

Atomoaren eta egitura atomikoaren ekarpenak XX. mendean

F. Plazaola

Elektrika eta Elektronika Saila
Euskal Herriko Unibertsitatea/Zientzi Fakultatea
644 P.K., 48080 BILBAO

Laburpena: XX. mendean, naturaren ezagutzan hainbat lorpen izan dituen zientziaren arlo bat aztertuko da, egitura atomikoan oinarrituriko zientzia, hain zuzen ere. Lana, ikuspegi historiko batetik idatzita dago. Bide hori aukeratu da XX. mendean zientziaren eraikuntzan burururiko lan itzelaz irakurlea errazago jabetu dadin. Beraz, hipotesi atomikotik eta X izpien aurkikuntzatik abiatuz, zentzuzko lehen atomo-ereduak, eta fisika klasikoaren eragozpenak deskribatzen dira. Ondoren, mekanika kuantikoaren lehen hastapenen eraginak aztertu eta, kuantikaren iraultzari bide ematen zaio. XX. mendearen lehen erdia, mende osoko aurrerapen garrantzitsuenetako batekin amaitu da, transistorearen asmakuntzarekin hain zuzen. Asmakuntz horrek bai maila zientifiko-teknikoan bai ikerketa egiteko eran izan dituen ondorioak ere aztertzen dira. XX. mendearen bigarren zatia deskribatzeko, supereroankortasuna eta ingeniari-tza kuantikoa aukeratu dira. Adibide horien bitartez, naturaren oinarritzko legeak ongi ezagutu arren, naturak bere baitan gordetzen dituen hainbat egoera aurreikustea ezinezkoa dela azaltzen saiatzen gara, hori izan baita XX. mendeak utzi digun ondorioetako bat. Lana amaitzeko, nanometro eskalan, fisika, kimika eta biologiaren artean gertatzen ari den uztarketa laburki deskribatzen da.

HIPOTESI ATOMIKOA ETA ATOMOAREN EREDUAK

Zientziaren ekarpenak XX. mendean itzelak izan arren, harturiko abiadak moteldu gabe dirau XXI. mendearen hasieran. XIX. mendearen amaieran zientziaren eraikuntzak osotua zirudien eta beraz, inork ez zuen aurrikusi XX. mendean etorri zena. Naturak, bururatu ezinezko egoerak gorde ditzake bere baitan, eta XX. mendea, horren lekuko argia suertatu da.

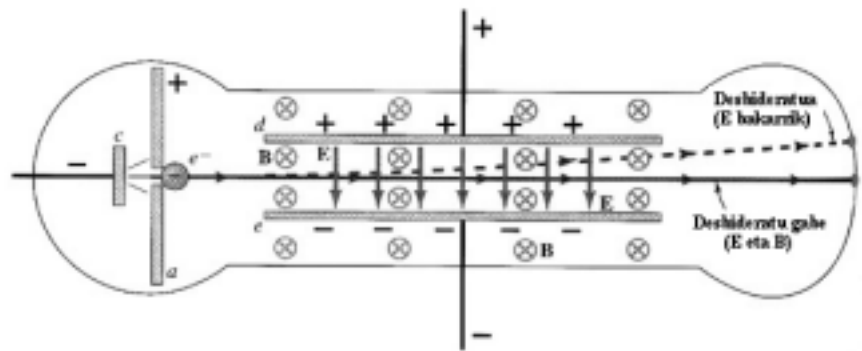
Max Planck gaztea Municheko Unibertsitatera Fisika ikasketak egitera zuzendu zenean, Fisika Fakultateko dekanok ondoko berbeekin eman zion sarrera «Fisika ia osaturik dagoen zientzien adarra da. Aurkikuntza garrantzitsu gehienak eginak dira. Beraz, ez du merezi fisikaren arloan ikasketak

egitea». Eskerrak Planck, Dekanoak esandakoari ez zitzaiola jarraitu, Fisika izan baita XX. mendean gehien aurreratu den zientzia, Fisikaren mendea esan ohi zaio mende honi, eta berak, Planck-ek hain zuzen ere, Fisikaren garapenean lehendabiziko harriak jarri zituztenetako bat izan zen. Bera izan zen, gorputz berotuen erradiazioa azaltzeko lehen kuantizazio prozesua aurrean zuena. Esan beharra dago gainera, XIX. mendearen amaieran Múnicheko Fisika Fakultateko Dekanoaren iritzia komunitate zientifikoan barne oso zabaldurik zegoela.

Ondoren, fisikaren mendea esan ohi zaion XX. mendeari begiradaxoa emango diogu. Hala ere, zenbaitetan aitzinerago jo beharko dugu, materiaren hipotesi atomikoa XIX. mendean proposatu baitzen. Hala ere, esan beharra dago, historian barrena bide luzea jorratu izan dela erreduktionismoaren bidetik, lan honen abiapuntura iristeko. Izan ere, ezaguturiko materia bere oinarritzko osagarrietan erreduzitzeko joera, etengabea izan da historian zehar. Dagoeneko duela bi mila urte filosofo grekoek jarrera honen oinarriak ipini zituzten, munduaren konplexutasuna azaldu nahian, bere osagarri elementaletan erreduzitu zutenean. Kristo aurretiko seigarren mendean, gauza guztien oinarritzko elementua ura zela proposatu zuen Tales-ek; ondorengo pentsalariek mundua lau elementu lurtarrez osoturik zegoela proposatu zuten: lurra, airea, sua eta ura. Osagarri horien kantitate osoa iraun egiten zuela pentsatuz, beraien artean era oso desberdinetan nahas zitezkeetela ondorioztatu zuten. Gorputz zerutarrak bosgarren osagarri edo esentzia batez osoturik zeuden, eterea edo «quintaesentzia» deiturikoa, hain zuzen ere. Gaur egun, nekez eta izerdiz lorturiko jakituria dela medio, pentsamolde honek irribarrea sor diezakigukeen arren, bere baitan oinarritzko aurrerapena dakar, argudio magikoen arbuioa, hain zuzen ere. Anaxagoras-ek (500-428 k.a.) aurreko teoriak oinarritik hobetu zituen, partikula edo «atomo» kopuru infinituaz populaturiko unibertso infinituan pentsatzen duenean. Izan ere, zerua eta lurra substantzia berberetz eginak zeudela proposatu zuen, «herejia» horregatik bere bizia kinka larrian jarritz. Leucipo-k ere materiaren teoria atomikoa garatu zuen, eta ondoren bere ikasleak, Demokritok, teoria hori aurrerago eraman arren gehienek teoria ahanzi egiten dute, filosofo nagusiek, Aristoteles, Platon eta Sokrates-ek arbuia egin zutelako. Hala ere beranduago Epicuro-k (341-270 k.a.) ideia atomikoak berpiztu egin zituen.

Atomismoaren ezaugarri nagusia da mundua bi osagaiez, deusezta ezinezko atomoez eta hutsaz, osoturik dagoela sinistea. Atomoak banaezinak dira, hutsean barrena aske mugitu daitezke eta eite desberdin askotan bilduz sistema konplexuak sor ditzakete. Atomoak txikiak ziren zuzenean ikus ahal izateko. Kimikaren jaiotzarekin, teoria atomikoa era sistematikoan sartu zen pentsamendu zientifiko modernoan. 1809. urtean John Dalton (1766-1844) kimikariak proposatzen zuen atomoek pisu desberdinak dituztela, eta proportzio jakin batzuetan nahasten direla konposatu kimikoak

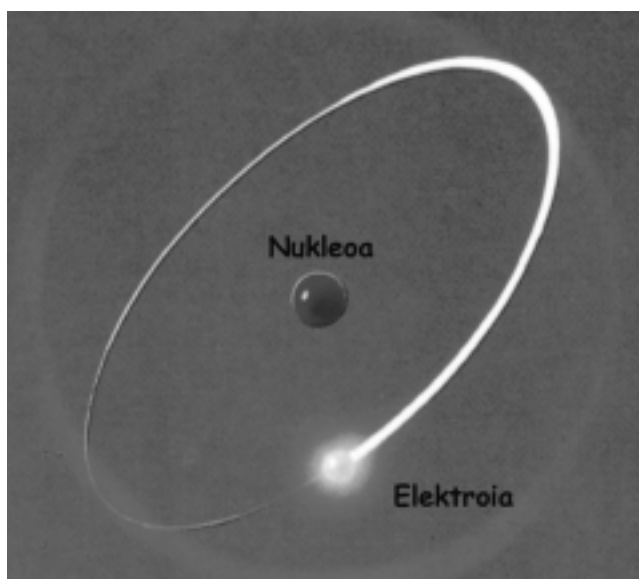
osotzeko, eta honela, materiaren hipotesi atomikoa ezarri zuen. Daltonek pisu atomikoa definitu zuen, eta halaber atomoen pisu erlatiboak finkatzeko metodoa ere plazaratu zuen. Horretan oinarriturik, pisu atomikoen periodizitatea Dimitri Ivanovich Mendelejev eta Julius Lothar Meyer-ek aurkitu zuten. Gainera Mendelejev-ek, periodizitate horretan oinarriturik aurkitu gabeko elementu kimikoen existentzia aurrean zuen. Egun taula periodikoa esaten zaiona, hain zuzen ere. Hala ere, berak beste izen bat jarri zion, hots, «Pisu atomikoetan eta antzekotasun kimikoetan oinarrituriko elementu kimikoei buruzko sistema espekulatiboa». Baina oraindik ere, atomoen ebidentzia fisiko zuzena falta zen. XIX. mende amaiera arte itxaron behar izan genuen falta zen ebidentzia aurkitzen hasteko. Egun, gutxi gorabehera 90 elementu natural identifikatu dira lurrian eta dozena bat baino gehixeago artifizialki sortu dira.



1. irudia. J.J. Thomson eta izpi katodikoaren m/q arrazoa neurtzeko erabili zuen tresneria.

Materiaren hipotesi atomikoa XIX. mendean proposatu zen arren, XX. mende hasieran oraindik ez zegoen atomoaren zentzuzko eredurik. Hala ere, atomoaren zentzuzko lehen eredu plazaratu aurretik, 1909. urtean lehen

partikula subatomikoaren izaera ezagutu zen. Izan ere, Julius Picket zientzialariak 1859. urtean izpi katodikoak aurkitu zituen eta iman baten ondoan ipiniz gero desbideratzen zirela aurkitu zuen. 1881. urtean Hermann Von Helmholtz zientzialari alemaniarrak zioenez, materia azaltzeko hipotesi atomikotik abiatuz gero, nahitaez ondorioztatu behar da baita elektrizitatea atomoen antzeko partikulez osaturik dagoela ere. 1883. urtean Hendrik Antoon Lorentz zientzialari neerlandarrak karga elektrikoa garraiatzen duten partikulak subatomikoak direla proposatu zuen. Eta handik urte batzuetara, 1891. urtean hain zuzen ere George Johnstone Stoney-k atomo elektrikoari, elektroizena eman zion. 1897. urtean Joseph John Thomson zientzialari britaniarrak 1 irudiko esperimenduaren bidez izpi katodikoaren m/q arazoia neurtu zuen. Zenbaitek esaten dute neurketa hori elektroien aurkikuntzarena izan zela, baina m/q arazoia horri orduan ezagutzen zen masa arinaren (hidrogenoarena) atxikituz lortzen zen karga, orduan ezagutzen zen karga txikiena (hidrogeno ionizatuarena) baino askoz handiagoa zen. Arrazoia horri ezagutzen zen karga txikiena atxikituz lorturiko masa aldiz, oso txikia zen, hidrogenoarena baino askoz arinagoa. Zientzialariek, azken emaitza hau hobesten zuten, baina 12 urte itxaron behar izan ziren, 1909. urtean Robert Andrews Millikan zientzialari estatubatuarren koipe-tantaren esperimenduak izpi katodikoak hidrogeno atomoa baino 1837 aldiz arinagoak direla argi utzi zuen arte: beraien karga ezagutzen zen txikiaren berdina zen. Beraz, 1909. urtean elektroien izaera ezagutu zen.



2. irudia. Hidrogeno atomoaren eredu planetarioa.

Zentzuzko lehen atomo-eredua, 1910. urtean Ernest Rutherford-ek alfa partikulen bidez eginiko esperimenteren ondorioa da. Rutherford-en atomo-ereduak bi osagai zituen, nukleoa erdian eta bere inguruan biraka elektroiak (ikus 2 irudia), eguzki-sisteman, eguzkiaren inguruan planetek biratzen duten eran. Horrexegatik eredu honi atomoaren eredu planetarioa deritza. Eredu honek, bere baitan, oso akats larria zuen, atomoaren kolapsoa aurreratzen baitzuen. James Clarke Maxwell-ek (1875) geroztik ezaguna zen edozein partikula kargatu, elektroia kasu honetan, azeleraturik dagoenean energia erradiatzen duela. Elektroia, eredu planetarioak proposatzen duen bezala, nukleoren inguruan biraka balego, azeleraturik legoke (azelerazio normala) eta energia erradiatuz biratzeko energia galduko luke nukleora $0,00000001$ s-tan jausiz. Beraz, eredu honen arabera John Daltonek 1809. urtean proposaturiko hipotesi atomikoa ez litzateke existituko, hots, inguratzen gaituen materia erabat ezegonkorra litzateke, eta ezagutzen dugun mundua ez litzateke existituko. Akats larri eta galant hori, hortxe egon zen hiru urtez erantzunik gabe, 1913. urtean Niels Bohr zientzialariak elektroiaren energiaren galera gainditzeko Bohr-en atomo-eredua plazaratu zuen arte. Bohr-en ereduaren eredu, planetarioa da eta Rutherford-en ereduaren bezalaxe elektroiak, nukleoren inguruan orbitetan biratzen dute. Baina, Bohr-en arabera, elektroio-orbitak egonkorak dira eta energia-maila jakin batzuetan gertatzen dira, hots, elektroio-orbitalek ezin dezakete edozein energia eduki; izan ere, beraien energiak kuantizaturik daude. Proposamen honek, berehala ekiditen du atomaren kolapsoa, orbita egonkor eta diskretu (kuantizatu) horietan elektroiak ezin baitezakete erradiatu, erradiazio prozesuak energi galera jarraitua eskatzen baitu (apurka-apurka gertaturikoa), baina energia-maila diskretuetarako debekaturik baitago.



3. irudia. H-aren eta H₂-aren igorpen-espektroak.

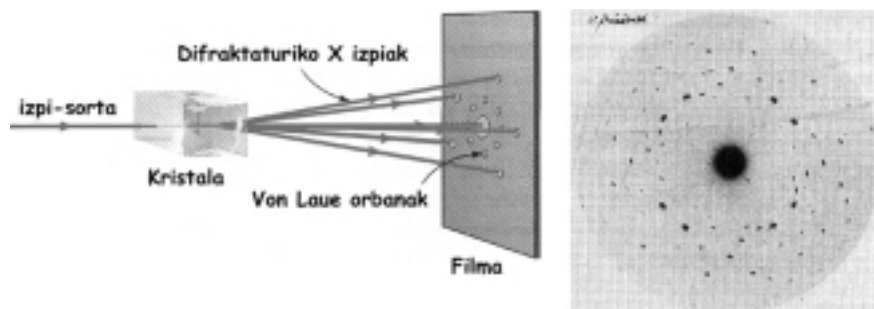
Hidrogenoa (edo edozein gas) ontzi itxi eta garden batean berotzen denean, argia igortzen du eta horri Hidrogenoaren igorpen (edo gasaren) espektroa deritza (ikus 3 irudia). Bohr-en ereduak oso ongi azaltzen du zergatik igorritako argia kolore (maiztasun) jakin batzuetakoa den eta ez zuria, argi-kolore guztiak onartuko balira gertatuko litzatekeen bezalaxe. Hau ere, elektroien energi maila diskretu edo kuantizatuekin loturik dago. Hala ere, Bohr-en ereduaren Hidrogenoaren espektroa soilik azaltzeko gai da. Hurrengo atomo bakunenaren espektro atomikoa berriz, Helioarena, ez da azaltzeko

gai. Beste 15 urte itxaron behar izan ziren, iraultza kuantikoa iritsi arte hain zuzen ere, elektroien anitzeko elementuen espektro atomikoak azaldu ahal izateko. Honek, gainera, atomo-eredu planetarioaren desagertzea ekarri zuen.

Aurreko lehen urteetan ikusi dugun bezala, atomoak nukleo eta elektroietan bana daitezkeela XX. mendean ikusi genuen. Eta ez hori bakarrik, nukleo bera ere protoi eta neutroiak bana daitezke eta hauek ere gehiago quarketan. Ezagutzen ditugun naturako lau elkarrekintzen kasuan ere, grekoek hasierako joera erredukzionisten bidetik jarraitzen dute aurrera lau elkarrekintza horien baturaren atzetik, hots teoria baturaren atzetik. Beraz, iraganeko fisika, bere kontzeptuak, oso erredukzionista izan da, natura osagarri gero eta txikiagoen arabera aztertzean eta batasuneko oinarriko legeak ezagutaraztean.

EGITURA ATOMIKOAREN EZAGUTZARAKO LEHEN LANABESAK

Egitura atomikoa XX. mendean aurkitu zen arren, lorpen horietarako baliabideak XIX. mendearen amaieran ipini ziren, X izpien aurkikuntzarekin, hain zuzen ere. 1895. urtean Wilhem Conrad Röntgen X izpiak aurkitu zituen, egun berean lorturiko bere emaztearen erradiografiak agerian utzi zuen bezala. Aurkikuntza honetan oinarriturik 1912. urtean Max Von Laue zientzialari germaniarrak X izpiak solido bat zeharkatzean, 4 irudian ikus daitezkeen bezala sakabanatzen direla aurkitu zuen. Esperimentu honek agerian utzi zuen X izpiak uhinak direla, solidoa zeharkatzean difrakzio prozesua jasaten baitute. Honek zuzenean adierazten zuen, halaber, solido atomoak kokapen ordenatua dutela (interferentzia diagrama sortu ahal izateko) eta atomoen arteko distantzia X izpien uhin-luzeraren neurrikoa zela ($\sim 10^{-8}$ cm). Beraz, solido kristalinoak atomo-sare ordenatuak dira. Izan ere, horixe izan zen maila mikroskopikoko materia kondentsatuaren abiapuntua. Hiru urte beranduago, William Lawrence Bragg zientzialariak



4. irudia. Max Von Laue-k buruturiko X izpien solido batean zeharreko difrakzioa.

X izpien difrakzioaren teoria matematikoa garatu zuen eta horri esker, difrakzio-diagrama horien baitan dauden atomoen posizio arlatiboei buruzko (geometria) informazio kuantitatiboa lor daiteke.

TEORIA KLASIKOAREN LORPEN ARRAKASTATSUAK

XX. mendean lehen erdialdean, Teoria Kuantikoa izan zen mende horretako ekarpen garrantzitsuenetakoa bat, baina hala ere, Teoria Klasikoek, Münicheko Dekanoa ezereztatuz, mende hasieran hainbat ekarpen garrantzitsu lortu zituzten. Adibidez, Max Born-ek, X izpien bidez lorturiko atomoen posizioak kontuan hartuz eta 2 parametro egokigarri erabiliz, (irispide luzeko Coulomb elkarrekintza eta ioi hurbilen arteko aldarapena kontuan hartzeko) Haluro Alkalinoen kohesio-energia lortu zuen. Lorturiko emaitza, balio esperimentalek (kristala molekula edo atomoetan banatzeko solido kristalinoari eman beharreko energia) ematen zutenekin alderatuz, desberdintasuna oso txikia zen, %3-koa, hain zuzen ere. Max Born zientzialari berak ere, kristaletako atomoek zenbait eraginaren ondoren oszilazio koordinatuen bidez erantzuten dutela aurrean zuen.

Pierre Drude eta Hendrik Antoon Lorentz zientzialariek metalen tenperatura altuenpeko erresistentzia azaldu zuten. Horretarako, metaletan elektroiei askeak zeudela proposatu zuten, eta elektroiei horiek potentzial-diferentziaren eraginez higitzen zirenean (korronte elektrikoa sortuz) ioiekin (elektroiei askerik gabeko atomoekin) talka egiten zutela aldarrikatu zuten. Hala ere, teoria hau ez zen gai tenperatura absolutua zerorantz hurbiltzean, erresistentziaren zerorantzako gerturaketa monotona azaltzeko.

Pierre Weiss-ek arrakasta handia lortu zuen material ferromagnetikoen magnetizazio prozesuak, histeresi zikloak eta abar (hots, imanen jokaera magnetikoa) azaldu zituenean. Azalpen horretarako, domeinu magnetikoen proposatu zituen, baina batez ere, atomo magnetikoen (dipolo magnetikoen) gainean eremu magnetiko eraginkor bat eragiten zuela suposatu zuen, $H_{erag} = H + \alpha M$. Esperimentuen portaera azaldu ahal izateko proposaturiko α parametro fenomenologikoaren balioak 1.000-10.000 tartean egon beharoko lukete. Eta hori ulertezina zen!!! ezaguturiko kontzeptu fisikoek (dipolo magnetikoen sorturiko eremu magnetikoa) gehienez, 0,1 balioa eman baitzezaket.

Hala ere, teoria klasikoaren baitan gaindiezinezko akats orokorrak behin eta berriro agertzen dira. Alde batetik, deskribapen fenomenologiko arrakastatsuek lortzen zuenean ere, teoria klasikoa ez zen gai sistemaren barne-parametroak *oinarriko printzipioetatik* lortzeko. Bestetik, XX. mendearen hasieran hainbat fenomeno ulertezinak ziren, adibidez erresistentziaren eta bero-ahalmenaren zerorantzako gerturatzea tenperatura baxuetan edo efektu fotoelektrikoa.

TEORIA KUANTIKOAREN HASTAPENAK

Teoria honen lehen urratsa gorputz berotuek igorritako erradiazioaren azterketan koka dezakegu. Gauza jakina da, gorputz berotuek ingurunea argitzen dutela, eta tenperatura igotzearekin batera igorritako erradiazioa gero eta argitsuagoa dela. Alabaina, alperrikakoak izan ziren gorputz berotuek igorritako erradiazioaren espektroa ulertzeko ahalegin guztiak, XX. mendearen atarian Max Planc-ek argia igortzen duten elektroi dardarkarien energia kuantizaturik dagoela proposatu zuen arte. Planck-en hipotesiaren arabera, bada, elektroi dardarkarien energiak balio jakin batzuk soilik izan ditzake, eta igorritako erradiazioaren maiztasunarekiko proportzionalak izan behar dute, proportzionaltasun-konstantea unibertatsala delarik: Planck-en konstantea.

Beste aurkikuntzengatik ezagunagoa izan arren, Albert Einstein izan zen teoria klasikoak azaltzen ez zuen efektu fotoelektrikoa azaldu zuena. Erradiazio elektromagnetikoa igortzen duten elektroi dardarkarien energia kuantizaturik dagoela onartuz, Albert Einstein gazteak erradiazioa bera ere kuantizaturik dagoela proposatu zuen 1905. urtean; efektu fotoelektrikoaren azalpen zehatza eman zuen beraz. Hau da, argia «korpuskulu» eran eta uhin eran jokatzen duela proposatu zuen, hots, argiak efektu fotoelektrikoaren kasuan «billarreko piloten antzera» jokatzen duela aldarrikatu zuen. Argi-korpuskuluari «fotoia» izena jarri zion eta fotoiaren energia argiaren maiztasunaren proportzionala dela aldarrikatu zuen. Proportzionaltasun-konstantea, hemendik aurrera hain ezaguna egin den h , Planck konstantea da. Hainbat jende aurkakoa uste duen arren, Einstein-i Nobel saria azalpen honengatik eman zioten eta ez erlatibitatearen teoria bereziagatik. Berak, erlatibitatearen teoria berezia eta grabitazioaren teoria orokorra plazaratu zituen, mende honetako ekarpen handiak direnak ere, eta hauek esker, «mass media»k Einstein gizarte mailan oso ezaguna egin dute. Hala ere, esan beharra dago horren ezagunak ez diren beste aukikuntza batzuk ere egin zituela, adibide gisa, goian aipaturiko efektu fotoelektrikoa, non argiak uhin eran jokatzen beharrean Newtonen denboretara itzuliz partikula, «pilota» edo korpuskulu eran joka dezakeela proposatu zuen, edo, zero absolutu tenperaturaren inguruan bero-ahalmenak zergatik jokatzen duen egiten duen bezala. Ez da ahantzi behar, teoria kuantikoaren hastapenetan Einstein-ek garrantzi handia izan bazuen ere gero eta urrunago geratu zela teoria kuantikotik, hots, mende honetako ekarpen garrantzitsuenetako batetik.

KUANTIKAREN IRAULTZA

Kuantikaren benetako iraultza mende honen bigarren laurdenean hasi zen. Einstein-ek argiak partikula bezala joka dezakeela aurrean zuen, baina Louis de Broglie-k (zientzietako azken printzeak) aldiz, partikulek uhin eran joka dezaketela aurrean zuen. Hau da, elektroi-sorta bat adibidez, bi

zirrikitu dituen horma batetik pasarazten bada, itsasoko olatuek bezala (eta ez billarreko pilotek bezala) interferituko dute elkarren artean, hots, uhin eran jokatuko dute. Efektu hau, gure hurbileko materialen ez da nabaritzen, baina bai era errazean azpipartikulen mailan, eta horren lekuko egun hain hurbil eta zabaldurik ditugun hainbat teknika, adibidez mikroskopio elektronikoa. Une honetatik aurrera, ezin egin dezakegu partikula eta uhinaren banaketa. Ez!, kontzeptu berberaren bi ikuspegi direla esan beharko dugu: zenbait kasutan partikula edo korpuskulu eran agertzen da eta beste zenbaitetan berriz, uhin eran.

Bohr-en eredu hidrogeno atomorako ona izan arren, ez zen gai bi elektroiez osaturiko sistemen atomo-espektroak azaltzeko. Beraz, zentzugabea zen egitura atomikoetarako, hots, 10^{23} atomok (gramo bateko atomo edo molekula kopuruaren neurria, Avogadro zenbakiaren neurrikoa) eta elektroiek elkarrekiten duten sistemetarako. 1926. urtean Schrödinger-ek bere izena darman ekuazio ospetsua plazaratu zuen, eta berehala frogatu zen ekuazio hori baliogarria zela H_2 molekula diatomikoaren (1927) eta He atomoaren (1929) espektroak azaltzeko. Gainera, Schrödinger-en ekuazioaren bidez lorturiko emaitza teorikoek, bat egiten zuten doitasun handiz, atomo-espektroetatik lorturiko emaitza esperimentalekin. Hau dela eta, komunitate zientifikoari argi geratu zitzaion Schrödinger-en ekuazioak zuzena zirudiela.

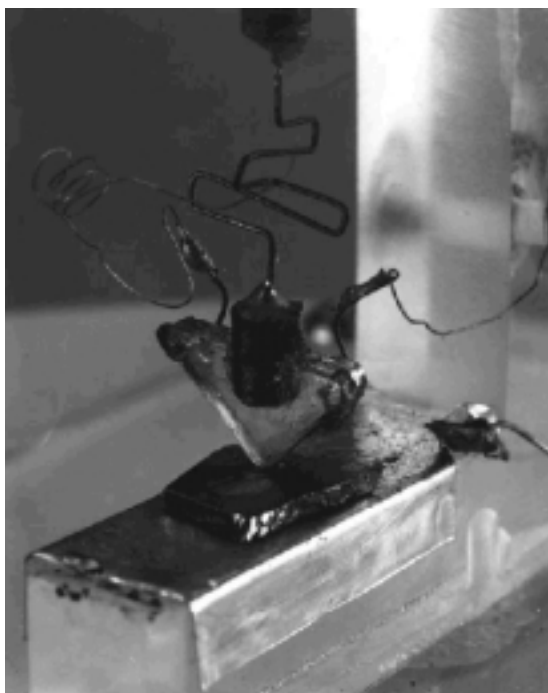
Schrödinger-en ekuazioak, aurreko ikuspegi klasiko edo erdi klasikoekin era bat apurtzen du. Atomoaren eredu planetarioa (Rutherford, Bohr) txikituta geratzen da, aipaturiko ekuazioak argi uzten baitu elektroiek atomoetan uhin eran jokatzen dutela. Hori dela eta ezin da elektroiorbitez berba egin, uhinen antzera ez baitago leku fisiko jakin batean, zabaldurik baizik. Honek esan nahi du elektroia atomoaren edozein tokitan aurki dezakegula, baina hori bai, edozein tokitan aurkitzeko probabilitatea ez dela berdina. Beraz, elektroien orbitez hitz egin beharrean, elektroiak aurkitzeko probabilitateaz berba egin behar dugu.

Urte hauetan ere, oso garrantzitsuak izan ziren Wolfgang Pauli (spina, elkarrezintasunaren printzipioa) Max Born, Julius Oppenheimer, Werner Heisenberg (ziurgabetasunaren printzipioa), Felix Bloch (banden teoria) eta abarren ekarpenak. 40.eko hamarkadan solidoen teoria kuantikoa kristal idealetan nahiko ongi ulertzen zen eta beraz, aurreko ikuspegi klasikoa maila mikroskopikoan iraulirik geratu zen.

TRANSISTOREAREN ASMAKUNTZA

II. mundu-gerrak geldialdi bat ekarri zuen ikerkuntza zientifikoan, iker-tzaile gehienek lorpen militarren atzetik ziharduten eta. Hor non, garatu ziren lehergailu atomiko zorigaitza edo erradarra. Guda osteko barealdiak, ikerketa zientifikorako grina indarberritu zuen, eta honen ondorioz, 1948.

urtean XX. mendeko ekarpen nagusina ez bada, ekarpen nagusietako bat, hots, *Transistorea* asmatu zen (ikus 5 irudia). Zenbait ikerkuntza-arlotan eragin ikaragarria izan du, bai ikerkuntz zientifikoan ere. John Bardeen eta Walter Brattain alde batetik eta William Sholckley bestetik izan zuten garrantziko eragina asmakuntza hauetan, ahaztu barik «Bell Telephone Laboratories», bertan gauzatu baitziren asmakuntzak.



5. irudia. J. Bardeen eta W. Brattain-ek garaturiko lehen transistorearen irudia (ukipen-puntadun transistorea). Gaur egun erabiltzen diren transistoreak, W. Sholckley-k proposaturiko juntura-transistoreen (n-p-n) antzekoak dira.

Transistoreen asmakuntzak, Mervin Kelly, Bell laborategietako lehendakariordeak 1945. urtean martxan ipinitako egoera solidoaren fisika arloko oinarriko ikerketa-programatik sortu ziren. Guda garaian erdieroaleen teknologian lorturiko aurrerapenak telefonoen zerbitzuak hobetzeko garrantzitsuak izan zitezkeela ohartu zen. Bereziki, amplifikagailu eta etengailu bezala erabiltzen ziren huts-balbulak eta rele elektromekanikoak, egoera solidoa tresnez ordezkatu nahi zituen. Horretarako buruan zeukan, egoera solidoa metodo kuantiko berriak eta teknika esperimentaletan lortu berri ziren aurrerapenak erabiltzea. Ideiak ez ziren nahiko, pertsonak ere behar

ziren, eta programa hau aurrera eramateko zientzialari teorikoak zein esperimentalak kontratatu zituen. Hau izan zen lehendabiziko aldia lantegi pribatu batean ikertzaile teorikoak eta esperimentalak elkarrekin lanean jarri zirenekoa, eta ondorioa itzela izan zen exekutibo argi horri esker.

Aipatu dugun bezala, solidoen teoria kuantikoa nahiko ongi ulertzen zen kristal idealetan. Erdieroaleen jokaera ezpurutasunek gidatzen dutela ere, kualitatiboki ezaguna zen. Bestalde, fisikokimikarien eta elektrokimikarien eskutik aurrerapen teknologiko galantak lortu berriak ziren hutsaren mailan, kristalaren hazkuntzan... Aurrerapen teknologikoak ezinbestekoak izan ziren transistorearen asmakuntzarako. Transistorearen asmakuntzak zientzia-teknologiaren eredu lineala, hots, ikerketa zientifikoak aurrerapen teknologikoa dakarrela, ez dela betetzen ziurtatzen du. Kasu honetan alde-rantzizkoa gertatu zen: aurrerapen teknologikoa ezinbestekoa izan zen zientziaren garapenerako, mende honen bigarren mendean lorturiko hainbat aurkikuntza zientifikotan gertatu den bezala. Beraz, transistorearen asmakuntzak gaur egun hain arrunta den prozesuari bidea eman zion. Hau da, hainbat aurkikuntza zientifiko aurrerapen teknologikorik gabe hutsalean geratzearena.

Aski ezaguna da transistorea informazio-mundu honen jatorria dela eta egungo bizitza transistorerik gabe ez litzatekeela posible izango. Baina, transistorearen asmakuntzak beste atal aipagarri bat ere badu, ikerketa zientifikoaren munduan, maila psikologikoan hain zuzen ere, eragin ikaragarria izan baitzuen. Sasoi horretan ikerketa zientifiko dotorea fisikaren ikuspegitik erreduzionismo bortitzean zetzan, hots, naturaren oinarritzko legeen aurkikuntzan, naturako indarren batasunean eta abar. Erredukzionismo bortitz horren aburuz, naturaren alderik bakunena lortuz gero, oinarritzko legeak hain zuzen ere, zientzia amaiturik dago, beraietatik dena lor baitaiteke. Erdieroaleei buruzko lanak eta antzeko ikerketek «zikinak» ziruditen hainbat ikertzailearen aburuz. Arrazoia zen, materialen purutasunak, kristalaren perfektotasunak, gainazalen garbitasunak eta horrelako faktoreek eragin itzela zutela neurketen emaitzetan, teoria bakunen arabera ulertzeko oso zailak egiten zituztenak. Transistorearen asmakuntzak ikertzaile asko erakarri zituen lan «zikin» hauetara, konplexutasunera, eta lehen aldiz zientzia «zikina» ikertzea harrotasuna sortzen hasi zen. Honen eraginez, mende honetan, egitura atomikoaren ikerketan aurrerapen itzelak suertatu dira. Transistorearen asmakuntzak konplexutasunari ateak zabaldu zizkion eta orduz gero, bakuntasuna/konplexutasuna binomioa, maila berean ageri da ikerketa zientifikoan. Beraien arteko lehia nabaria da finantziario mailan ere. Gainera, mende honek argiro erakutsi digu konplexutasunak, naturaren oinarritzko legeak aurrean ezinezko propietate/kontzeptu berriak sor ditzakeela.

Konplexutasunaren ikerketa zientifikoaren mendearren bigarren erdialdean nola bideratu den azaltzeko, bide askori eta adibide askori jarraitu zekiz-

kiekeen. Horretarako, ikuspegi orokorra ematen duten adibide jakin batzuk aipatuko ditugu. Lehen, supereroankortasunarena izango da, 50 urtez ulertu gabe egon zen supereroankortasunaren problematik abiatuko gara. Hala ere, esan beharra dago 1986. urtean aurkituriko eta hainbat itxaropen lortu dituen tenperatura altuko supereroankortasuna ez dela ulertzen.

SUPEREROANKORTASUNA*

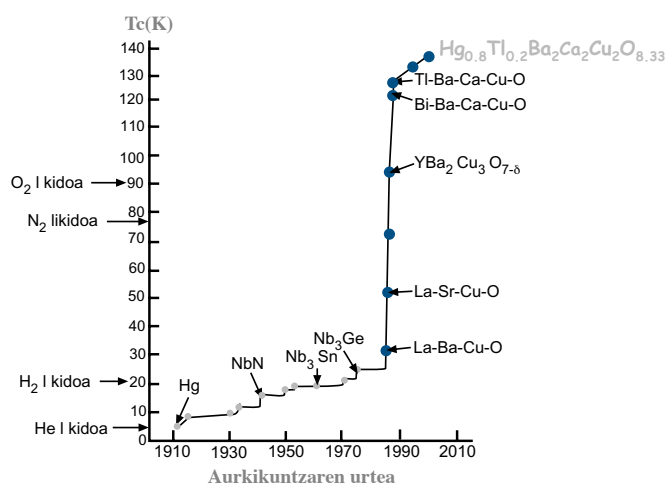
Heike Kammerling Onnes zientzialariak Leiden-go unibertsitatean 1908. urtean He gasa (egonkorrena) likidotzea lortu zuen, hots, $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ tenperatura jaitea lortu zuen. Handik hiru urtera, bere bizitza zuzendu zuen helburuari jarraituz, hots, «Neurketen bidez ezagutzara», merkurioa tenperatura batetik behera erresistentzia elektrikoa galtzen zuela aurkitu zuen, hots, supereroale bihurtzen zela. Hurrengo urteetan tenperatura batetik behera (Tenperatura kritikoa) propietate hori erakusten zuten hainbat metal elemental aurkitu zituzten. Hala ere, propietate berezi horrek ia 50 urtez esplikatatu gabe iraun zuen. Supereroankortasunaren inguruan hainbat aurrerapen eta fenomeno berri aurkitu arren, 1957. urtera arte itxaron behar izan zen John Bardeen, Leon Cooper eta John Robert Schrieffer zientzialariek BCS teoria plazaratu arte. Teoria honen arabera, supereroankortasunaren jatorria elektroi-bikoteen (Cooper-bikoteak deritzenen) kondentsazioan datza. Material supereroalean Cooper-bikoteek era koordinatuan higituz doaz eta higidura koordinatuak eragiten du energiaren galera eza. Kasu honetan, metaletan ez bezala, elektroi bakar batek ezin gal dezake energia ioiekin talka bat egin ostean, Cooper-bikote guztiek batera gal beharko lukete energia, eta horrek energia asko eskatuko luke; beraz, tenperatura kritikorearen azpitik elektroi-bikoteek energia galdu gabe, hots, erresistentzia elektrikorik gabe bidaia dezakete supereroalean barrena.

Supereroankortasuna oso garrantzitsua da hainbat ikuspegitatik, eta fenomeno hori tenperatura askoz altuagoetan gertatuko balitz, egungo gizartean iraultza teknologikoa ekar lezake. Ohar gaitezen etxeetako argi-indarra (elektrizitatea) sorlekuetatik (zentral elektrikoetatik) kableen bidez ehunka kilometro bidaiatu ostean gure etxeetaraino iristen dela. Bide horretan, berotasun moduan (Joule efektuaren bidez) energia asko galtzen da; izan ere, zentral elektrikoan sorturiko energia asko ($\sim 30\%$) bidean galtzen da eta horrek elektrizitatea garestia izatea dakar. Kable horiek, Cu-koak izan beharrean supereroaleak balira, zentraletan sorturiko energia elektriko osoa gure etxeetaraino iritsiko litzateke bidean ezer galdu gabe. Honek ekarriko lukkeen elektrizitatearen merketzea itzela litzateke, hots, energia elektriko askoz merkeagoa litzateke.

* EKAI Ak eroaltasuna eta supereroaltasuna hobesten ditu.

Berotasun-galerak kaltegarriak diren beste hainbat arlok ere ikaragarrizko abantaila jasoko lukete, adibidez konputagailuen ahalmena eta abiadura nabariki handituko lirateke. Baina arazo bat dago BCS teoriak esplikatzeko dituen supereroaleen tenperatura kritikoa, hots, tenperatura horren azpitik superoale-egoeran ipintzen dituen oso baxua da. 1985. urtean ezagutzen zen tenperatura kritiko altuena $-250\text{ }^\circ\text{C}$ -tara iristen zen, hots, oso baxua zen erabilpen praktikoetarako. Hala ere, gaur egun supereroaleak oso erabiliak dira eremu magnetiko handiak lortzeko eta adibidez, hain ezaguna bihurtu zaigun erresonantzia magnetiko nuklearreko gorputzaren irudiak egiteko bide ia bakarra da: eremu magnetiko bortitzak sortzeko harila supereroaleen tenperatura hain baxua, $-269\text{ }^\circ\text{C}$, erabili behar denez, gorputzaren erresonantzia-irudiak oso garestiak dira. Halaber, eremu magnetiko bortitz horiek ikerketa handian (large facilities) zein txikian (ikerketa-laborategi arruntak) oso erabiliak dira. Ikerketa handiaz berba egiten denean, azeleragailu handiez ari gara, horietan partikulen higidura kontrolatu egin behar da partikulen arteko edota partikula antipartikulen talkak sortzeko (colliders), erradiazio elektromagnetikoa sortzeko (sinkrotroiak)... Fusio-proiektuek ere, plasmak (partikula positiboez zein negatiboez osaturiko sistema neutroa) ehunka milioiko tenperaturetan mantentzeko (izarretan bezalaxe, nukleoaren arteko fusio-erreakzioak gerta daitezkeen) eremu magnetiko bortitzek sor dezaketuen partikula kargatuen konfinamendua gerta dadin, supereroaleak behar dituzte.

Hainbat ikertzailek lana gogotik egin dute supereroankortasunaren tenperatura kritikoa altxatzeko. Urtetan ahaleginak hutsalak izan ziren: 30 urtetan tenperatura kritikoa 8 gradu besterik ez zuten igotzea lortu. Bat-batean,



6. irudia. Supereroaleen tenperatura kritikoren hazkuntza XX. mendean barrena.

supereroankortasunean ikertzen ari ziren taldeak gero eta gutxiago zirenean, 1986. urtean hain zuzen ere, Georg Bednorz eta Alexander Müller-ek tenperatura kritikoa $-230\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra igo zuten oxido keramiko konplexu bat erabiliz. Une honetan, giro-tenperaturara hurbiltzeko asmoz, tenperatura kritikoa altuagoko supereroaleak aurkitzeko lasterketa bortitza hasi zen munduko laborategien artean (ikus 6 irudia). 1987. urtean tenperatura kritikoa $-182\text{ }^{\circ}\text{C}$ -raino igo zen, marka oso garrantzitsua da, tenperatura hori nitrogeno likidoaren tenperaturaren ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) gainetik geratzen baita eta nitrogeno likidoa lortzea erraza eta merkea baita. Egun supereroankortasunaren tenperatura kritikoa altuena $-135\text{ }^{\circ}\text{C}$ tenperaturan dago (HgTlCuO konposatuan), oraindik giro-tenperaturatik urrun, baina mende honetan, beharbada, giro-tenperaturan ere material supereroaleak izan ditzakegu, beraiek ekarriko dituzten onurekin.

Tenperatura altuko supereroankortasuna ezin da BCS teoriaren bidez azaldu. Material berri hauekin, berriro ere ezjakintasuna dator, ez baitakigu tenperatura altuko supereroankortasunaren fenomeno gidatzen duen fisika zein den. Supereroankortasuna berriro ere, 90 urte pasa eta gero, ulertu gabeko problemen kutxan kokatu behar izan da. Problema honetan, agerian dago konplexutasunak fisika berria sortu duela, baina oraindik ez dakigu zer den azpian dagoena.

TEORIA ELEKTRONIKOAREN AURRERAPENAK

Aurretik aipatu dugun bezala, Schrödinger-ren ekuazioak emaitza ezin-hobeak eman zituen Hidrogeno molekularen eta Helioaren espektro atomikoak azaltzen. Argi geratu zen ekuazio hori eta berarekin bat zetorrena bide zuzena zirela egitura atomikoari aurre egiteko. Arazo bakarra, materia errealarari aurre egiteko ezintasunean zetzan, hots, 10^{23} atomo kopuruko sistemak handiegiak zirela Schrödinger-ren ekuazio xumearekin aurre egiteko. Hala ere, ikertzaileek irudimena erabili zuten eta maila kuantitatiboan gai ez izan arren, maila kualitatiboan, hots, fenomenoaren ulermenean lorpen garrantzitsuak izan zituzten.

1964-65 urteetan jauzi garrantzitsua eman zen egitura atomikoaren teoriarik. P. Hohenberg, W. Kohn eta L. Sham Dentsitate Funtzionalaren Teoria (DFT) garatu zuten eta harrezkero, konputagailuen muga ahanzi gabe, bidea zabalik dago oinarritzko printzipioen bidez, parametro esperimentalik erabili gabe, egitura atomikoari dagozkion kalkulu kuantitatiboak egiteko. Egun elektro- eta spin-dentsitateak, oinarritzko energiak, gelaska-parametroak, gainazal-energiak, fonoiaren sakabanaketak, momentu magnetikoak... esperimenduekiko %1-%20 erroreaz egin daitezke. Gainera, egun teknika teoriko hauek oso erabiliak dira fenomeno edo propietate berriak aurreratzeko. Berriro ere diot, konputagailuen ahalmenaren muga ahazten badugu, edozein sistema konplexu eta makroskopikoren azterketa mikroskopikoa

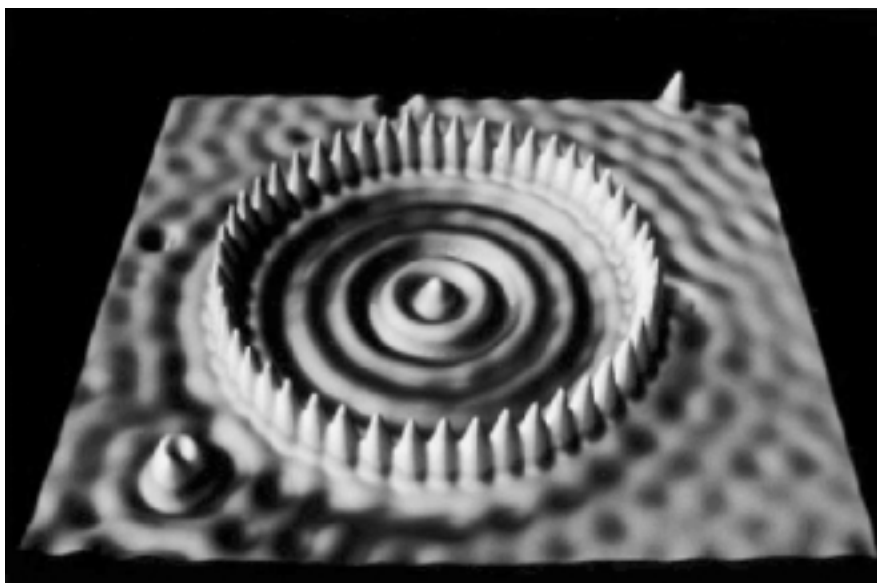
elektroien mailan eginik, material horren propietateak aurrean zitezkeen, sistema biologikoenak barne. Esan beharra dago, konputazio elektronikoa arlo mugatu eta berezia bezala garatu dela, funtsezko teoria eta esperimenteren artean. Mende berri honen hasieran, hainbat taldek konputazio elektronikoen bidez, oinarritzko materia biologikoarekin ikerketan dihardute.

INGENIARITZA KUANTIKOA

XX. mendeko 70.eko hamarkadan abiatuak, ingeniari-kuantikoak eta miniaturizazioak garrantzi handia lortu dute gure gizartean. Izan ere, XX. mendean gainazalen zientzia edo orokorrago bi dimentsioko (2D) zientzia iraultza itzela suertatu da. Horren arrazoia, berriro ere teknologian datza. Mende honetan huts-teknologia, 0,0001 torr mailatik 0,0000000001 torr mailara iritsi da, atomo eta molekulen deposizioa ere doitasun maila itzelerara iritsi da. Honen ondorioz, Molekula Sorten Epitaxia Teknikak (MBE) substratu baten gainean atomo-geruzak banan-banan eraiki ditzake, osaera %1-eraino kontrolatuz. Gainera elektroien litografiari esker, era horretan eraikitako materialen gainazalaren eite edo forma desberdinak irudika daitezke. Beraz, erdieroaleen edota material magnetikoen arteko heteroegiturak eta eite desberdinetako gainazalak eraiki daitezke. Hala ere, deigarriena beraien neurria da. Gaur egun, konputagailuetako «txip»-etan ipintzen diren transistoreek 0,2 mikrometroko albokoak eduki ditzakete, hots, 200 nanometrokoak. Honi atxikitu behar zaio azken 20 urteetan miniaturizazioak konputagailuetan eragin duen memoriaren handipen itzela. 1992. urtean, IBM konpainiak 100nm-ko alboa zuen MOSFET transistore bat (gure ordenagailuetan erabilienetakoa) eraiki zuen, informazioa metatzeko ahalmena 16Mbit-etik 4 Gigabit-era handituz. Gauza hauek ez dira mugatzen konputagailuetako transistoreetara, neurri-maila horiekin beste hainbat tresna kuantiko eraikitzen dira, adibidez putzu kuantikoak, laser-diodoak...

Gaur egun, beste neurri-escala bat definitu berri da, nanozientzia/nanoteknologiarena, hain zuzen ere. Neurri-escala 1-100nm tartean dago eta eraikitakoa 1, 2 edo 3 dimentsiokoa izan daiteke. Aipaturikoa garrantzitsua bada ere, Ingeniaritza Kuantikoa oraindik ere urrunago iritsi da, atomo soili behatzeaz gain manipulatu ere egin ditzake. Bai!, banan-banan manipula ditzake!. Zientziak eta teknologiak hasi berri dute mundu berri honetan, baina argiro XXI. mendean jarraipen sendoa izango duela. Hau guztia G. Binnig eta H. Rohrer zientzialariak 1981. urtean garaturiko Ekorketako Tunel Mikroskopioarekin (STM) hasi zen. STM mikroskopioa mekanikoki posizionatua eta elektrikoki sentikorra den *hartz* nanometrikoa da, berarekin atomoak, molekulak edo beste objektu txikiak «ikus» edota atomoekin banan-banan «jolas» daiteke. Boladan dago 7 irudiko elektroien itxitura kuantikoak eraikitzea. Irudian, kobrezko azal baten gainean 48 burdin atomo eraztun bat osatzen dute (12,5 nm-ko erradioa duena) eta STM berare-

kin lorturiko irudian oso ondo ikusten dira «olatu» batzuk eraztunaren barruan. «Olatu» horiek kobrezko azalaren elektroioak dira beraien uhin itxura argi adieraziz, horregatik eraikuntza hauei elektroien itxitura kuantikoak esan ohi zaie. Baina, atomoz atomo eginiko munduko mapak, hizki arraroak edo beste zenbait gauza aurki daitezke. Beraz, baiezta daiteke atomo, molekula eta nanometro mailako objektuak ez direla ukiezinak.



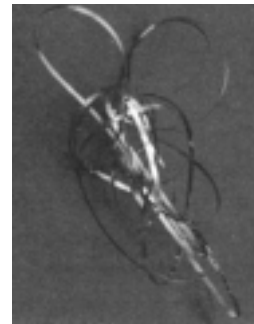
7. irudia. Elektroien itxitura kuantikoa. Kobrezko gainazal baten gainean 48 burdin atomok, banan-banan kokatuta, 12,5 nm-ko erradioa duen eraztun bat osatzen dute. Barneko «olatuak», kobrezko gainazaleko elektroioak dira, eta beren uhin itxura argiro adierazten dute.

STM-ren bidez ikertzen den hainbat sistema, gainazaletako katalisis-erreakzioak edo erreakzio kimikoak, maila atomikoan gertaturikoak dira. Beraz, maila nanometrikoan ezin bereiz ditzakegu gehiago fisika eta kimika: biek bat egiten dute. Are gehiago, oinarritzko material biologikoa ere, DNA, lipidoak, proteinak... maila nanometrikokoak dira eta goian aipatu den bezala, XX. mendearen amaieran material biologikoen egitura eta beraien arteko elkarrekintzak modelatzen hasi ziren. Horretarako garrantzi handia izan dute STM mikroskopia eta agertu berri diren antzeko beste hainbat mikroskopia motak. Beraz, zalantzarik gabe maila nanometrikoan Fisika, Kimika eta Biologia bat egiten dutela baiezta dezakegu. Mende honetan, konputagailuen ahalmenaren handipenaren eskutik, hiru zientzien arteko harremanak bat egingo du are gehiago maila nanometrikoan.

DESORDENA AZALTZEN DUTEN MATERIALAK

Aurreko ataleko azken paragrafoan izan ezik, material ordenatuei buruz berba egin da. Max Von Lauek 1912. urtean X izpiak solido batez difraktatuak zirela aurkitu zuen, eta agerian utzi zuen solidoak atomoen egitura ordenatuak direla, hobeto esanik, atomoen kokapenetan egitura-periodizitatea erakusten dutela. Honaino material ordenatuei edo periodikoei buruz eztabaidatu da. XX. mendean ere, materiaren periodizitate faltak sortzen dituen propietateen garrantziaz jabetu ziren.

Periodizitate falta, hainbat mailatakoa izan daiteke. Periodizitate falta txikia izan daiteke, atomo bat bere tokian ez dagoenean (hutsunea, interstiziala...) gertatzen den bezalakoa. Periodizitate falta txiki horrek garrantzi handia izan dezake materialaren propietateetan, erdieroaleen propietate optikoetan adibidez. Periodizitate falta handixeagoa ere izan daiteke, atomo-lerro bat falta izateagatik (dislokazioa) gertatzen dena adibidez. 60.eko hamarkadako 2CV autoen txapa ahulak gogortzeko txaparen materialean dislokazioak sortzen ziren (gogoratu txaparen kurbadurak) deformatuz eta era horretan materiala gogortuz. Beste muturrean periodizitate falta osoko materialak daude. Desordena osoa duten material amorfoak, hain zuzen ere (ikus 8. irudia). Material amorfoek erakusten dituzten propietateak, osaera bereko material ordenatuekiko erabat desberdinak izaten dira. Material hauek gero eta erabiliagoak dira, adibidez bankuko txarteletan gu identifikatzeko.



8. irudia. FeNiSiB amorfoaren sorrera. Osaera horretako likidoa, biraka oso arin dagoen kobrezko gurpilaren gainera erortarazten da. Era honetan, 1.000.000 gradu/s-ko hozte-abiadura jasanda, likidoa oso arin solidotzen da, eta atomoen kokapena likidorenaren antzekoa delarik, atomoen kokapenean periodizitate falta osoa erakusten du.

Periodizitate falta duten materialen beste atal garrantzitsu bat material polimerikoena da, betiko material metalikoak autoetan ordezkatzeko ari direnak edo aspaldidanik arropen artilea ordezkatu dutenak. Material hauek,

egitura-materialtzat hartu dira, eta aplikazio horietan erabili eta erabiltzen dira, baina azken urteotan material hauek eroaleak edo erdieroaleak izateko edo eroale modura jokatzeko diseina daitezke (Kimikako azken Nobel saria polimero eroalea lortu zuen taldearen buruari eman diote) eta mende honetan gaurko erdieroaleei eta material metalikoei konpetentzia handia egingo diete.

Aipatu beharra dago oinarrizko printzipioetatik abiatutako teoria oraindik urrun dagoela, material hauetan periodizitate faltak arazo larriak eragiten baititu material hauen kalkulu elektronikoak egiterakoan. Edonola, konputagailuen ahalmenaren handipenarekin, XXI. mendean fenomenologiatik auresankortasunera pasatzeko bidea zabalduko dela pentsa daiteke.

ONDORIOA

Aurreko lerroetan, konplexutasunak duen garrantziaz aritu gara. Naturaren oinarrizko lege guztiak ongi ezagutu arren, unibertsoa oso-osorik ezin berreraiki daitekeela azaldu nahi izan dugu. Azken mendeak hori, argi eta garbi erakutsi digu, hots, oinarrizko legeek ezin auresan ditzakete naturak gordetzen dituen hainbat fenomeno eta kontzeptu. Hau guztia borbiltzeko, Phil Anderson fisikako nobel saridunaren hitzekin amaituko dugu «More is Different».

BIBLIOGRAFIA

Gaiari buruzko testu orokor batzuk ondokoak dira:

- BEDERSON, B., Guest Editor, 1999. «Special Issue in Honor of The Centenary of the American Physical Society, March 1999», *Review of Modern Physics*.
- LAURIE, B., PAIS, M.A., PIPPARD, B., Editors, 1995. *Twentieth Century Physics*, Institute of physics, Philadelphia.
- RIORDAN, M. and HODDESON, L., 1997. *Crystal Fire: The Birth of the Information Age*. (W.W. Norton, New York).
- BINNING, G. and ROHRER, H., 1987. «Scanning Tunneling Microscopy-from Birth to Adolescence» (Nobel Lecture) *Rev. Mod. Phys.* **59**, 615.
- CHAIKIN, P. and LUBENSKY, 1995. *Principles of Condensed Matter Physics*. Cambridge University, Cambridge, Englands.