

Materiaren misterioak

Pedro M. Etxenike

1. Sarrera

Historian zehar, bi izan dira batez ere, gizakia materia ulertzen saiatzera bultzatu duten arrazoiak: alde batetik, jakinmin hutsa, Ezaguera hain zuzen ere, eta bestetik, bere ongizaterako materia erabili eta kontrolatzeko desioa. Aztertu behar dun gaiak, materiaren definizioak alegia, aldaketa asko jasan ditu historian zehar; elementu oso konkretu eta objektu oso jakinetatik hasi eta askoz ere eskurezinago diren, hala nola argi ikuskorra eta beste erradiazio-motak, beste kontzeptu batzuetaraino.

Materia ulertzeaz hitzegiten dugunean, materiak pentsa daitekeen baldintza guztietan har ditzakeen formak eta jokamoldeak ezagutzeaz ari gara, eta ezpairik gabe, baita fenomenook baten eta deskribatzen dituzten legez ere. Ezaguera zientifiko hau, zientzia alegia, da materiaren ezagutzan aurrera eginez, baldintza berrietan beraren jokamoldea auresatea posible egiten

duena; aldi berean, zein materi mota berri sor daitekeen esango digularik. Bestetik, bere forma eta erabilpenak kontrolatzea teknologiak egingo digu posible.

Fisika, materiaren alderdirik oinarritzkoenak aztertzen dituen zientzia da. Fisikaren eremua, oinarritzko partikulen alorreko distantzia azpinuklearretatik hasi eta kosmos neurtezineraino hedatzen da; denboraren eskala bestetik, segundo-bililoiren edo -trililoirenetik unibertsoaren adinera arte doa.

Eskala horietan barna fenomenoak aztertzeko, gero eta metodo ahaltsuagoak diseinatzea izan da Fisikaren helburu eta lorpenetariko bat; eta era berean, behaketok koherenteki azaltzeko teoriak sortzea ere bai. Norbaitek zuhurki esan duenez, materialari buruzko gure ikuspegiak sakontzeak eraginkorki aldarazi du gizateriaz dugun ikuspuntua. Fisikaren oinarritzko hipotesia, kanpo-munduan ordena badagoela eta giza-gogoak uler dezakeela alegia, egungo pentsamoldearen muinean dago, neurri handi batean bederen. Bestalde fisikak, teknologia berriak sortuz eta hurbileko zientziak eraginez, gure gaur eguneko bizimodua (mundu garatu izenekoan, behinik behin) aldatzen lagundu du, gizakiaren historian zehar orain artean ezezagunak izan diren kon forta eta aukerapen-askatasuna ekarriz.

Fisikak gaur eguneko gizarte modernoa moldatzen eraginkorki parte hartu du; oinarritzko fenomenoak azaltzeko egin dituen saioekin Naturari buruzko gure ikuspegiak zabaldu egin du eta gainera, asmakuntza liluragarriak eragin ditu.

Aurrerapen horren bidea auresanezina da, baina fisikaren historian adibide argirik badago. Maxwell-en lanari esker fenomeno elektromagnetikoen ezaguera sakona lortu dugu. Horren bitartez, irrati-uhinak eta plasmak ulertu ditugu alde batetik eta bestetik, itxuraz, baina itxuraz bakarrik, elkarretik hain urrun dauden airearen gardentasunari edota eguzki- eta izar-oreka zuzentzen dituen energi garraio erradiaktiboari buruzko erantzunak jabetzi ditugu. Teoria elektromagnetikoa irratiaren, telebistaren eta radarraren aurkikuntzen atzean dago, eta sare industrial

handien eta komunikazio-sistema modernoen sorkuntza egin du posible. Izan ere, gaur egun Maxwell-en aurkikuntzarekin erlaziorik ez duen bizimodu modernoaren alderdirik ez aipatzea zaila da.

Fisikaren aurrerabide auresanezinak zein neurritaraino eragiten duen gizartea, mekanika kuantikoaren adibidea ipiniz azal daiteke argikiro. Neurketa-prozedurari buruzko gure kontzepturik oinarritzkoenak irauli zituen mekanika kuantikoak eta solido, molekula eta atomoen egiturak ulertzeko ateak zabaldu zituen. Mekanika kuantikoa onartuta dago jadanik egun; oinarri-oinarritzkoa da; ez fisika-alorrean bakarrik, baita kimika, biologia eta beste hainbat zientzian ere. Ezaguera hutsetik landa, industria berrien sorkuntzara eramán gaitu mekanika kuantikoak, erdieroaleen industria eta komunikazio optikoak esaterako. Gainera, teknologiarri bide berri asko ireki dizkio material edo tresna berriak, hala nola laserra, sortuz.

Adibideak ez dira honekin amaitzen, ordea. Duela hogeitahogeitamar urte, zeinek pentsatuko edota igerriko zukeen, astrofisika eta kosmologia urrezko garaiaren atarian zeudenik; eta Unibertsoaren sorreraz eta geroaz deskripzioa osatzen ari direnik. Ordenadoreen iraultzak zeharo aldatu egin du gaur eguneko bizitza. Medikuntzan oinarri-oinarritzkoak diren hiru zientziak, biofisikak, biologia molekularrak eta fisiologiak alegia, fisikatik ateratako kontzeptuak eta teknika esperimentalak erabiltzen dituzte. Medikuntza nuklearra, erradiazio-terapia, X izpiko tomografia eta laserraren bidezko zirugia dira, besteak beste, fisikak medikuntzari eginiko ekarpenak.

Herri garatuetan, robotikaren eta informazioaren garaián gaudelarik, teknologia aurreratua hazkunde ekonomikoaren in-dar eragilea da zalantzarik gabe. Munduko herri askok, populazio-hazkuntzak, ingurugiroaren hondamenak eta material berritezinen agortzeak jarritako erronkari aurre egin behar diote. Mundua pakean biziko bada, irtenbidea aurkitu behar zaie arazo horiei. Oinarritzko zientzia behar-beharrezkoa da teknologian eta

Fisikak gizartearen geroan jokatuko duen papera erabakikorra izan daiteke.

Aurreko pasartearen esandakoan gehiago sakondu barik, Fisikak, mundua deusesteko edo hobea goetzeko baliabideak jarri dituela gizakiaren eskuetan azpimarratzea, ez da gehiegikeria izango akaso. Baliabide horiek zuhertasunez nola erabili, gure gizartearen erronkarik larriena da. Zer egin eta nola egin, lan honen irispidetik eta nire ezagueratik kanpo dago, noski. Alabaina, gai zientifikoetan hezitako publikoa eta arazo zientifikoez eta irtenbide teknikoiez egoki informatutako lidergo politikoa ez liratekeela kaltegarriak izango esatean, ez nenbilke oker.

2. Materia. Sinpleenetik konplexuenera

Materia ezaguna bere osagairik oinarritzkoenetara mugatzea, filosofo grekoek finkatutako joera berau, inoiz aldatu ez den kontzeptua izan da historian zehar. Bi mila urte pasatu ziren Tales grekoaren eta Dalton ingelesaren artean, azken honek atomoaren existentzia baieztatu arte alegia, eta ehun urte geroago soilik, 1909.ean, Rutherford-ek atomoaren oinarritzko antolamendua finkatu zuen. Hogeitamarren hamarkadan nukleoak ondo ulertzea lortu zen eta gaur egun, partikulen fisika¹ zientzia bihurtu da bera bakarrik.

Materiaren egituraren bada jerarkia bat. Kuarkak, gero atomoak sortuko dituzten neutroiak eta protoiak osatzeko erabiltzen dira. Atomoak berriz, molekulak edo kristalak eratzeko konbinatzen dira eta azken hauek ondoren, inguratzen gaituen materia osatzen dute. Eskalatik gora joanez gero, planeta-sistematarra, izar-multzotara eta azkenik galaxiatara abiatuko gara.

Gizakia, modu batera edo bestera, jerarkia horren erdi-aldean dago. Atomoentzat izarra gara eta izarrentzat atomo. Txikitatsun ikaragarri horretatik, Naturaren funtsezko oinarriaz galdeztzen dihardugu gizakiok.

Unibertsoaren sortze-uneaz, zientzi ikuspegitik hitz egiten hasi gara. Naturan diren lau oinarrizko indarrak teoria bakar batean biltzeko posibilitatea ikusten hasi gara. Horretan, kosmologiak eta oinarrizko partikulek bat egingo dute. Alberto Galindoren esanetan: "Goi-mailan, inoiz ez dira konbinatu handitasuna eta txikitasuna; kosmologia eta oinarrizko partikulak, Leherketa Handiaren² Alfa eta materiaren desintegrazioaren Omega". Aurrerakuntza zientifikorako beste bide bat, materiaren ezaguerari buruzko aurrerapena da; materia kondentsatuaren fisikan sakontzea hain zuzen ere. Materia kondentsatuaren fisikak, materialen czaugarri makroskopikoak beren osaigaiek betetzen dituzten legeetan oinarriturik ematen ditu.

Materia ezagutzen eta erabiltzen dugun ohizko baldintzen eta materia kondentsatuaren zientziaren kasuetan, osagaien elkarrekintzak gobernatzen dituzten legeen bidezko ezaugarri makroskopikoen azalpenean, lau legeetatik bat bakarrik da inportante. Laburtuz, materia kondentsatua lege fisiko bakar batek, Coulomben legeak³ hain zuzen ere, gobernatzen duela esan dezakegu. Hori eta Pauliren eskusio-printzipioa⁴ dira materia kondentsatuaren eta bizia beraren zutabeak. 10^{25} atomo hurbiltzen direnean, sistema solido konplexua sortuz, gorago aipatutako bi legeekin zerikusirik ez duten "lege"-mota berri batzuk sortzen dira. Kantitatea kualitate bihurtzen da. Kualitate horiek ulertzea da egoera solidoaren fisikaren helburua.

3. Materia kondentsatuaren fisika

1950 eta 1960ko hamarkadetan, solido kristalinoen propietate elektronikoak aztertu zituzten fisikariek eta metal sinpleen, isolatzaileen eta erdiekoaleen propietate optikoen, garraio-mekanismoen eta energi maila elektronikoen ikuspegi nahikoa osatua eman zuten.

Gaur egun, 1970eko hamarkadan hasitako joerari jarraituz, materia kondentsatuaren fisika eta materialen zientzia gainazalez

eta interfaseez, sistema desordenatu eta fluktuazio handiko sistemez ari dira.

Azken urteotan ere, oinarrizko zientzian kontzeptu berrien iturri izaten segitu du materia kondentsatuaren fisikak. Neutroi-izarren jokamoldearen azalpena, erdieroale, supereroale eta magnetismoaren ulerkuntzan sakontzea, materiaren egoera berri bat, helio(3)aren fase superfluitua alegia, aurrestea eta aurkitzea dira besteak beste, ekarpen horren adibide.

Tenperatura altuko supereroankortasuna edo horrenbestetan aldarrikatu den fusio hotza ez eta, Donostian iragarri den fusio epela (cluster fusion) bi desafio berri gertatu dira.

Materia kondentsatuaren fisica da zehazki, teknologiaren aurrerapenekin zerikusi zuzenena duen fisikaren alderdia, hegazkinetako motoretatik hasi eta ordenadoreetaraino. Kontzeptu-aurrerapen berriak, Naturan aurkitzen ez diren substantzia berriak sortu nahian egiten ari dira. Horrelako substantzia batzuk teknika esperimental berrien bidez egiten dira, hala nola likidoak bapatean egoera solidoraino hoztuz edo materia berria egiteko atomoen jalkipen kontrolatua geruzaz geruzaz eginez. ■

4. Tenperatura altuko supereroankortasuna

Supereroankortasun tradizionalak, mende hasieratik ezagutzen denak, eremu magnetikoaren kanporatzea (Meissner efektua⁵) eta erresistentzia elektriko eza zituen oinarri eta zenbait materialek ageri zituzten berezitasun horiek oso tenperatu baxuetan, zero absolutik (-273° C) gertu. Material horien jokamolde bitxiari azalpena aurkitzeko berrogeitamar bat urte behar izan ziren. Supereroankortasuna, Holandan 1911.ean aurkitu zen eta 1957.a arte ez zuten J. Berdeen, L. N. Cooper eta J. R. Schrieffer-ek bere teroia plazaratu. Supereroankortasunaren mekanismoa azaltzen duen teoria honi BCS teoria deritzo.

Urte luzetan zehar, tenperatura kritikoa (hortik gora materialak supereroaltasuna galtzen du) 30K-etik (-243° C-etik) gora pasatzea ez zen lortu.

Azken urteotan, izugarrizkoa izan da gertatuako aldaketa. 1986.eko Urtarrilean, Müller eta Bednorz-ek, Zurich-eko IMBren laborategian, bario-, kobre- eta lantanao-oxidoz osatutako zeramika 35K-etan supereroankortasuna erakusten zuela aldarrikatu zuten. Beren lanak 1987.eko Fisikako Nobel Saria jaso zuen eta garai berri bat zabaldu zuen supereroankortasunaren alorrean. Urtebete pasa aurretik, zenbait taldek, Tanaka (Tokio), Txu (Houston), Tsao (Beijin) eta Batlogg (ATT Bell Labr.), emaitza liluragarriak erakutsi zituzten eta lur arraroak dituzten oxido ternarioen bidez supereroankortasunaren muga 90K baino gorago igo zuten.

Lehenagoko materialekin dagoen diferentzia kualitatiboa da. 90K-eko tenperatura oso erraz lortzen da, nitrogenu likidoa erabiltzea aski bait da. Elementu honen gas-likido trantsizioa 77K-etan dago eta adibidez, esnea bezain merkea eta ugaria da⁶.

Temperaturako altuko supereroaleen aplikazioak, supereroale zaharren berdin-berdinak dira gutxienez, baina aldi beran askoz ere merkeagoak dira, zalantzarik gabe. Orain arte biderezinak ziren proiektuak bideragarri bihurtu dituzte tenperatura altuko supereroaleek. Besteak beste, aplikazio hauek izan ditzakete material hauek:

1. Energia elektrikoaren produkzioa, garraioa eta metaketa.
2. Dispositibo elektriko azkarrak.
3. Ordenadoreak.
4. Irudi magnetikoa medikuntzan.
5. Eremu magnetiko handiak. Honek fusio nuklearari lehio berriak zabaltzen dizkio⁷.

Supereroaleen aplikazioak aipatu ordez, garrantzitsuagoa izan daiteke, dena dela, aplikaziorik inportantenei susmorik ere

ezin diogula hartu esatea. Transistorearen aplikaziorik inportanteena diodoak ordezkatzeari izango zela pentsatu zen garai batean, zirkuito integratuaren posibilitatea aipatu ere egiten ez zelarik.

Bestetik, urteetan Laserra arazo baten bila zebilen soluziotzat jo zen; gaur egun, teknologia eta kultura modernoaren zati da. Horrekin, tenperaturako altuko supereroankortasunak pentsaezinezko fruituak eman ditzake.

5. Sistema desordenatuak

Materialen egitura elektronikoa eta atomikoa eta beraien propietateen ikerketa, materiaren azterketaren zati garrantzitsua izan da 1960ko hamarkadatik hona. Hamarkada horretan, pseudopotenzialen teoriaren garapenak eta dentsitate funtzionalaren metodoak, materialeen egitura elektronikoa kalkulatu korapilotsuak errutinazko lan bihurtu zituzten. Horrela, ikerketa-arlo berriak azaldu dira non sistema kristalinoak ezaugarritzen dituen simetria hausten bait da. Hauek sistema desordenatuak eta gainazalak dira.

Hamarkada honetan, sistema desordenatuen (aleazio desordenatuen eta beirez adibiden) egitura elektronikoa joandakoan hasitako ikerketa aurrera doa. Horrela, material horien propietate intrintsekoak ikertzen hasi dira. Propietaterik lilugarriena lokalizazio izenekoa da: elektroioak material osoan zehar erraz higitu ordez, atomoen inguruan lokalizatzen dira. Esperimentalki, geometria bidimentsionaletan nabarmenkiago azaltzen da propietate hori, zeinetan maiz, eroankortasun elektrikoaren portaera ez-klasikoa bait dago.

Garrantzi itzelezko material desordenatua, beira da. Beiratrantsioaren oinarrietz gutxi dakigu eta beiraren egitura elektronikoa bera misterioa da. Ordenadoreak hura argitzen lagun gaitzake, baina agian, ordenadorea helburu horretarako erabili aitzin, beiraz gehiago jakin beharko dugu.

6. Gainazalak

Gainazalei eta sistema kristalinoei buruzko ikerketa-lanek ez dute modu berean eboluzionatu. Sistema kristalinoetako atomoen sare-posizioak X izpiko difrakzioaz ebatzi ziren, kristalaren egitura elektronikoa ezagutu baino askoz ere lehenago. Gainazalen kasuan aldiz, fotoemisio-teknikek, hau da argiaz igorritako elektroien azterketek, gainazalen egitura elektronikoaz informazio asko eman dute. Gainazalen egitura etomikoaz, etomok gainazalean duten posizioez alegia, dakiguna gutxiago da ordea. Gainazaletako atomok higidurazko askatasun-maila handiago dute solidoetakok baino eta ondorioz, egitura oso konplexu eta interesgarriak izaten dituzte.

Gainazalen egiturak eta berauen aldaketak aztertu eta ikerketzeko teknika esperimental berriak garatzen ari dira. Horien artean aipagarrienak hauek dira: tunel-efektuzko mikroskopioa, sinkrotroi-erradiakzioaren erabilpena⁸ eta atomo eta ioien gainazalekiko elkarrekintzez baliatzen diren zenbait metodo. Bestalde, gainazalak aztertzeko ohizko metodoa, energia baxuko elektro-difrakzio izenekoa (Low Energy Electron Diffraction), oso hobatua izan da. Oinarritzko zientzia eta tresnagintzaren arteko erlazio sinbiotikoaren beste adibidetzat zera aipa genezake: goian aipatutako aurrerapenak, ultragoi-hutsezko teknologiarik eta ordenadoreek eskaintzen duten kontrol-ahalmenik gabe ezin izango zirela gauzatu.

Gainazalen oinarritzko fenomenoaren ezagutza bizkor hedatu da. Ordenadore berrien kalkulu-ahalmenari esker, kalkulu-teknika berriak garatu dira. Horrela orain, atomoen zenbait posiziotarako egitura elektronikoa kalkulatu daiteke eta ondorioz, konfigurazio desberdinen egonkortasun erlatiboak ere konparatu daitezke. Beraz, orekazko atomo-posizioak ebatzi daitezke, gainazal sinpleen kasuan bederen.

Gainazal garbi ondo ezaugarrituak prestatzeko teknologiaren eboluzioak, atomoz-atomozko jalkiketa kontrolatua egin ahal

izatea posible bihurtu du. Atomo dezberdinez osatutako geruzak gradualki bata bestearen gainean ipiniz, artifizialki egituratutako material-mota berriak egin daitezke. Material horien adibide klasikoak galio artseniurozko geruzak eta galio eta aluminio artseniurozko geruzak tartekatuak dituzten materialak dira.

Geruza desberdinek ezaugarri elektroniko oso diferenteak dituztenez, geruza anitzeko materialek jokamolde elektroniko erabat berria darakusate. Esate baterako, elektroi higikorrek geruza-mota jakin batean bakarrik higitzea behar daitezke. Ondorioz, elektroiak bi dimentsiotan bakarrik higitze daitezke. Horrelako materialez, laser erdieroalearen moduko tresna berriak egiten dira. Bi dimentsiotan higitzera mugatuta dauden elektroi higikorrei buruzko ikerketek, Hall efektu kuantikoaren aurkikuntza ekarri dute. Gainera, 1980.eko hamarkadan sistema bidimentsionaltan harrapatutako elektroi-sistemen ezaugarriak ego-kiro azaldu dira beroiek gainazalarekin duten elkarrekintzaren bidez.

7. Materialen zientzia

Disziplinarteko alor honen helburu nagusiak, materialen azterketa sistematikoa egitea, eta beroriek kontrolatzeko, modifikatzeko eta mota berriak egiteko teknikak garatzea dira. Fisikak, egitasmo horri aurrera egiten, oinarritzko teoriaren bidez laguntzen dioñ; material berrien teoriaren bilakera azkarraren bidez esaterako. Aldi berean, tresna esperimental berriez ere, hala nola sinkrotroi-erradiakzioaz edo elektroi askezko laserraz lagundu egiten dio. Erdieroale ultrapuroak egiteko teknikarik gabe, mikroelektronikoa ez zen esistituko.

8. Artifizialki egituratutako materialak

Material hauek, eratze-prozesuan edota geroago egituratuak izan dira naturan esistitzen ez diren dimentsioak edo ezauga-

rriak izateko. Material hauek egiteko tekniketako bat MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) delakoa da. Teknika honen bidez, molekula-sorta bateko molekulak banan bana jalkitzen dira materiala osatzeko. Aurrerapen teknologiko hau giltzarria da eta oinarrizko zientzian eragin nabarmena dauka. Izan ere, supersare periodikoak, beraien geruzetan erdieoroale desberdinak, edo metal desberdinak, edo erdieoroale eta metalak txandaktuz egin daitezke. Era berean, higikortasun elektriko oso handia duten elektroigas bidimentsionalak ere egin daitezke. Egitura hauei esker Hall efektu kuantikoa eta Hall efektu kuantiko zatikatua aurkitu dira. Metal isolatzailez eginiko supersareak oso aproposak dira dimentsionalitateari atxekitutako metalen propietateak aztertzeko: Niobio/Germaniozko supersareetan supereroankortasun bidimentsionaletik tridimentsionalerainoko trantsizioa gertatzea germaniozko geruzen lodiera mehetzerakoan, adibidez.

9. Hall efektu kuantikoa

Esan dugun bezala, teknologia modernoak, gas bidimentsionalak egin ditu posible; higidura elektroniko osoa plano batera mugatuta egotea hain zuzen ere. Sistema hauen propietate harri-garria, Hall efektu kuantiko izeneko da. Temperatura baxutan eta eremu magnetiko handitan egoera elektronikoak banandu egiten dira eta maila ziklotronikoak edo Landau-ren mailak dargerte. Hall efektu kuantikoaren aplikazio praktikoa erresistentzia elektrikorako patroia estandar berria lortzea izan da. Hall konduktantzia kuantifikatua egoteak, materiaren ordena-egoera berri ohizkanpokoak esistitzea eskatzen du.

10. Zehaztasun atomikozko zunda esperimentalak

Joan den hamarkadako oinarrizko aurrerapenetako bat, atomoak banan-bana ikusteko tresnak garatzea izan da. Horiatariko

bat tunel-efektuzko mikroskopia (*Scanning Tunneling Microscope*: STM) izan da. Teknikak honela funtzionatzen du: mutur metaliko zorrotz bat aztertu nahi den gainazaletik Ångström⁹ gutxitara jartzen da, beraien artean potentzial elektrostatikoaren diferentzia dagoelarik. Baldintza horietan, tunel-efektu¹⁰ kuantikoz elektroiak batetik bestera joan daitezke, potentzial-langa zulatuz. Horrela sortzen den korrante elektrikoa oso sentikorra da muturra eta luginaren arteko distantziarekiko. Muturrak, gainazalaren parean higitzerakoan, gainazalaren elektro-dentsitatearen aldaketek eragiten dituzten korrante-fluktuazioak neurtu ahal ditu. Tokian atomo bat egoteak ala ez egoteak korrente elektriko desberdina eragiten du. Lortutako datuekin egitura atomikoaren azterketa zuzena egin daiteke.

Gainera, joan den harmarkadan transmisio-mikroskopia komertzial berrien garapena erabat burutu da. Hauen zehaztasun-maila 1-5 Å-koa da. Beste adibide aipagarria, ekortze elektronikoko mikroskopia (*Scanning Transmission Electron Microscope*: STEM) da. Honen zehaztasun-maila 1 Å-koa da. Atomo bakanen irudiak lortu izna dira, karbono-atomoenak esaterako. Etorkizunean, material (organikoan zein ezorganikoan) atomoek dituzten posizioak ebazteko horrelako zundak, gero eta erabiliagoak izango direla uste dugu.

11. Kaos-fenomenoak denboran eta espazioan

Hidrodinamika, plasmaren fisika, eta materia kondentsatuaren fisika bat egitearen ondorioz, zientziaren arlo berri bat gauzatu da. Zientzia berri honek, orreka-baldintzetik oso urrun dauden sistemak aztertzen ditu. Sistema horietan ekuazio linealak ez dira aplikagarriak. Sistema hauen eredu sinpleenetan ere, fenomenu berri eta kezkarri asko agerian jartzen da.

Zenbait baldintza experimental konkretutan baieztagarriak diren propietate unibertsal batzuk, sistema horien azterketan

azaltzen dira. Hala ere, zenbait puntu oso esentzial argitzeke daude. Adibidez, turbulenzia ezin daitekeela matematika sinpleez deskriba gauza jakina da baina, beraien ezagutzan aurreratze-ko noraino heda daitezke eredu horiek? Beste adibide batzuk, laser erdieroaleak eta zenbait sistema superoale dira.

12. Anyoiak¹¹

Orohar, partikulak (zentzurik zabalenean materia kondentsatuaren kuasipartikulak eta oinarrizko kitzikapenak barne direlarik) bosoi eta fermioitan sailka daitezke. Fermioiek Pauliren eskusio-printzipioa betetzen duten partikula azpiatomikoak dira¹². Bosoiak ordea ez dute Pauliren eskusio-printzipioa bete behar eta ondorioz horietako bat baino gehiago egoera kuantiko berdinean egon daitezke. Bosoiak eta fermioiak arteko sailkaketa mekanika kuantikoa bezain zaharra da. Izan ere, matrize-mekanika buruzko W. Heisenberg-en¹³ bigarren artikuluan agertzen da.

Bosoiak eta fermioiak arteko ohizko sailkapen hau, desegokia izan daiteke zenbait sistema bidimentsionaletan. Sistema horietan, bosoiak eta fermioiak arteko ezaugarriak dituzten partikula herriak edota partikula-itxurako oinarrizko kitzikapenak dagerte. Horien azterketaren oinarriak finkatu zituen artikulu-sekziaren hirugarrean, 1982.ean hain zuzen ere, Franz Wilczek-ek, *anyoi* izena eman zien. 1982.ean Havard unibertsitateko Halperin-ek, R. Laughlin-ek ikertutako Hall efektu kuantiko zatikatua- ren kitzikapenak anyoi moduan jokatzen zutela, iradoki zuen. Era berean, Phil Anderson-ek botatako ideia batean oinarrituta, (temperatura altuko superoaleek ez dutela beren egoera normalean metal arrunt moduan jokatzen) Laughlin-ek material horien propietate bitxiak asko, anyoi-gasen propietate ohizkanpokoan arabera ondo deskriba zitzekeela proposatu zuen.

13. Fusio epela

Mende honen bigarren erdian, kontrolpeko fusio nuklearreko energia lortzea fisikak eta teknologiak izan duten helburu garrantzitsuenetakoa bat izan da¹⁴. Kontrolatu gabeko fusio nuklearra 1952.ean lortu zen hidrogeno-bomba leheratazi zenean. Kontrolpeko fusioa ez da oraindik erdietsi. Eta jadesteko posibilitatea, Oxford-etik gertu dagoen JET (*Join European Torus*) laborategian egiten ari diren esperimentuetan ez da baieztatua izan. Agian, hurrengo 10 urtetarako antolatuta dauden esperimentuetan ere, ez da baieztatua izango. Aurrikuspenak egitea arriskutsua bada ere, zera esan dezaket: 1942.ean Enrico Fermi-k¹⁵ fisio nuklearreko erraktorearekin lortua zuen aurrerapen-maila, fusioarekin mende honen bukaerarako ez dela lortuko. Arlo horretako esperimentuak gero eta korapilotsuago eta garestiagoak dira.

1989.ko hasieran fusio hotza lortu zelaren berriak, laborategi-esparrutik mundu osoko egunkarien lehen orrialdera eta telebista pantailara jauzi egin zuen. Utah-ko Unibertsitatean, Fleischmann eta Pons-ek, paladioz egindako esperimentu elektrokimiko batean deuterio nukleoan fusioa, ingurugiro-tenperaturan, lortu zutela aldarrikatu zuten. Gaur egun, posibilitate horrek baztertuta dirudi nazioarteko komunitate zientifikoan, non zabaldutako berriak akats esperimentalen ondorio direla uste bait da. Gaur-gaurko kalkuluak, paladio barruan deuterio-atomoen arteko distantzia, fusioa gertzeko behar bezain motz ezin daitekeela izan, frogatzen dute. Badirudi beraz fusio hotzik, oraingoz behinik behin, ez dagoela¹⁶.

Baina egoera bestelakoa da fusio epel (*cluster fusion* edo multzo-fusioa esatea zuzenago litzateke) izenez ezagutzen denari buruz. Fusio posibilitate berri hau, New York-eko Brookhaven laborategiko Beuhler, Friedlander eta Friedman-ek aldarrikatu dute eta joan den urrian, "*Physical Review Letters*" aldizkari ospetsuaren editoreak, Donostian ospatu zen Werner Brandt

Nazioarteko Kongresuan parte hartu zuten zientzilariei aurkeztu zien ideia berri hori. Gero *mass media* tara zabaldu zen berria, baina fusio hotzaren kasuan baino apalago tratatu zen. Fusio epela titanio-molekulazko multzoak erabiliz lortzen da.

Badaude jadanik, fusio epelaren jatorriaz zenbait ideia. Baina, edozein modutan ere, molekula-multzo eta materiaren arteko elkarrekintza hamarkada honek aurrez-aurre izango duen erronketako bat izango da.

14. Kristal likidoak

Konplexutasunaren muinak duen garrantziaren beste adibide aipagarria, (eta hau zuek nik baino hobeto dazagukezue) kristal likidoak dira.

Substantzia gehienak hiru fase desberdinetan ager dakizkigu-ke: solido, likido eta gas faseetan alegia. Horietako zeinetan agertu tenperaturak, presioak eta dentsitateak finkatzen dute. Horien aldaketek fase-trantsizioak eragin ditzakete¹⁷. Solido fasea kristalinoa da, gehinetan¹⁸. Baina, zenbait solidok beira-egitura metaegonkorak dituzte; agerizko ordenamendu molekularrek ez dute alegia. Faseen arteko desberdintasunak irudikatzeke erarik errazena, atomoak esferetz irudikatzea (eta hau ez dago errealitatetik ematen duen bezain urruti) da. Gasetan esferak azarean eta beraien arteko distanziak esferaren erradioa baino handiagoak direlarik, irudikatzen dira. Likido eta solido fase kondentsatuetan berriz, esferen arteko distanziak esferen diametroaren antzerakoak dira. Fase bion arteko desberdintasuna zeran datza: fase solidoan esferen banaketa erregularra den bitartean, fase likidoan desordenatua dela.

Zer gertatuko da atomoak molekula luzexkaz ordezkatzten baditugu? Erantzuna materiaren egoera berezi hori dañ hots: *kristal likidoak*. Horiek deskribatzeko molekulen grabitate-zen-

truen kokapenez gain, orientazioa ere ezagutu behar da, zeren eta aldagai bat zein bestea era askotara alda bait daitezke eta era berean materialaren ezaugarriak.

Beraz, solido/likido/gas ohizko sailkapenarekin bat ez datoren zerbaiten aurrean gaude. Kristal likidoa legea da berez, solidoarekiko, likidoarekiko edota gasarekiko zerikuririk ez duena, baina horiek bezala oinarri-oinarrizkoa. Zenbait substantzia tenperatur tarte jakin batean bakarrik dira kristal likido eta mesogeen deritze.

Friedrich Reinitzen-ek, lehen kristal likidoa duela 101 urte aurkitu zuen eta konplexutasunean muinaren adibide oso ona da. Egitura desberdinek ezaugarri desberdinak dituzte eta kanpo-eragileei modu desberdinean ematen diete erantzuna. Ondorioz erabilpen desberdinak dituzte. Oso garrantzi handikoak dira biologian. Sistema bizidunek behar beharrezkoa dute horrelako egitura. Zèlula guztiak inguratzen dituen mintz malgu eta iragazkorraren oinarria da. Adibidez, zenbait eritasun hala nola arterioesclerosis, kristal likidoen fase-trantsizioekin erlaziontuta daude. Telebista-pantaila lauak, paretatik zintzilikatua izateko modukoak, kristal likidoz egin litezke. Ez galdetu nola!

Ondorio gisa

Fisikak, zientziak orohar, erronka berrien aurrean dago mende berria hastear dagoenean. Erronka horiei zein erantzun emango dien balditzatuko ditu gure gizartearen etorkizuna eta bilakaera. Horietako bakar bati bakarrik erantzun egokia emateak, fusio nuklear kontrolatuaren arazoari adibidez, gizateriaren etorkizuna erabat et sakonki alde dezake energi iturri garbi eta agortezina ziurtaturik izango bait genuke. Gaur eguneko kezka eta larrialdi asko zokoratuak izango liratele. Oinarrizko zientziak eta teknologiak estuki loturik joan behar dute eta biak behar beharrezkoak dira; zeinbaitzuk egiten duten bien arteko banaketa

ondorio onuragarriak ez eta kaltegarriak eragiten ditu. Oinarrizko zientzia eta teknologia txanpon beraren bi alderdi besterik ez dira.

Hala eta guztiz ere, aurrerapen teknologiko eta zientifikoak huts egingo du eta ez ditu gizateraren arazoak konponduko, baldin eta ingurugiroarekiko errespeto eta zaintzarekin txertatzen ez bada. Aurrerabide teknologikoak ez du ingurugiroaren babesarekin lehian egon beharrik.

P. M. E.

Egileak, J. M. Ugalde J. M. Elorza eta I. Irazabalbeitia irakasleak eskertu nahi lituzke, lan hau burutzeko eman dioten laguntzagatik.

¹ Materia osatzen duten oinarrizko partikulak aztertzen duen fisikaren adarra da partikulen fisika.

² *Big Banga* alegia.

³ Coulomben legeak elektrikoki kargatutako gorputzen jokamoldea gobernatzen du. Zera dio: Elektrikoki kargatutako bi gorputzen arteko erakarpen- edo aldarapen-indarra, bi gorputzen kargen biderkadurarekiko zuzenki proportzionala eta bien arteko distantziaren karratuarekiko alderantziz proportzionala da. Hots, $F = K q_1 q_2 / d^2$.

⁴ Paulieren eskusio-printzipioak mekanika kuantikoaren oinarrizko legetako bat da eta atomo baten bi elektroik ezin dituztela lau zenbaki kuantikoak berdinak izan dio. Honek, atomo baten elektroiek atomoaren energi mailaren toki bernina ezin dutela bete esan nahi du. Hitz lauez nolabait azaltzeko, hiri bateko bi telefono-abonatuek ezin dutela telefono-zenbaki berdina izan esan nahi du.

⁵ Meissner efektuaren ondorioz, material superferoale bat iman baten gainean jartzen denean flotatzen gelditzen da, materialak imanaren eremu magnetikoa kanporantz bultzatzen duelako.

⁶ Supereroale zaharrak maneiatzeko behar diren tenperaturak lortzeko helio likidoa erabiltzen da. Helio likidoa, garestia eta urria da. Nitrogenoa bestalde, atmosferako gasen %75 da gutxi gorabehera eta bertatik distilazioz lortzen da.

⁷ Fusio nuklearra etorkizunerako energi iturri garbia izan daiteke. Fusio nuklearrak eskatzen dituen tenperatura oso handiak lortzea da garaperako planteatzen duen arazorik larriena. Eremu magnetiko indartsuen bidez edukitako plasmak erabiltzea da proposatzen den irtenbideetako bat.

⁸ Sinkrotroi-erradiazioa elektroik edo elektrikoki kargatutako partikulak, eremu magnetiko boritz batean higitzean indar-lerro magnetikoen inguruan ibilbide kiribilak har ditzaten behartzen direnean, sortzen da. Elektroik argiaren

abiaduratik gertu badabiltza, ibilbidearen norabidean eremu magnetikoarekiko perpendikularki polarizatutako erradiazio magnetikozko sortak digortzate.

⁹ ($1\text{\AA} = 10^{-8}\text{ cm} = 0,00000001\text{ cm}$).

¹⁰ Tunel-efektuaren bidez, gainditu ezinezko potentzial-langak gainditzea lortzen dute partikulek. Mekanika klasikoaren arabera, potentzial-langak gainditzeko partikularen energiak langaren potentziala baino handiagoa izan behar du. Baina, hau ez da horrela gertatzen beti eta zenbait kasutan, aski energiarik ez duten partikulek langa gainditzea lortzen dute, tunel baten bidez zeharkatu izan bailuketen. Mekanika kuantikoak ordea, tunel-efektuaren muina azaltzen du.

¹¹ Anyoiak eta anioiak ez dira nahastu behar. Bigarrenak irakurleak ezagutu-ko ditu seguruenik eta negatiboki kargatuko ioiak dira. Lehendabizikoak, partikula azpiatomikoak dira.

¹² Protoia, neutroia eta elektroia fermioiak dira.

¹³ Werner K. Heisenberg (1901-1976) mekanika kuantikoaren gurasoetako bat izan zen.

¹⁴ Fusiozko energia nuklearrean bi nukleo arinek bat egiten dute nukleo astunago bat osatzeko. Bi nukleo arinen masen batura, nukleo astunarena baino handiagoa da. Beraz, masa-galera egon da erreakzioan eta masa hori energia moduan agertzen da Einstein-en ekuazio ospetsuaren arabera, $E = mc^2$. Adibidez, bi deuterio-nukleo helio-nukleo bat osatzeko fusionatzen direnean, 3,2 MeV-eko energia libratzen da. Eguzkiak fusio-erreakzioen bidez lortzen du energia.

¹⁵ Enrico Fermi (1901-1954) 1942.ean Txikagon lehen pila atomikoa eraiki zuen taldearen zuzendaria izan zen, besteak beste.

¹⁶ Fusio nuklearra lortzeko arazorik larriena fusionatu behar duten bi nukleo atomikoak gerturatzea da. Bi nukleoak positiboki kargatuta daudenez, aldarapen Coulombiarren ondorioz elkarretik urruntzeko joera dute. Gainera, zenbat eta gertuago egon orduan eta aldarapen-indar handiagoa dago. Aldarapen Coulombiarra gainditzeko ezagutzen den moduak, tenperatura oso altuak (miloika gradu) eskatzen ditu. Fusioa lortzeko orain arte egindiren saiok bide hori jorratu dute gehien bat.

¹⁷ Fase-trantsizioa edo -aldaketan fase-egoera batetik beste batera pasatzen da materia. Esatrako, izotzetik ur likidora.

¹⁸ Kristal-egitura izateak, solidoaren atomo edo molekulak ordenamendu jakin baten arabera antolatutik daudela esan gura du.

LOS MISTERIOS DE LA MATERIA

LES MYSTERES DE LA MATIERE

El autor en primer lugar expone las razones que han empujado al hombre a

estudiar la materia: el afán de conocimiento por un lado y deseo de controlar y utilizar la materia por otro.

Seguidamente se resume el amplio campo de la actuación de la ciencia: desde los objetos cercanos y tangibles hasta los conceptos más difusos.

Tras definir la física como la rama de la ciencia que estudia los aspectos más fundamentales de la materia, el autor pasa a describir el impacto que ha tenido en nuestra sociedad el avance del conocimiento científico.

Por otra parte subraya que la física ha puesto en manos de la humanidad las herramientas necesarias para construir un mundo mejor o destruirlo. Sin entrar a dar soluciones, indica que un público educado en temas científicos y un liderazgo científico bien informado en temas científicos y tecnológicos no serían perjudiciales.

Finalmente hace un repaso de la situación y posible evolución de varias áreas de la física.

L'auteur expose tout d'abord les raisons qui ont poussé l'homme à étudier la matière: la soif de connaissance d'une part et le désir de contrôler et utiliser la matière d'autre part.

Aussitôt après, le vaste champ d'activité de la science est résumé à partir d'objets proches et tangibles jusqu'aux concepts les plus diffus.

Après avoir défini la physique comme la branche de la science qui étudie les aspects les plus fondamentaux de la matière, l'auteur décrit ensuite l'impact que la progression de la connaissance a eu dans notre société.

En outre il souligne que la physique a mis dans les mains de l'humanité les outils nécessaires pour construire un monde meilleur ou le détruire. Sans chercher à donner des solutions, il indique qu'un public préparé dans des thèmes scientifiques et un leadership bien informé en thèmes scientifiques et technologiques ne seraient pas préjudiciables.

Il finit par une révision de la situation et une évolution possible de plusieurs domaines de la physique.