SUPERREROALEAK ZERTAN DIRA?

Jon Otaolaurretxi

Azken bost urteotan ikerketa-laborategietan saio ugari eginagatik eta milaka ikerlan argitaratu arren, superreroaleen oinarrizko fisika ez dugu oraindik behar bezain ongi ezagutzen. Hala ere material hauek intentsitate handiko korronte elektrikoek zeharkatu dituzte jadanik.

Fenomenoaren aurkikuntza

Superreroankortasuna 1911. urtean Heike Kamerlingh Onnes fisikari holandarrak aurkitutako fenomenoa da. Merkuriozko lagin bat 4 gradu Kelvineraino (–273,16 °C da 0 K-eko tenperatura) hoztu zuenean, materialaren erresistentzia elektrikoa bapatean desagertu egin zela konturatu zen. Beste era batera esanda, merkurioa 4 K baino tenperatura handiagotan ohizko beste edozein eroale elektriko bezalakoa da, baina 4 K-eko "tenperatura kritikotik" behera jaisten denean, korronte elektrikoa iragateari ez dio inolako oztoporik jartzen: *superreroalea* dela esaten da.

Geroztik fenomeno bera lortu zuten beste metal batzuekin ere. Berunak adibidez, 7,2 K-eko tenperatura kritikoa du, eztainuak 3,7 K-ekoa, niobioak 9,2koa, etab. 1950.eko hamarkadaz geroztik, aleazio metalikoetan ere lortu dute superreroankortasuna: Nb_3Sn aleazioan (18 K) eta Nb_3Ge aleazioan (23 K) esate baterako.

Kontutan hartu behar da ordea, tenperatura baxuetan material guztiak ez direla superreroale. Kobrea adibidez, giro-tenperaturan eroale ona izanagatik guztiz tenperatura txikitan ere ez da superreroale eta gauza bera gertatzen zaie ia isolatzaile eta erdieroale guztiei.

Superreroankortasuna azken aldian

Mende hasieran fenomenoa aurkitu ondoren, fisikariek horri buruzko lehen teoria osoa 1957. urtean plazaratu zuten. Lehen aplikazioa berriz, 1960.eko hamarkadan lortu zen, intentsitate handiko eremu magnetikoak sortzen zituzten superreroalezko imanetan (gaur egun teknologia aurreratuko aparatu askotan erabiltzen dira; erresonantzia magnetikozko makinetan, partikula-azeleradoreetan, etab.etan).

1986. urtean berriz, oso tenperatura baxuak lortu beharra alde batera utzi zen. Ordurarte tenperatura kritikorik altuena 23 K-ekoa bazen ere, muga 125 K ingururaino igota egoera asko aldatu da. Horregatik 1986. urteaz gero laborategietan halako ikerketa-sukarrak hartu du superreroankortasunean ari den jendea, elektrizitatea metatzeko sistema, lebitazio magnetikozko trena, superreroalezko ordenadorea, etab. lortu nahian. 18.000 zientzilan baino gehiago plazaratu da azken sei urteotan arlo honen inguruan.

Superreroankortasunari buruzko teoria

1957. urtean John Bardeen, Leon Cooper eta John Schrieffer iparramerikarrek fenomeno osoari buruzko teoria bat argitaratu zuten; "BCS" izeneko teoria, hain zuzen.

Teoriaren edukina erakusteko eta superreroaleari gertatzen zaiona ulertzeko, inguruneaz zerbait esan dezagun. Beste edozein materia bezala, solidoa atomoz osatuta dago eta atomoak nukleoa du, inguruan biraka elektroiak dabilzkiola.

Kobre-atomo baten nukleoak adibidez, 29 protoi (edo karga elektriko positibo) ditu eta horrez gain 34 edo 36 neutroi, isotopo-motaren arabera. Kobre-atomo isolatu batean, 29 elektroi (edo karga elektriko negatibo) geruzatan banatuta biraka ari dira nukleoaren inguruan. Atomoa oro har, elektrikoki neutroa da berez, elektroi adina protoi dituelako.

Kobre arrunteko lagin batean ordea, atomoek berezitasunak dituzte. Batetik elkarren ondoan erregularki lerrokatuta daude kristal-sarea osatuz, eta bestetik atomo bakoitza ionizatuta dago, hau da, bere elektroietako bat deslekuratuta dago sarean. Gainera solte dauden elektroi horiek tutu baten

Lebitazio magnetikoa. Japoniako ISTEC institutuko Tanaka lehendakaria superreroaleek lurretik zentimetro bat altxatu dute; plataforma eta guzti 120 kg.

barruan fluidoak bezala libre zirkula dezakete. Horregatik material hau pila edo alternadorearen borneetara konektatzen bada, elektroi-multzo hori martxan hasten da korronte elektrikoa sortuz.

Eroale arruntean elektroien iragateari zehatz-mehatz begiratzen bazaio ordea, elektroi bakoitzak portaera indibiduala duela ikusten da. Bakoitza bere bidea egiten ari den bitartean, kristal-sareko ioiekin talka egin eta igurtzi egiten ditu. Horrela bere energiaren zatitxo bat galdu eta beroa botatzen du. Eskala makroskopikoan materialak korrontearen iragateari erresistentzia kontrajartzen diola esaten da.

Superreroalean berriz, erresistentzia hori desagertu egiten da elektroiek banakako portaera galdu egiten dutelako. Bakoitzak, desplazatzen denean sareko ioi positiboak erakartzen ditu eta hauek era berean beste elektroi bati. Bi elektroien arteko lotura horrek, elektroi-bikoteak sortzen ditu, zeintzuk oso tenperatura baxutan ezin bait dira hautsi. Bikoteko bi elektroiak batera doaz, nahiz eta bien arteko distantzia nahikoa handia izan (milaka angströmekoa; angströma = 10^{-10} m). Material superreroaleko leku batean gainera, milioika elektroi-bikote egoten dira.

Emaitza ordea, harrigarria da. Superreroalean korronte elektrikoa ez dute elektroiek osatzen; elektroi-bikoteek baizik. Funtsezko desberdintasuna da hori, zeren eta objektu horien portaera kuantikoak ez bait dira berdinak. Bikoteak talde-egoera berean bildu egin daitezke fluido superreroalearen moduko bat osatuz, bertan banakako elektroien talka eta oztopoak ez daudelarik.

Bardeen, Cooper eta Schrieffer-ek irudi sinple hau bi etapatan eman dute solidoen fisikako hizkuntza matematikoan. Lehen etapan kristal-sarearekin elkarrekintzan elektroi-bikoteak eratuko lirateke eta bigarrenean talde-egoera berera kondentsatuko lirateke.

Tenperatura kritikoaren bilakaera

Superreroaleek duten oztopo handi bat, funtzionatu ahal izateko oso tenperatura hotzetan egon beharra da. 1986. urterarte 23 K-rainoko (-250 °C-rainoko) tenperaturak behar ziren superreroankortasun-fenomenoa detektatzeko, eta horrek helio likidozko hozketa-sistema garestiak erabiltzera derrigortzen zuen.

1986 eta 1987. urtean ordea, Alex Muller eta Georg Bednorz ikerleek IBM etxeak Zurichen dituen laborategietan askoz ere tenperatura kritiko altuagoetan detektatu dute superreroankortasuna. 90 K eta 125 K-eraino igo zuten tenperatura kritikoaren marka, kobre oxido batzuk erabilita. Horri esker gaur egun nitrogeno likidozko teknologia merkeagoaren barruan lan egin daiteke, baina horrez gain beste eraginik ere izan du. Izan ere ikerleak eriosuharrean ari bait dira giro-tenperaturako superreroankortasuna lortu nahian. Zein da ordea, gaur egungo egoera?

Galdera honi erantzuteko, lau puntu argitu behar dira. Lehenbizi material superreroaleak nola lortzen diren argitu behar da; bigarrenik, beren egituraz zer dakigun; hirugarrenik tenperatura altuko superreroankortasuna nola esplikatzen den, eta azkenik, aplikazioak zertan diren.

Materialak nola lortu

Material superreroankorrak sintesi bidez nahikoa erraz lor daitezke. $YBa_2Cu_3O_7$ (bario, itrio eta kobre oxidoa) lortzeko adibidez, osagaiak formulan adierazitako proportzioan dosifikatu behar dira. Materialak eho eta hautsa 1.000 °C ingururaino berotzen da. Kristal-ale txikiak lortzen dira horrela; berotan erre eta elkarri itsatsita geratzen direnak.

Material hauek lortzeko prozeduran ordea, faktore askok parte hartzen du eta inoiz gertatu izan da formula bereko konposatua ($Tl_2Ba_2CuO_6$ hain zuzen) batzuentzat superreroale ez izatea eta beste batzuentzat 90 K-eko tenperatura kritikoa duena izatea. Gero ikusi ahal izan zenez, sintesi-baldintzek berebiziko garrantzia dute konposatuen ezaugarrietan.

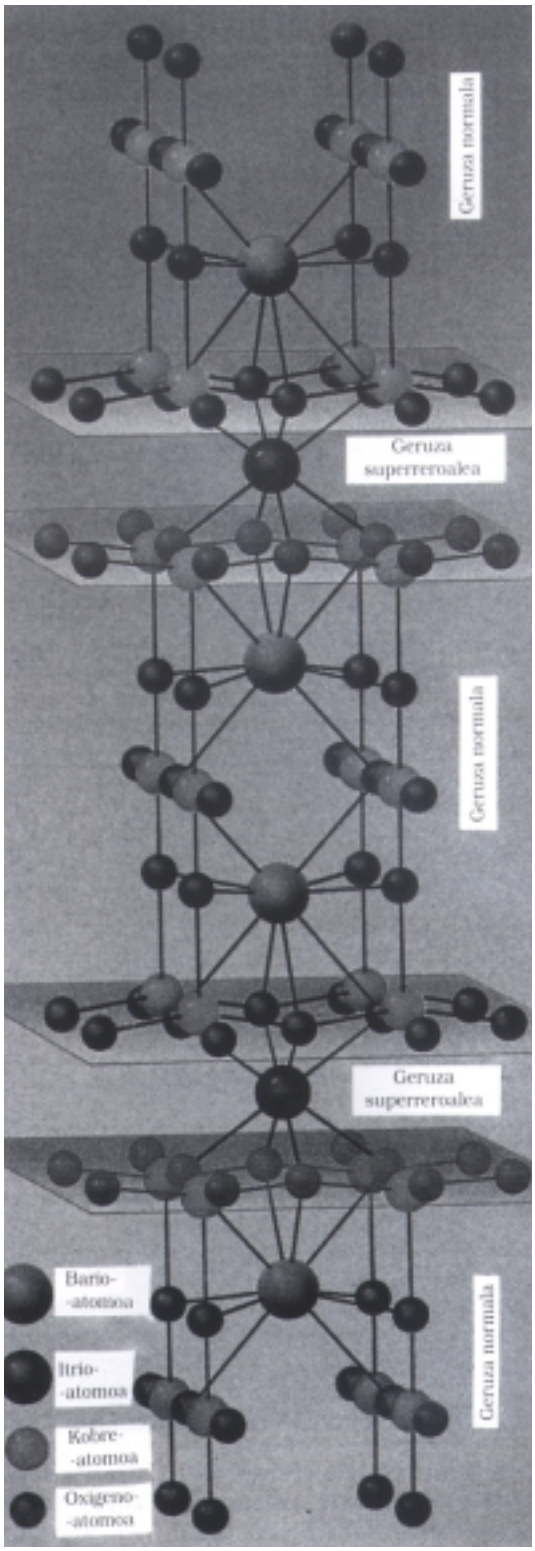
Geruzazko egitura

Material hauek geruzazko egitura eta akats asko dutela ikusi izan da 1986.az gero aurkitutako konposatuetan. Har dezagun lehen aipatutako $YBa_2Cu_3O_7$ konposatuaren adibidea. Egitura horretako giltzarria CuO_2-zko bi planoz osatutako geruza da, non kobre-atomo bakoitza lotura kimikoz bi oxigeno-atomorekin konbinatuta dagoen. CuO_2-zko bi plano horiek itrio-atomoz bananduta daude. Multzoak berriz, geruza osatzen du eta hori da, hain zuzen, superreroankortasunaren egoitzatzat jotzen dena. Bi geruza superreroankorren artean geruza normala dago tartekatua; CuO_x-eko (x 0 eta 1 bitartekoa delarik) kateak, bario-atomoak eta oxigeno-atomoak dituena. Multzoan beraz, geruza superreroale eta arruntak tartekaturik daude.

Geruza arrunten zeregina ez dago oraindik erabakita. Batzuen ustetan, geruza superreroaleak hornitzeko karga-biltegia da. Beste batzuen ustetan ordea, gertutasuna medio, geruza hau ere superreroale bihurtzen da. Nolanahi ere, arazoa ez dago oraindik argituta.

Konposatu hauetan dauden akatsak bestetik, oso eztabaidagarriak dira. Akats puntualak izan daitezke (sareko puntu jakin batean hidrogeno-atomo bat gutxiegi edo gehiegi izatea, adibidez), baina hedatuak ere izan daitezke (geruzen txandakatzean akats bat edo homogenoki banatu gabeko atomo-multzo bat). Oxigeno-eskasiaren zeregina oso garrantzitsua dela ikusi da, zeren atomo bat edo beste falta izateak superreroankortasuna sendotu egiten bait du. Ez dago garbi ordea, fenomenoan geruzek eta egitura-akatsek zein neurritako eragina duten.

Superreroale berriak. Material hauek tenperatura altuagotan dira superreroale. Barruan geruza superreroaleak geruza normalekin txandakatuta dauzkate. $YBa_2Cu_3O_7$ materialean (bario, itrio eta kobre oxidoan), geruza superreroale bakoitza itrio-atomoz banandutako CuO_2-zko bi geruzaz osaturik dago. Geruza "normalak", CuO_x-eko (x 0 eta 1 bitartekoa delarik) kateak ditu eta bario-atomoak ere bai. Badakigu geruzazko egitura honek zeregin nagusia duela superreroankortasunean, baina ez dakigu zeregin hori zein den.



Superreroankortasun-mekanismoa

Gai honetaz galdetzen zaienean, fisikariek desordena aipatzen dute lehenbizi. Gero ugaritasuna ere aipatzen dute, tenperatura altutako superreroankortasuna esplikatzeko. Egia esan, fisikariek ez dakite tenperatura kritiko

altuko superreroankortasunaren mekanismoa zein den. Izan ere eredu asko asmatu dute fenomenoa adierazteko.

1987.az gero egindako saiakuntzetan, korronte elektrikoaren eramale diren elektroi-bikoteetan gauza arraroak somatu dira; bikoteko elektroien arteko distantzia txikiak, adibidez (dozenaka angströmekoa, BCS eredu klasikoan ehundik mila aldiz handiago diren bitartean). Y.J. Uemura-k Columbiako unibertsitatean (New York-en) egindako saiakuntzei esker, "eremu magnetikoaren sakonera" neurtu ahal izan da, hau da, eremu magnetikoa superreroaleko lagin batean noraino sartu den. Tenperatura kritiko altuko superreroale-familietan neurtu da batetik, baina azken hogei urteotan aurkitutako beste material exotiko batzuetan (superreroale organikoetan, uraniozko konposatuetan eta abarretan) ere bai bestetik.

Uemurak ikusi ahal izan duenez, tenperatura kritiko altuko superreroale exotiko huek badute ezaugarri bat: beren tenperatura kritikoa eremu magnetikoaren sakoneraren karratuarekiko alderantziz proportzionala da. Horrek fisikariei elektroiak parekatzeko mekanismo bat dagoela iradokitzen die, non kristal-sarea deformatu egingo litzatekeen eta ondorioz bikoteko elektroiak oso gertu egongo liratekeen. Interpretazio hau baieztatzen bada, superreroale-familiak batu egingo lirateke eta tenperatura kritiko altuagoak lortzea posible litzateke.

Superreroaleen aplikazioak

Superreroankortasunaren eraginaz jabetzeko, erresistentzia elektrikorik gabeko munduaz pentsatu behar dugu. Bururatzen den lehen aplikazioa erresistentziarik gabe dabilen korronte elektrikoa da. Hari superreroalean ez litzateke berorik galduko. Teorian, amaierarik gabeko higidura posible litzateke, eta superreroaleko korronteak urtetan iraun dezake energiarik galdu gabe. Elektrizitatea metatzea egongo litzateke, beraz.

Beste erabilpen-arlo bat elektroimanena da. Superreroalezko bobinei esker, korronte-intentsitate handiak zirkularaziz eremu magnetiko ikaragarriak sortuko lirateke. Orain berriz, elektroimanetan ohizko eroaleetan beroa sortzen delako mugak daude.

Aplikaziotarako oztopoak

Superreroankortasunak aplikazio praktikoetan bere oztopoak aurkitzen ditu ordea. Izan ere tenperatura kritikoa ez da muga bakarra. 1911. urtean Kamerlingh Onesek berak eremu magnetiko handiak sortzeko berunezko harila egin eta helio likidoz 4 K-eraino hoztu zuen. Berunak 7,2 K-eko tenperatura kritikoa du, baina Onesek ikusi zuenez, eremu magnetikoa 0,05 teslatik gorakoa bazen, beruna eroale arrunt bihurtzen zen. Superreroankortasuna izan ere, tenperatura, eremu magnetikoa eta korronte elektrikoa (hiru parametro dira, beraz, zaindu beharrekoak) neurri jakin batetik beherakoak direnean agertzen da materialetan. Material superreroale bakoitzak bere tenperatura, eremu magnetiko eta korronte kritikoak ditu eta hirurak betetzeak asko mugatzen ditu aplikazioak.

Azkena aurkitutako superreroaleak, zeramikoak dira, hots, "juntura" izeneko kristalezko alez osatutakoak. Egitura honek, korronteak ale artean igaro behar duela esan nahi du eta intentsitate handirik ezin dute eduki. YBaCuO-zko superreroaleetan, 1987. urtean korronte-dentsitateak cm^2-ko ehundaka amperetakoa baizik ez zen. Harez gero ale arteko junturak superreroankortasunarekiko hobetzen saiatu dira eta 40.000 A/cm^2-ko dentsitateak lortu dituzte, eremu magnetikorik gabe, noski.

Bismutozko superreroaleek etorkizun hobea dutela dirudi. $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_8$ materialak adibidez, 110 K-eko tenperatura kritikoa du. Japoniako Sumitomo Electric etxeak 4 K-etan 10^5 A/cm^2-ko dentsitateak lortu ditu, baina 25 teslako eremu magnetikoan.

Dena den, iaz Japoniako ISTEC ikerketa-institutuak beste marka bat hautsi du. YBaCuO-ko 250 pastila erabilita superreroaleek sortutako eremu magnetikoei esker plataforma batean bertako lehendakaria jarrita 120 kg lurretik zentimetro bat altxatzea lortu dute. Frantzian Grenoblen dagoen CRTBT ikerketa-zentruan 8.000 A/cm^2-ko dentsitateak lortu dituzte 77 K-etan eta 6 teslako eremuan.

Ezaugarri horiekin detektore eta kaptoreak presta daitezke. SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) izenekoek eremu magnetiko guztiz txikiak neur ditzakete. Iaz Kaliforniako Berkeley-koek adibidez, giza bihotzak sortutako eremu magnetikoa neurtzen zuen SQUID bat aurkeztu zuten.

Dena den, superreroaleen etorkizuna oraindik ez dago guztiz argi, baina aplikazio batzuek (lebitazio magnetikoak adibidez) harrituko gaituzte, dudarik gabe.