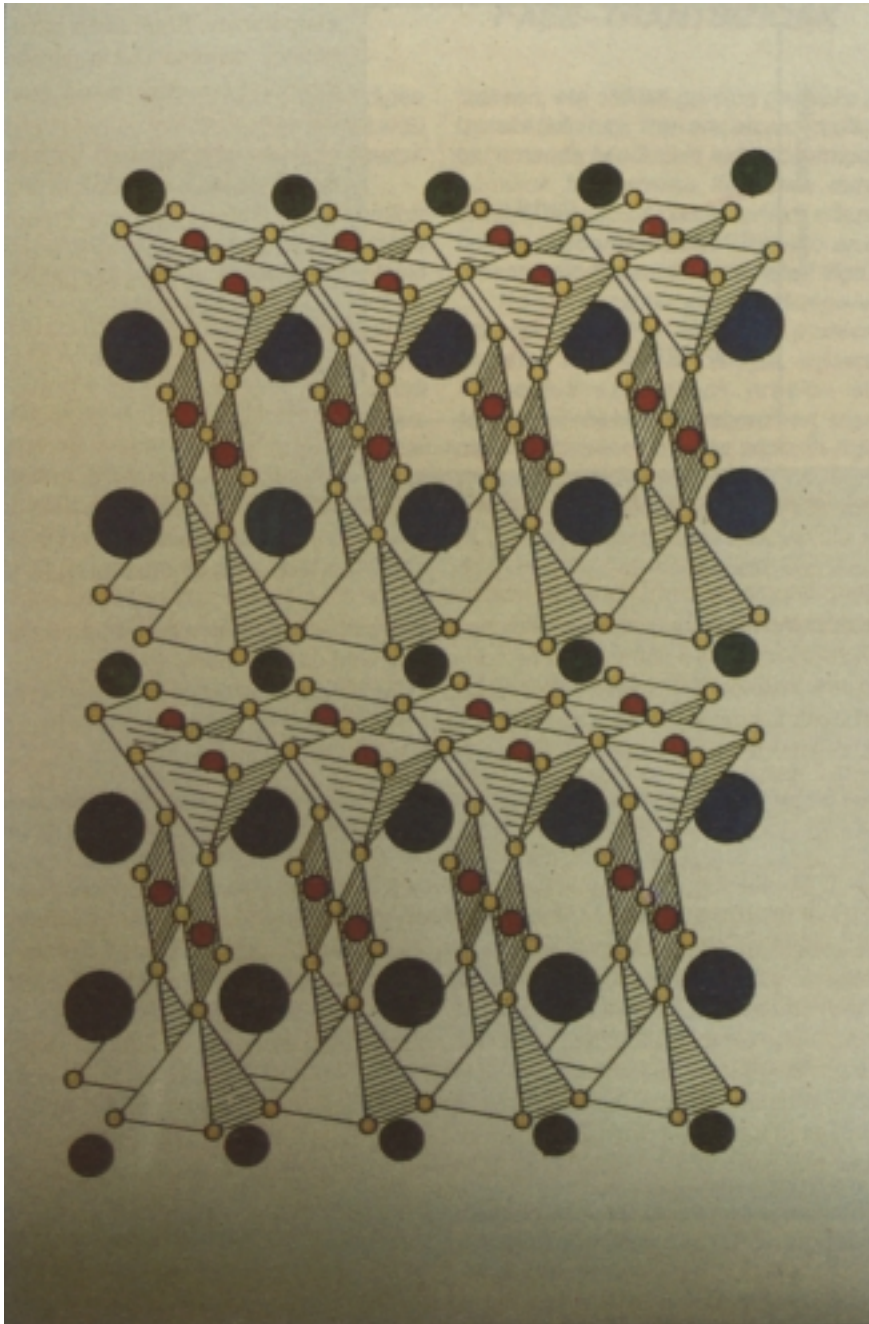
erabat kuantikoa da: garraio-elektroietako batzuk (ehundaka batzuk) egoera kuantiko berdinean kokatzen (kondentsatzen) dira. Baina hau gerta dadin, lehenengo elektroiek oinarriko debekua gainditu behar dute: Pauli-ren eskusio printzipioa, zeinak "bi edozein fermioi¹ (eta elektroiak fermioiak dira) egoera kuantiko berdina ezin dute eduki" esaten duen. Arazo honi aurre egiteko elektroiek binaka jokatzen dute eta horrela bikoteek (Cooper-en bikote deitutakoek), zeintzuk bosoiak² izango bailiran portatzen diren, eskusioa ez dute derri-gorrezkoa.

Beraz, agerian ditugu jadanik supereroankortasunaren bi oinarriak:

- i) bosoiaren tankerako portaera duten elektroibikoteen formazioa eta

1 Fermioia partikula elementalen mota bat da. Elektroia, protoia eta neutroia fermioiak dira. Hauen spina 1/2 edo beronen anizkoitz osoa da.

2 Bosoiak partikula elementaletako mota bat dira. Partikula hauek ez dute Pauliren eskusio-printzipioa betetzen.



Supereroale berrien egitura. ● Itrioa; ● Kobrea; ● Barioa; ● Oxigenoa

ii) egoera kuantiko berdineko bosoi hauen kondentsazioa. Izan ere, partikula-(bikote-)kopuru handi bat egoera kuantiko berdinean egotea da supereroankortasun-propietate bereziak ematen dizkiena. Elektroi-bikote kondentsatuzko multzo hau "likido kuantiko" baten antzera portatzen da, eta horixe da erabat propietate kuantikoak eskala makroskopikoan agertzearen arrazoa.

BCS TEORIA

Teoria honek ohizko materialaren supereroankortasunaren jatorria esplikatzen du eta elektroien portaerarekiko material supereroale eta arrunten arteko ezberdintasuna ere erlazionatzen du, elektroien arteko interakzioak egon daitezkeela (baldintza egokitan) erakutsiz. Honek elektrizitatearen kon-

tzeptu oinarrizkoaren aurka dagoela ematen du; hots, zeinu berdineko bi edozein kargak aldarapen-interakzioa dute. Baina honek, hutseko kargentzat bakarrik balio du. Aurrerago ikusiko dugunez, metalaren barruan bi elektroien artean erakarpen-interakzioa ager dakiguke.

Eman dezagun une batez elektroien artean erakarpen-interkazioak daudela eta ikus dezagun baldintza horietan elektroiak nola portatzen diren. Tenperatura baxuetan, interakzioak garrantzi handiko bilakatzen dira eta elektroiek bikoteak osatzeko joera agertzen dute. Hauetariko bakoitza bi elektroiez osatutako molekulatzat har liteke. Hauek Cooperren bikoteak dira. Beraz, metal arrunt batean elektroiek gas (kuantiko) bat osatzen duten bitartean, supereroalean elektroiek binakako multzoak osatzen dituzte.

Elektroien izaera kuantikoa elektroi-bikoteen gas soila ez izatearen arrazoa da. Fisika kuantikoaren oinarrizko legeek, bikote hauek elkarrekiko independenteki ezin daitezkeela higitu esaten digu. Ondorio harrigarrietariko bat bikote guztiak abiadura berdinez higitu izan beharra da. Supereroankortasun-egoera, egoera koherentea da, non Cooperren bikote guztiak abiadura berdinean bait doaz.

Metal arruntetan korrante elektrikoa elektroi gehienak norabide berdinean doazenean egoten da. Baina elektroi batek ezpurutasun baten aurka egin dezake talka, edo akats baten aurka, edota tenperaturak eragindako desordenaren barruan murgil daiteke. Baina nolana ere, bete-beharreko bat Pauliren printzipioa da; hau da, gehienez ere bi elektroik abiadura berdina eduki dezakete. Demagun metal arrunt batean korrante elektrikoa ari dela pasatzen, eta korrantea sortzen duen eremu

elektrikoa kendu egiten dugula. Orduan elektroien talkek korrantearen fluxu homogenoa deuseztatu egingo lukete eta milaka talken ondoren, batezbesteko elektroien abiadura zero izango litzateke. Korrante elektrikoa mantentzeko eremu elektrikoa behar dugu eduki, zeinak etengabe elektroiak direkzio batean azeleratzen dituen.

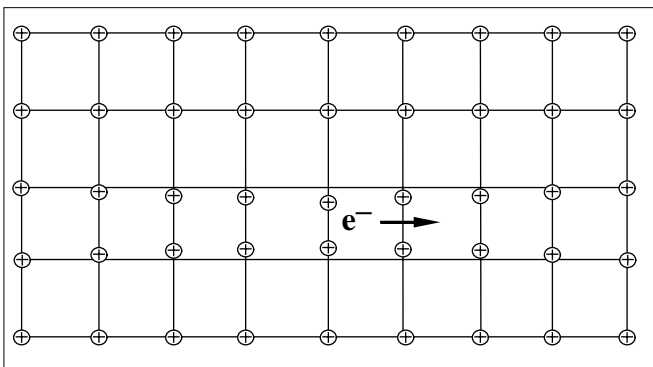
Supereroale batean elektroiek ez dute eskusio-printzipioa bete behar eta denak abiadura berdinean higitzen dira. Korrantea eteteko beraz, edo bikote guztiak bapatean geratu egin behar dira edota bikoteak deuseztatu egin behar dira egoera arruntera pasatuz. Argi dago ezpurutasunen batek, akatsen batek edota atomoen oreka-posizioekiko bibrazioek ezingo dituztela espontaneoki abiadura konkretu horretan doazen milaka trilioi bikote geldi erazi eta energia termikoa bikoteak deuseztatuzko nahikoa ez bada, korrantea etengabe pasatuko da. Materialak

erresistentzia elektrikoa zero izango du orduan.

NOLA ERATZEN DIRA COOPERREN BIKOTEAK?

Beraz argi baino argiago dago erantzun behar dugun funtsezko galdera zein den: bi elektroien artean erakarpenerakzioa, bikote bat eratzeko, nola gerta daiteke?.

Horretarako gogora dezagun metalek ioiez (karga positibodunak) eta elektroiez (karga negatibodunak) daudela osatuta. Ioien kokapenak geometria konkretu bat ematen du, eta kristal-sare deritzo. Elektroiak ioien artean higitzen dira, eta sare osoan zehar higitzen direnei garraio-elektroi deritze. Elektroiek eta ioiek aurkako karga elektrikoak dituztenez gero, elkarrenganako joera agertzen dute. Izan ere elektroiak sarean



6. irudia. Ioi positiboak kristal-sarean elektroia bere karga negatiboaz igoz gero, ioiak beren ohiko posizioetatik desplazatu egiten dira. Efectu hori elektroiek artean erakarpenerakzioak agertzearekin lotua dago. Indar horiek Cooper pareak sortzen dituzte; BCS teoriak supereroankortasunaz ematen duen esplikaziorako funtsezko elementuak.

zehar higitzen direnean ioiak bereganatzen dituzte, beren oreka-posizioetatik pixkat aldentu eraziz. Hauek (ioiak) elektroiak baino pisu handiagoko partikulak dira, eta ondorioz inertzia handiagoa daukate (6. irudia). Horregatik ioia bere oreka-posizioetik aldentu erazi duen elektroia urrun izanik ere, denbora-apur bat beharko du ioiak jatorrizko oreka-posizioa itzultzeko. Begibistakoa daukagu beraz, elektroia sarean zehar doanean bere hatz propioa utziz doala, ioiak oreka-posizioetatik aldentuz. Orduan beste edozein elektroik sarea deformatuta aurkituko du, eta ioi-dentsitatea handiago den tokietara joango da (gogora elektroiek eta ioien arteko erakarpenera), lehenengo elektroiak utzitako hatzaren atzetik. Lehenengoak bigarrenaren duen eragina, bigarrenak lehenean duenaren berbera da. Emaizta azkenik, elektroiek bien artean erakarpenerakzioa egotearen berdina da. Kristal-sarearen kausaz sortzen da interakzio hau eta elektroiek bikoteak eratzeko gauza da. Interakzio hauek nagusi direnean, materialak supereroankortasuna agertzen du.

Ehundaka esperimenterik baiezatu du teoria hau ohiko supereroaletan. Baina esan dugunez,

material supereroale berrietan supereroankortasunaren jatorria besteren bat izatea ezin daiteke baztertu.

Kontutan hartu gainera kristal-sarean eragindako deformazioak oso txikiak direla, eta gradu edo gradu-hamarren batzuetako tenperatura igoera nahikoa izan daitekeela elektroiek bikoteak deuseztatzen.

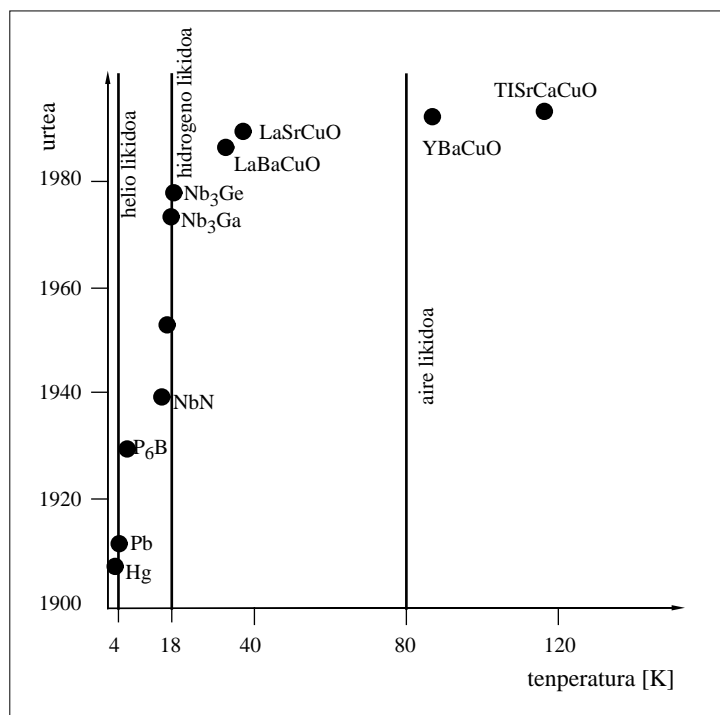
SUPEREROANKORTASUN BERRIA

Supereroankortasun berria esplikatzeko fisikari teorikoek azaldu dituzten proposamenak, bitan sailka daitezke: erabat supereroankortasun berria da, edota BCS teoriak proposatutakoaren antzeko egoeraren bat da, non elektroien arteko erakarpenerakzioen jatorria bestelakoa den. Azken proposamen honen ildotik egindako zenbait kalkuluren arabera, interakzio magnetikoek (eta baita karga-transferentziak ere) sarearen ioien posizio-aldaketek eragindakoak baino erakarpenerakzio gogorragoak eragin ditzakete, eta ondorioz interakzio horiek hausteko tenperatura handiagoak beharko liratekeela frogatu izan da.

Teoriko gehienek supereroankortasun berriaren muinean elektroien bikotekako antolaketa bat egongo dela uste dute, fermioi negatiboaren antagonismoa gainditzeko erarik logikoena hau delako. Beste era batera esanda, BCS teoriaren elektroien bikotekako antolaketaren modifikazio txikiren batekin tenperatura altuko supereroankortasuna esplikatzeko gauza izango litzateke. Eztabaida, elektroiek bikoteak elkarrekin mantentzen duen mekanismoa argitzean datza. Seguraski ez da elektroiek/fonoi interakzioa bakarrik izango, honek oxidoen tenperatura kritikotik bikoteak elkartuta oso energia gutxi duelako. Duela gutxi efektu isotopikoa neurtzeko egindako esperientzia batzuen emaitzak, fonoiak garrantzi handia duela dioten ideien aurka daude. AT&T Bell-en Murray Hill (New Jersey, EEBB) laborategietan eta Kaliforniako Berkeleyko Unibertsitatean ikerkizailerik oxigeno arrunta (zeinak zortzi neutroi dituen), bere isotopo batez (zeinak 10 neutroi dituen) itriobario-kobrezko oxido batean ordezkatu zuten. BCS teoriaren arabera masa atomikoa handitzean, hots, sarearen bibrazioak motzagoak direnean, tenperatura kritikoa murriztu egingo litzateke. Hala ere, isotopo astunak dituzten supereroalek ia tenperatura berdinean agertzen dute supereroankortasuna.



7. irudia. Supereroale desberdinen temperatura kritikoak eta aurkitu zireneko urteak. Likido kriogeniko desberdinen irakite-tenperaturak adierazten dira erreferentzi gisa.



Elektroiak elkarrekin bikoteka mantentzen dituztenak fonoiak ez badira, zeintzuek egiten dute lan hori?. Posibilitateetako bat karga elektronikoa bera izatea da. Posibilitate hau (karga negatiboen arteko interakzioa aldarapenezkoa bait da) dirudiena baino itxaropenetsuagoa da, nahiz argudioa korapilotsua izan. BCS teorian lehenengo elektroiak sare ionikoa polarizatzen du, eta honek erakartzen du bigarren elektroia. Era berean karga elektronikoa banaketa bera ere polariza daiteke. Hipotesi honen arabera, karga-fluktuazioak (energi mailen arteko elektroien fluxuak) partikula berriak sortertzatzen ditu, eszitoiak alegia, zeintzuk fonoiak bezala elektroiak bikoteka antolatzen gaitzen. Eszitoiek fonoiak baino frekuentzia handiagoak dituzte. Beraz Cooperren bikoteak egongo lirakeke temperatura altuagoetan ere.

Temperatura altuko supereroankortasuna lortzeko beste modu bat, spinaren bitarteko interakzio magnetikoen bidez da. Modu honek ere polarizazioa dagoela esan nahi du. Elektroi bat sarean zehar doanean bere spinak seinale magnetiko bat sortzen du, zeinak beste elektroiak erakartzen dituen. Efektu honek supereroankortasuna sor dezan, elektroi batzuek atomo espezifiko batzuei erabat lotuta egon behar dute, beraien spin-orientazioak iraunkorrak izan daitezten, eta era berean nahikoa aske izan behar dute magnetizatzen, edota talde-berrorientazioak eragin ditzaten.

Kobre-oxidoek duten portaerak, ideia hau konfirmatzen du. Puru daudenean antiferromagnetikoak dira, hau da, spin elektronikoen eta ondorioz elementu magnetikoen atomo bategatik bestera txandakatu dira, eta isolatzaile erara jokatzen dute. Kanpoko geruzetako elektroiak ez dute solidoan zehar higitzeko askatasunik. Elektroiak gehitu edo kendu zaizkiernean bakarrik, (hori elektroi gehiegi duten atomoen kutsatuz egiten da) antiferromagnetismoa deuseztatu egiten da, materiala eroale bihurtzen delarik. Nahikoa hozten baldin badira, supereroankortasuna dute. Prozesu honetan elektroiak, eta ondorioz beraien spinak, atomoekin duten erlazio estuaz askatu egiten direla pentsatzen da. Akoplamenduaren zenbait teoriak, hala ere, spinak era batera edo bestera atomo espezifikoetara atxekita mantentzen ditu, horrela talde-berrorientazioak egiteko gaitasuna ere mantentzen dutelarik. Honek ematen dituen fluktuazio magnetikoen, elektroiak Cooperren bikote moduan antolatzen ditu, supereroalean zehar.

Gaur egun ez dago datu esperimental aski mekanismoren bat edo bestea baieztatzen. Oxido hauen (7. irudia) propietateen ikerketa sakonak nola portatzen diren erakutsiko liguken, eta era berean giro-tenperaturako supereroankortasunerantz bide berri bat zabalduko luke: Aro berri bat.

APLIKAZIOAK

Supereroale berrien aplikazioak, gutxienez ohizko supereroaleenak dira, baina askoz ere merkeagoak. Bestalde, lehen pentsa ezinezko ziren produktu batzuk orain bideragarri izan daitezkeenaren itxaropena zabaldu da.

Adibidez:

- i) Energia elektrikoaren produkzio, garrario eta metaketa
- ii) Gailu elektronikoen bizkorrak
- iii) Ordenadoreak
- iv) Irudi magnetikoa medikuntzan
- v) Eredu magnetiko handiak, zeintzuek fusio nuklearraren arazoan perspektiba berriak irekitzen dituzten.

Behar bada aplikazio posibleen deskribapen zehatza baino garrantzitsuagoa gerorako aplikazioak sumatu ezina da. Transistorearen aplikaziorik garrantzitsuena diodoak ordezkatzeko izango zela pentsatu zen, baina inork ez zuen orduan zirkuitu integratuek pentsatu. Urtetan LASERa "arazo baten bila zebilen soluzioa" zela kontsideratu zen, eta orain teknologia eta kultura modernoaren parte da. Supereroankortasunak ere pentsaezinezko alaketak ekar diezazkiguke, baina begibistan daudenekin bakarrik (baldin behar den potentzial teknologikoa gauzatzea lortzen bada) aldeketa kultural eta sozial handiaren aurrean geundeekeela esan genezake. Orain soma daitezkeen temperatura altuko supereroaleen aukera onenak erdieroaleen teknologiarik harremanetatik etorriko lirakekeenak dira. Higitkortasun handiko silizio edota galio-arsenikoan oinarritutako trantsizioak nitrogeno likidoaren temperaturan egiteko oso aproposak dira. Hots, orain badago tenperatur tarte bat, non erdieroale/supereroale teknologia koka daitezkeen. Konbinaziorik sinpleena sare supereroaleak txiparen elementuen artean eta txipen artean seinaleak garraiatzeko ipintzea izango litzaiteke. ☺