

Supereroankortasuna GORI-GORI

**Badira ehun urte
supereroankortasuna
ezagutzen dela, baina
oraindik ere fisikariek ez dute
ongi ulertzea lortu;
benetako erronka da hori.
Eta giro-tenperaturako
supereroankortasuna, berriz,
ametsa. Hala ere, azken
hilabeteetan pauso bat
gehiago eman dute, oraindik
urrun dagoen ametserantz.**

Ekainaren bukaeran etorri zen falta zen froga, benetako supereroankortasuna zela erakusten zuen froga. Eta horrek baieztatu zuen supereroankortasuna lortu zutela, inoizko tenperatura altuenean; aurreko altuena baino ia 40 gradu gehiagotan, alajaina. 30 urteko epelaldiaren ondoren, supereroankortasunaren gaia gori-gori jarri zen berriz ere.

Iazko abenduan hasi zen gaia berotzen, Max Planckeko hiru ikertzailek [arXiv-en argitaratu zutenean](#) hidrogeno sulfuroa, presio handian jarrita, supereroale zela 190 K-ean ($-83\text{ }^{\circ}\text{C}$). 1986an tenperatura altuko supereroaleak aurkitu zirenetik egindako aurkikuntza handiena zen. Komunitate zientifikoak zuhurtziaz hartu zuen berria. Lehen esperimendu hartan erresistentzia elektrikoa desagertzen zela ikusi zuten, baina ez zuten frogatzerik izan supereroankortasunaren bigarren ezaugarria: eremu magnetiko bat kanporatzea (Meissner efektua).

Max Planckeko ikertzaileak, Mainzeko Unibertsitateko beste bi fisikarirekin elkartu, eta Meissner efektua behatzeko bigarren esperimendu bat prestatzeari ekin zioten. Eta ekainean etorri zen [emaitza](#): Meissner efektua ere hortxe zegoen. Eta, kasu horretan, supereroankortasuna 203 K-ean ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$) lortu zuten. Gainera, Japonia-ko talde bati utzi zioten euren lagina, eta haiek ere baieztatu zuten supereroankortasuna.

Orain, [Nature aldizkarian argitaratu dituzte emaitzak](#); horrek baieztatzen du, beraz, frogak sendoak direla. Dena den, fisikari teorikoak abenduan emaitzak atera orduko hasi ziren esperimendu hartan gertatutakoa ulertu nahian. Horietako bat izan zen Ion Errea Lope donostiarra. “Supereroankortasuna eta presio altua beti izan dira nire gaiak” dio Erreak. Tesia horretan egin zuen, eta, gero, Parisko Pierre eta Marie Curie Unibertsitatean metodo konputazional bat

garatu zuen, orain ezin hobeki datorkiona Max Planckekoen esperimendua azaltzeko: “emaitzak ikusi genituenean, pentsatu genuen guk bagenuela tresna teoriko on bat problema honi aurre egiteko; eta hala suertatu da”. Apirilean argitaratu zuten Erreak eta kideek [euren lana](#), *Physical Review Letters* aldizkarian.

ERRONKA HANDIA

“Fisikan daukagun erronkarik handienetako bat” da, Errearentzat, supereroankortasuna. Eta erronka bikoitza da: batetik, erronka praktikoa da giro-tenperaturaren lortzea, eta, bestetik, erronka teorikoa dago, supereroankortasuna ongi ulertzea, alegia. “Erronka teorikoa izugarria da. Pentsa, ehun urtetik gora pasa dira topatu zenetik, eta oraindik ez dugu azalpen oso bat. Horrek erakusten du zein konplexua den; oso gauza berezia da”.

1911n Heike Kamerlingh Onnes herbeheretarrak aurkitu zuen, lehenengoz, fenomeno berezi hori. Hiru urte lehenago helioa likidotzea lortu zuen, eta horrek tenperatura baxuko fisikaren atea ireki zituen. Helioarekin esperimenduak egiten ari zela, zur eta lur gelditu zen ikusi zuenean merkurioa 4,19 K-ean jartzean ($-268,96\text{ }^{\circ}\text{C}$) erresistentzia elektrikoa ia zerora jaisten zela, bat-batean. Eta 4,20 K-era igotzean, berriz agertzen zen materialaren erresistentzia. *Supraeroankortasun* deitu zion Onnesek, eta handik bi urtera Fisikako Nobel saria eman zioten.

Ia mende erdi bat behar izan zen fenomeno harriarri hari azalpen bat aurkitzeko. Argi dago, beraz, ez dela kontu erraza. Sistemako osagaiak ongi ezagutzen dituzte fisikariek: “elektroi batzuk eta ioi batzuk (nukleo atomikoak) elkarrekintza coulombdarrean, ez da beste ezer” azaltzen du Erreak. Baina, kontua da elektroi eta ioi asko direla. “Materia gramo batean 10^{23} atomo inguru daude. Hainbeste elektroi eta ioi dira,

Supereroale baten gainean iman bat lebitatzen. Supereroankortasunaren ezaugarrietako bat da eremu magnetiko indartsu bat kanporatzea (Meissner efektua). ARG.: JULIEN BOBROFF, FREDERIC BOUQUET, JEFFREY QUILLIAM, LPS, ORSAY, FRANTZIA/CC-BY-SA 3.0.



ezen oso fenomeno kolektibo bereziak gertatzen baitira. Fenomeno horiek azaltzeko elektroi eta ioi askoren elkarrekintza deskribatu behar dugu, eta hori oso zaila da. Fenomeno arraroak dira, aurrez espero ez ditugunak, eta konplexutasun horren adierazle handiena da supereroankortasuna”.

John Bardeenek, Leon Cooperrek eta Robert Schriefferrek eman zuten azalpena 1957an; BCS teoria. Eta 1972an jaso zuten Fisikako Nobel saria. “BCS teoria oso onartua dago. Ondo azaltzen du merkurioa, aluminioa eta halako metaletan behatutako supereroankortasuna” dio Erreak. “Teoria elektroi-fonoi elkarrekintzan oinarritzen da. Fonoiak dira atomoen oszilazioen kuantuak, alegia, azken batean, atomoen bibrazioen energia (atomoak ez baitaude inoiz gelditi). BCS teoriak dio elektroi-fonoi elkarrekintzaren bidez elektroi-bikoteak osa daitezkeela”. Elektroiek, berez, elkar alderatzen dute elkarrekintza coulombdarragatik (karga negatiboa dutelako), baina, fonoiaren eraginez, gerta daiteke elektroiek elkar erakartzea eta bikoteak osatzea: Cooper pareak. Eta Cooper pareek korrante elektrikoa garraiatu dezakete inolako galerarik gabe, hau da, erresistentziarik gabe.

“Kontua da teoria hori oso erabilgarria izan dela metal askoren supereroankortasuna ulertzeko, baina 1980ko hamarkadan aurkitu ziren tenperatura altuko supereroaleak ezin ditugu inondik ere azaldu teoria horren bidez”, argitu du Erreak.

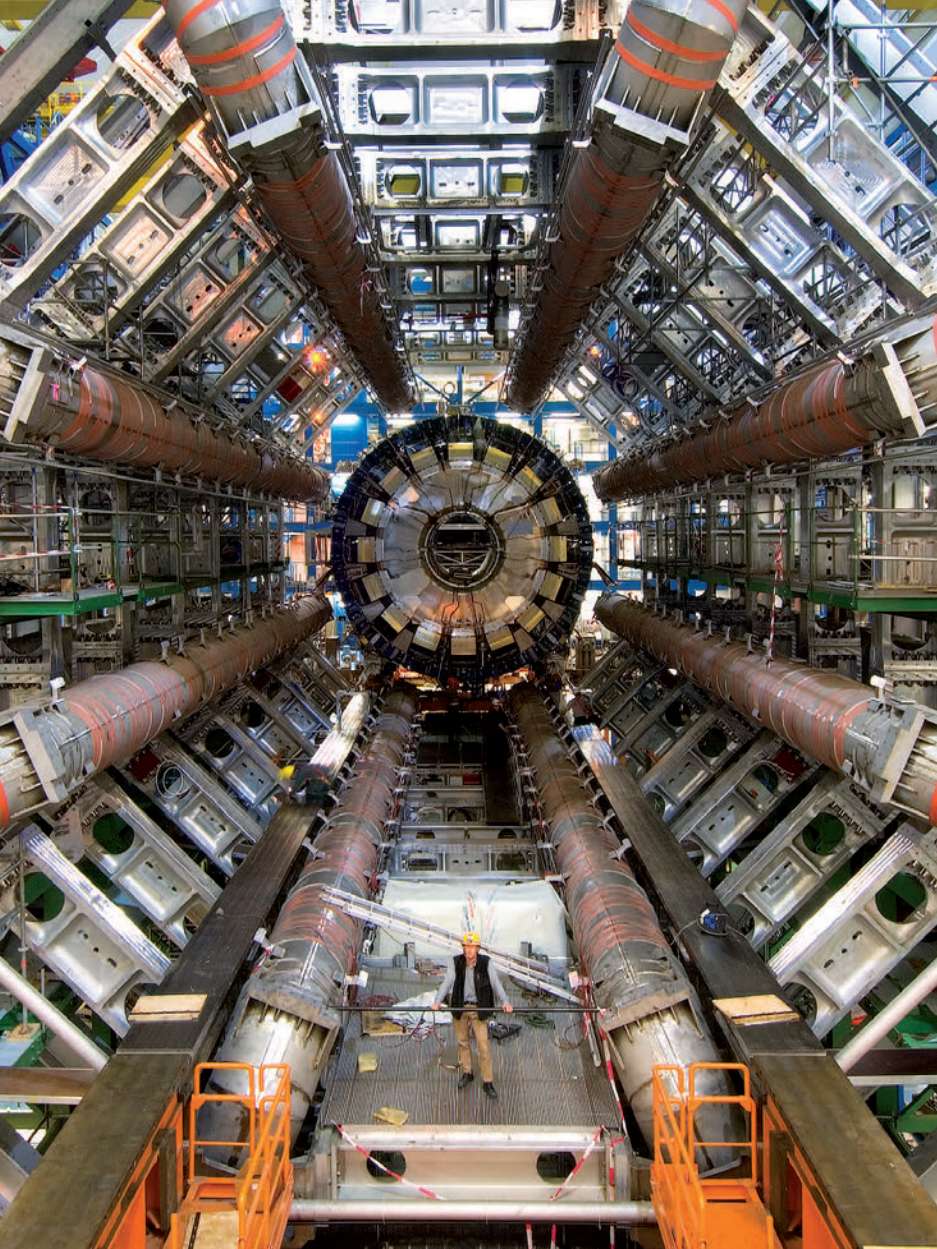
1986an, J. Georg Bednorzek eta K. Alex. Muellerrek lehen tenperatura altuko supereroaleak (35 K, $-238\text{ }^{\circ}\text{C}$) aurkitu zituzten. Hurrengo urtean bertan eman zieten Fisikako Nobel saria. Baina, “pasa dira 30 urte, eta oraindik ez daukagu teoriarik supereroale horiek azaltzeko” azpimarratu du Erreak. “Badaude hainbat proposamen: batzuek proposatzen dute, fonoiak izan beharrean, spinen fluktuazioa izan daitekeela aklamendua eragiten duena; beste batzuek oraindik esaten dute fonoiak zerikusia izan dezaketela; eta abar. Baina ez dakigu. Hori argitzen duena Stockholmera doa zuzenean!”.

TENPERATURA ALTURAKO SALTOA

1986koa sorpresa handia izan zen. Batetik, ez zen espero kupratoen gisako materialetan supereroankortasuna aurkitzerik, eta, bestetik, tenperatura-igoera handia zen. Hasierakoa 35 K-ean izan bazen ere ($-238\text{ }^{\circ}\text{C}$), berehala lortu zuten 90 K-era igoetzea ($-183\text{ }^{\circ}\text{C}$), eta gero baita gehia-



Ion Errea Lope, Donostia International Physics Center-eko ikertzailea, eta EHUko Fisika Aplikatuko Saileko irakaslea.




LHC azeleragailuaren ATLAS detektagailua. Zortzi hodi horietan daude inoiz egin diren iman supereroale handienak. ARG.: © CERN.

gora ere; kupratoekin lortu den temperatura altuena 133 K da ($-140\text{ }^\circ\text{C}$), giro-presioan, eta 164 K ($-109\text{ }^\circ\text{C}$), presio altuan. “Kontuan izanda metal arruntekin lortutako altuenak 10-20 K direla, temperatura oso altuak dira”, konparatu du Erreak. Gainera, nitrogenuko likidoaren tenperaturaren sartzen dira (77 K , $-196\text{ }^\circ\text{C}$). “Nitrogeno likidoa sortzea nahiko erraza da gaur egun, eta nitrogeno likidoa erabiliz material horiek supereroale bihurtzeko. Hori abantaila handia da”.

“Arazoa da kuprato horiek oso material konplexuak direla, eta ez dela erraza haiekin lan egitea. Orain, ordea, marka berria oso konposatu arrunt batekin lortu dute, hidrogeno sulfuroarekin (H_2S)”. Giro-tenperaturaren arrautza ustelen usaina duen gasa da; besteak beste, sumendietan eta gas naturalean dago, eta bakterioek ere sortzen dute, materia organikoa oxigenorik gabe deskonposatzean. Presio oso altuan jartzean,

ordea, gas arrunt hori metal bihurtzen da, eta, orain erakutsi dutenez, metal hori supereroalea da oso tenperatura altuan.

“Aurkikuntza hau 1986koa bezain iraultzailea izan daiteke, batetik, inoiz neurtu den supereroankortasun-tenperatura altuena delako; eta, bestetik, kasu honetan, supereroankortasuna elektroifonoi elkarrekintzagatik gertatzen delako”, azaldu du Erreak. “Hau da, BCS teoria baliagarria da hau azaltzeko. Jendeak itxaropena guztiz galduta zuen elektroifonoi supereroalekin tenperatura altuak lortzeko. Pentsa, genuen elektroifonoi supereroale onena magnesio diboruroa zen (2002an aurkitua), eta 40 K ($-230\text{ }^\circ\text{C}$) behar zituen. Eta orain, bat-batean, 200 K -era ($-70\text{ }^\circ\text{C}$) igo gara! Arazoa da presio oso altua behar dela, baina, agian, erakutsiko digu zein den bidea material supereroale hobeak lortzeko. Orain badakigu agian elektroifonoi supereroale oso onak topa ditzakegula. Nire ustez, hori da garrantzitsua”.

 “Teknologia garatzen bada, gaur dauden supereroaleei ere has gaitzeko aplikazio gehiago ematen”

IRAGARPEN TEORIKOAK

Berez, aspalditik zegoen iragarrita hidrogeno askoko sistema bat tenperatura altuko supereroale izan zitekeela presio altuan. 1968an proposatu zuen Neil Ashcroft fisikariak [artikulu motz batean](#). Eta 2014ean, Yinwei Li eta kideek [iragarri zuten](#) zehazki hidrogeno sulfuroa presio altuan supereroale izan zitekeela 80 K -etik gora ($-193\text{ }^\circ\text{C}$). “Horrek frogatzen du kalkulu teorikoek badutela gaitasuna supereroale berriak aurreratzeko, eta hori oso interesgarria da” zehaztu du Erreak.

Eta badira iragarpen gehiago ere. “Presio altuan, hidrogeno askoko konposatuetan tenperatura oso altuak iragarriak daude, baina hau da lehenengo froga esperimentalak. Dena den, nik uste dut itxaropena izan dezakegula laster neurtuko dutela giro-tenperaturako supereroankortasuna, presio oso altuan bada ere. Gero, presio oso altuan ikasten ari garen hau guztia erabilgarria izango ote den giro-presioan supereroale den material bat lortzeko, hori ez dakit; agian, gehiegi esatea da, baina batek daki. Edonola ere, esfortzua merezi du”.

Izan ere, giro-tenperaturako supereroaleek izan ditzaketan aplikazioak garrantzitsuak izan litezke. Bistakoena, agian, elektrizitatearen garrarioa da. Gaur egun, kableen bidez garraiatzen den elektrizitatearen % 8-15 bero moduan galtzen da, erresistentziagatik. “Kable supereroaleak izango bagenitu, ez genuke galerarik izango —azaldu du Erreak—; horrek eragin izugarria izango luke”.

Dena den, dagoeneko badago supereroaleen industria bat. Iman oso ahaltuak egiteko balio dute, eta iman horiek erabiltzen dira, esaterako, ospitaleetan, erresonantzia magnetikoaren bidezko irudiak izateko, edo partikula-azeleragailuetan, partikulak hainbeste azeleratu ahal izateko. Lebitatzen duten trenak (*maglev* trenak) egiteko ere aproposak dira iman horiek. Japonian proba-fasean daude tren horiek, eta, haietako batek [apirilean apurtu zuen trenen abiadura-errekorra](#), 603 km/h hartuta.

Argindarra garraiatzeko kable supereroaleekin ere dagoeneko eman dira lehenengo pausoak. New Yorken jarrita daude leku pare batean, eta orain arteko luzeena, kilometro batekoa, [iaz ja-ri zuten](#), Alemaniako Essen hirian.

Baina, Erreak dioten moduan, “seguru aurrean ditzakegunak baino askoz interesgarriagoak dira etor litezkeenak. Laserra garatu zuenari ere ez zitzaion burutik pasa ere egingo noizbait begiak operatzeko erabiliko zenik”. Eta, agian, horretarako ez dugu giro-tenperaturako supereroaleen zain egon beharrik. “Teknologia gara-



Efektu ez-harmonikoak

[Ion Erreak eta kideek egindako kalkuluek](#) baieztatu dute elektroifonoi elkarrekin-tzarekin azal daitekeela hidrogeno sulfuroaren supereroankortasuna. Eta ikusi dute, ongi azaltzeko, ohiko hurbilketa harmonikoa ez dela nahikoa.

Supereroankortasunaren tenperatura teorikoki kalkulatzeko, elektroiak eta fonoiak (atomoen bibrazioak) nolakoak diren deskribatu behar da, eta gero elkarren arteko elkarrekintza kalkulatu. “Guk ikusi dugu oso garrantzitsua dela fonoiaren edo bibrazioaren kasuan hurbilketa harmonikotik harago joatea” azaldu du Erreak. Hurbilketa harmonikoan Hookeren legea

hartzen da kontuan: partikula bat oreka-posiziotik desplazatzean, jasotzen duen indarra desplazamendurekiko lineala da. Bada, hori ez da gertatzen kasu honetan.

“Kasu honetan hidrogenoa dugu. Hidrogenoa oso arina da, eta espero daiteke oso oszilazio handiak egotea oreka-posiziotik. Eta oszilazioak oso handiak direnean, efektu ez-harmonikoak garrantzitsuak izan daitezke. Guk tresna onak ditugu efektu ez-harmoniko horiek ongi kalkulatzeko, eta ikusi dugu beharrezkoa dela hori, sistema honi azalpena emateko. Hori izan da gure benetako ekarpena”.

tzen bada, eta gauzak merkeago egitea lortzen bada, gaur dauden supereroaleei ere has gaitezke aplikazio gehiago ematen. Uste dut, dagoeneko dakigunarekin, teknologia asko garatzeko aukera dagoela”.

Hala eta guztiz ere, fisikari donostiarrak argi du zein den hurrengo erronka nagusia: “erronka handiena da kupratoen supereroankortasunaren mekanismo teorikoa azaltzea. Bide hori ez dago agortuta inondik ere. Izan ere, azalpena emango bagenio, ulertuko genuke, agian, nola handitu tenperatura. Horregatik, interes handia du horrek. Jende asko saiatu da hori azaltzen, eta porrot egin dute. Baina noizbait iritsiko da; ez dakit noiz, baina iritsiko da”.

Japoniako *SC Maglev* trenak iman supereroaleei esker lebitatzen du. Honelako tren batek apirilean hautsi zuen trenen abiadura-errekorra, 603 km/h hartuta. ARG.: STEVE KWAK, MARYLAND GOVERNORS OFFICE/CC-BY-ND 3.0.

