

Sinpletasunetik konplexutasunerantz, milurteko berriaren atarian

•

P. M. ETXENIKE / J. M. PITARKE /
F. PLAZAOLA

•

b

ukatu berria den XX. mendean iraultza zientifiko paregabea ezagutu dugu. Albert Einstein-ek 1919. urtean Isaac Newton-en teoria grabitazionala ordezkatzeko zuen erlatibitate orokorra plazaratu zuen eta 1920ko hamarkadan fisikari bikainen uholde batek teoria kuantikoa garatu zuen. Erlatibitatearen teoriak espazioaren eta denboraren kontzeptuak erabat aldarazi zituen, haien ustezko izaera unibertsal eta aldaezina arbuiatuz, eta teoria kuantikoak auresankortasun, kausalitate eta objektibotasunaren ideia klasikoak buruz behera jarri zituen. Bi teoria iraultzaile horiek esparru ezberdinetan behin eta berriro esperimenterik frogatuak izan dira, baina biak bil litzakeen teoria bateraturik ez dago. Elkarrekintza elektromagnetiko eta nuklearrak (nuklear ahula eta nuklear bortitza) barne hartzen dituen teoria kuantikoa badugu (horri Eredu Estandarra deritzo), baina teoria kuantiko osatu hori elkarrekintza grabitazionalaren Einstein-en teoriarekin bat egiteko asmoz burutu diren saiakerak guztiak alferrikakoak izan dira. Hauxe da, bada, dator-

► **P.M. Etxenike, J.M. Pitarke eta F. Plazaola** EHUko Materialen Fisika, Materia Kondentsatuaren Fisika, eta Elekrika eta Elektronika Sailletako irakasleak dira, hurrenez hurren. Lehen biak Donostia International Physics Center-eko (DIPC) kide dira.

kigun milurteko berr i a ren erronka nagusietariko bat, aipaturiko bi teoria horien arteko bat-egiteak Unibertsoaren jatorriaren deskribapen osatua ahalbidetuko lukeelarik, besteak beste.

XX. mendean zehar garaturiko teoria kuantikoen helburu nagusietariko bat sinpletasunaren bilaketan datza. Hori oinarrizko partikulen fisika dugu, non materiaren osagaiarik oinarri-oinarrizkoenak eta beraien jokabidea arautzen duten legeak bilatzen diren. Alabaina, oinarrizko partikulen jokabidearen ezagutza beharrezkoa izanik ere, partikula askok bat eginez materia osatzen dutenean propietate berriak sortzen dira, banakako partikulen propietateetatik ondorioztatu ezin diren propietate emergenteak, hain zuzen ere. Fase likido eta solidoan dagoen materiaren jokabidea arautzen duena materia kondentsatuaren fisika dugu, beronek inguratzen gaituen munduaren konplexutasunaren azterketa helburu duelarik. Materia kondentsatuaren ulermena mekanika kuantikoari zor zaio, non materia osatzen duten nukleo positiboak eta elektroi negatiboak arteko Coulomb-en elkarrekintza Pauli-ren elkarrezintasunaren printzipioarekin bildu egiten den.

Inguratzen gaituzten fenomeno fisikoak deskribapenaren maila bakoitzak berezko logika, matematika eta fenomenologia ditu; beraz, unibertsoaren teoria bateratu hura izango bagenu ere konplexutasunerako bidea luzea izango litzateke.

XX. mendeko lorpenak

Erlatibitatea, astrofisika eta kosmologia

Einstein-ek 1905. urtean erlatibitatearen teoria berezia argitaratu zuen, translazio-higidura erlatibo uniformeak duten erreferentzi sistema guztiak baliokideak direla eta argiaren hutseango abiadura aldaezina dela postulatu. Postulatu horiek espazio eta denboraren kontzeptuen berazterketa sakona ekarri zuten, aldiberekotasunaren erlatibotasuna agerian jarri eta ondorio astronomiko ga-

rrantzitsuak izango zituen argiaren Doppler lerrakuntza erlatibista auresanez, besteak beste.

Doppler lerrakuntzaren erabilpen interesgarrienetariko Edwin Hubble astronomoak egin zuen. 1920, 1930 eta 1940ko hamarkadetan urruti dauden galaxietako hainbat izarren erradiazioa aztertu zuen, eta izarren berezko distira ezaguna erabiliz izarren eta Lurraren arteko distantziaren berri eman ahal izan zuen. Hubble-k urrutiko izar gehienek espektroak gorrirantz lerratuak daudela aurkitu zuen, izar horiek guregandiko distantziarekiko proportzionala den abiaduraz urrutiratzen ari direla erakutsiz. Izan ere, izar eta galaxia guztiak elkarrekiko urrutiratuz higitzen direla frogatu ahal izan da, puzten ari den puxika batean margoturiko puntuekin gertatzen den bezalaxe. Elkarrengandik urrutiratu egiten diren galaxien eredu hori leherketa handia (*big bang*) izeneko teoria kosmologikoaren oinarria dugu, teoria horren arabera unibertsoa puntu bakarrean hasi eta azkar zabaltzen ari delarik.

Einstein-ek 1911. urtean baliokidetasunaren printzipioa plazaratu zuen. Printzipio horren arabera, behaketak espazio eta denboraren ingurune txiki batean gauzatzen direla emanik, erreferentzi sistema azeleratu baten eta era egokian aukeraturiko azeleratu gabeko erreferentzi sistema baten artean esperimenterik bereizteko modurik ez dago. Izan ere, beraz Einstein-ek berak 1919. urtean argitaratu zuen erlatibitatearen teoria orokorraren oinarriko printzipioa dugu. Printzipio horren ondorioen artean grabitazioaren eraginpeko argiaren deflexioa eta gorriranzko lerrakuntza ditugu, biak esperimenterik zehaztasun handiz frogatuak izan direlarik. Are gehiago, grabitazioa handituz doan heinean gorriranzko lerrakuntza grabitazionala ere handitu egiten da, eta grabitazioa oso bortitza denean argiaren maiztasuna zerora lerratua egotea, hots, argia ikusteko modurik ez egotea gerta daiteke. Orduan, Einstein-en grabitazioaren teoriak auresaten duen zulo beltza sortu dela diogu. Diogun, bestalde, Einstein-en teoriak zabalduz doan unibertsoaren bilakaera zehaztasun handiz auresateko gaitasuna erakutsi duela.

Erlatibitatearen teoriak energia eta masa bereizteko modurik ez dagoela diosku. Unibertsoaren hastapenetako masa-dentsitatea oso handia zenez, energi dentsitatea ere oso handia genuen, eta termodinamikak tenperatura ere oso handia izango zela erakusten digu. 1940 eta 1950eko hamarkadetan George Gamow-ek eta bere lankideek hastapenetako unibertso bero hura erradiazioz beterik zegoela proposatu zuten, eta 1965. urtean Arno Penzias-ek eta Robert Wilson-ek mikrouhinen hondo-erradiazioa aurkitu zuten, 300.000 urteko unibertso txikiaren erlikia hain zuzen ere, leherketa handiaren teoriaren froga esperimental garrantzitsua eskainiz.

Hala ere, leherketa handiaren ereduak azalpenik gabe uzten zituen zenbait arlo bazeuden. Alan Guth-ek 1980. urtean unibertsoaren eredu inflazionarioa plazaratu zuen, unibertsoaren zabalkuntzak jatorrizko aldiuneetan eta oso denbora-tarte txikian azelerazio handia jasan zuela baieztatuz. Eredu horrek lehen argitzeke zeuden arazo batzuk argitzen ditu, baina unibertsoaren bilakaera osatua izan ahal izateko erlatibitate orokorra eta teoria kuantikoa bilduko lituzkeen grabitazioaren teoria kuantiko osatu baten zain egon behar izango dugu.

Iraultza kuantikoa

Iraultza kuantikoa sortarazi zuen lehen urratsa gorputz berotuek igorritako erradiazioaren azterketan koka dezakegu. Gorputz berotuek ingurunea argitu egiten dutena gauza jakina da, tenperatura igotzearekin batera igorritako erradiazioa gero eta argitsuagoa delarik. Alabaina, gorputz berotuek igorritako erradiazioaren espektroa ulertzeko asmoz buruturiko ahalegin guztiek porrota baino ez zuten aurkitu, XX. mendearen atarian Max Planck-ek argia igortzen duten elektroibibrakorren energia kuantizaturik dagoela proposatu zuen arte. Planck-en hipotesia ren arabera, bada, elektroibibrakorren energiak balio jakin batzuk soilik izan ditzake, $E=h\nu$ energiaren anizkoitzak, hain zuzen ere, ν delakoa igorritako erradiazioaren

maiztasuna izanik eta h delakoa konstante unibertsala delarik: Planck-en konstantea.

Erradiazio elektromagnetikoa igortzen duten elektroibibrakoren energia kuantizaturik dagoela onartuz, Einstein gazteak 1905. urtean erradiazioa bera ere kuantizaturik dagoela proposatu zuen, efektu fotoelektrikoaren azalpen zehatza eman zuelarik. Izan ere, esperientziak erakusten duenez, metal baten gainazalera argia heltzen delarik partikulak (fotoiak) zurgatzen dira, beste erako esperimentuetan argiaren uhin-izaera agerian jartzen bada ere.

Teoria kuantikoaren sorreraren lehen urratsa erradiazioaren izaeraren azterketa izan zelarik, bigarren urratsa materiaren nolakotasunari buruzko eztabaidan aurki dezakegu. Rutherford-ek 1911. urtean plazaraturiko eredu atomikoaren arabera, atomoa nukleo positiboak eta elektroiek osatzen dute, elektroiak nukleoarekiko biraka ari direlarik. Teoria elektromagnetikoak erakusten duenez, aldiz, elektroia azeleratu horiek erradiatu egingo lukete, energia galduz eta oso denbora laburrean nukleoarekin topo eginez; alegia, materia ez litzateke egonkorra izango. Rutherford-en eredu atomikoa ontzat emanik —partikulekin eginiko esperimentuetan oinarriturikoa baitzen— eta atomoetako elektroiek etengabe erradiatzeko erakusten duten ezintasuna onartuz, 1913. urtean Niels Bohr-ek hauxe proposatu zuen: atomoetako elektroiek egoera geldikor jakinak izan ditzakete, haietariko bat oinarritzko egoera izanik, egoera jakin batetik bestera ‘jauzi’ egiten duten bakoitzean fotoi bat igortzen dutelarik. Elektroiak oinarritzko egoera duenean erradiatzeko modurik ez dago eta atomoa egonkorra dugu, beraz. Are gehiago, Bohr-en ereduak hidrogeno-atomoaren igorpen eta zurgapen espektroak zehaztasun handiz deskribatzeko gaitasuna erakutsi zuen. Bere ereduaren arrakasta ikusita ere, Bohr-ek teoria fisiko berria aurkitu beharra zegoela aurreikusi zuen, horretarako fisikari bikainak bildu zituelarik. 12 urte igaro ondoren, fisikarien belaunaldi berri batek teoria kuantikoa garatu ahal izan zuen.

1923. urtean Louis de Broglie-k bere doktorego-tesian ideia berri bat plazaratu zuen. Alegia, argiak partikula-izae-

ra erakuts dezakeen era berean, partikulei ere uhin-izaera dagokie, uhinaren uhin-luzeraren (λ) eta partikularen momentuaren (p) arteko biderkadura Planck-en konstantearen berdina izanik: $\lambda p = h$. Iraultza kuantikoa 1925-1928 urteetan gauzatu zen, Pauli, Heisenberg, Born, Jordan, Schrödinger, Dirac eta Bohr fisikarien eskutik.

Asko izan ziren 1925-1928 urteetan plazaraturiko ideia berriak: Wolfgang Pauli-k elkarrezintasunaren printzipioa plazaratu zuen, bi elektroik egoera kuantiko berbera izateko duten ezintasuna aldarrikatuz eta elementuen taula periodikoaren oinarri teorikoa ezarriz; Werner Heisenberg-ek, Max Born-ek eta Pascual Jordan-ek Mekanika Matriziala garatu zuten; Erwin Schrödinger-ek Uhin-Mekanika asmatu zuen, sistema fisiko baten egoera uhin-funtzio baten bidez adierazita datorrela proposatuz; Heisenberg-ek Ziurgabetasunaren Printzipioa plazaratu zuen; Paul Dirac-ek elektroien spina barne hartzen duen uhin-ekuazio erlatibista garatu zuen, antimateriaren izaera auresanez; Dirac-ek berak eremuen teoria kuantikoaren oinarriak ezarri zituen; eta Bohr-ek Osagaritasunaren Printzipioa plazaratu zuen, uhin-partikula bikoiztasunaren interpretazio sakona emanez. 1928. urtean Mekanika Kuantikoaren oinarriak ezarrita zeuden.

Mekanika Kuantikoaren arrakasta berehalakoa izan zen. Schrödinger-en uhin-ekuazioaren soluzio zehatza Born-en interpretazio probabilistikoarekin bilduz hidrogeno-atomoaren espektroaren jatorri teorikoa ezarri zen. Helio-atomoaren egitura ere zehaztasun handiz auresan ahal izan zen, Schrödinger-en ekuazioaren soluzio hurbilduaren bitartez, eta berehala John Slater-ek, Douglas Rayner Hartree-k eta Vladimir Fock-ek gaineratiko atomoen uhin-ekuazioa askatzeko teknika berriak garatu zituzten. Fritz London-ek eta Walter Heitler-ek hidrogeno-molekularen egitura azaldu zuten eta Linus Pauling-ek kimika teorikoaren oinarriak ezarri zituen. Metaletako elektroien teoriaren oinarriak Arnold Sommerfeld-ek eta Pauli-k ezarri zituzten, eta Felix Bloch-ek solidoen banden teoria garatu zuen. Hurrengo hamarkadan Hans Bethe-k fisika nuklearraren oinarriak ezarri zituen. Elektroien eta fotoien arte-

ko elkarrekintza barne hartzen duen elektrodinamika kuantikoa (QED) 1940ko hamarkadan osatu zuten Richard Feynman-ek, Julian Schwinger-ek eta Sin-Itiro Tomonaga-k. Teoria horren auresan kortasun ikaragariaren adibidea elektroien baten eta eremu magnetikoaren arteko elkarrekintza intensitatea dugu, magnitude horren auresan teorikoaren eta neurketa esperimentalaren arteko adostasunaren doitasuna 1.000.000.000.000tik 2koa delarik.

Partikulen fisika

Elektrodinamika kuantikoak partikula kargatuen arteko elkarrekintza elektromagnetikoak deskribatzen ditu, elkarrekintza horiek masa gabeko fotoiak trukatzuz gauzatzen direlarik. Halaber, kromodinamika kuantikoak (QCD) masa gabeko gluoiak trukatzuz gauzatzen den elkarrekintza nuklear bortitzaren berri ematen du eta nukleoetako protoi eta neutroien osagaien, hots, *quarken* jokabidea arautzen du. Alemaniako DESY laborategiko zientzialariek 1979. urtean gluoiak aurkitu zituzten.

Sheldon Glashow-ek, Steven Weinberg-ek eta Abdus Salam-ek 1960ko hamarkadan elkarrekintza elektromagnetikoa eta \square desintegrazioari dagokion elkarrekintza nuklear ahula biltzen dituen teoria bateratua plazaratu zuten. Teoria horrek elkarrekintza nuklear ahula masadun partikula kargatuak (W^+ eta W^-) nahiz neutroak (Z^0) trukatzuz gauzatzen dela iragarri zuen, eta Geneva-ko CERN laborategiko zientzialariek 1983. urtean partikula horiek aurkitu zituzten. Era berean, elkarrekintza grabitazionala grabitotoiak trukatzuz gauzatzen delako ustea zabaldua dago, baina partikula horien aztarnarik ez da aurkitu.

Eredu Estandarrak naturan eragiten duten oinarritzko lau elkarrekintzetatik (elektromagnetikoa, nuklear ahula, nuklear bortitza eta grabitazionala) lehen hirurak deskribatzen ditu, arrakasta handiz, oinarritzko partikulekin buruturiko esperimendu guzti-guztiak doitasun handiz azaltzeko gaitasuna erakutsi duelarik. Ostera, eredu estandarrek esperimendutik ateratako zenbait parametro aske ditu

eta unibertsoaren teoria osatua izatetik urruti dago. Galaxien eraketarako beharrezkoa omen den neutrinoz edota balizko neutralinoz osaturik legokeen eta erradiatzen ez duen materiari materia iluna deritzo, eta haren aurkikuntza eredu estandarra baino haragoko fisikaren berri ematea ahalbidetu lezakeen urrats garrantzitsua izango litzateke. Bestalde, eredu estandarretik kanpo dagokeen fisikaren berri ematen duten teorien artean hauek ditugu: grabitazio semiklasikoa, soken teoria (teoria honen arabera grabitoiak 'sokak' izeneko dimentsio bakarreko izakien kitzikapenak besterik ez dira), begiztako grabitazio kuantikoa (*loop quantum gravity*) eta kosmologia kuantikoa.

Alabaina, gaur eguneko teoria eta ereduez baliaturik oinarritzko partikulen masa eta karga bezalako propietateak aurrezteko modurik ez dago, alde batetik, eta grabitazioaren deskribapen kuantikoa heltzeaz dago, bestetik. Alegia, grabitazioa kuantizatzeke asmoz urteetan buruturiko saiakera guztiak alferrikakoak izan dira, gorago aurreratu dugun bezala, eta askok iraultza berri baten beharizanean gaudela baieztatzen dute.

Iraultza kuantikoa sortarazi zuen eragile erabakigarria gorputz berotuen erradiazioaren neurketa esperimentalala izan zen, garai hartako teoriez baliaturik esperimentu haren berri emateko modurik ez baitzegoen. Halaber, gaur egun oinarritzko ideiak alda litzaketan zenbait esperimentu ulergaitz baditugu, hala nola Greisen-Zatsepin-Kuzmin limitearen gaineko energia duten izpi kosmikoen aurkikuntza nahiz urrutiko iturri astronomikoetatik jasotako energia altuko fotoien detekzioa, biak gaur eguneko teorien arabera ezinezkoak direlarik. Era horretako esperimentuen azalpena erlatibitatearen teoria orokorraren baitango espazio-denbora delakoaren kuantizazioan omen datza, zenbait zientzialariren iritziz, baina grabitazio kuantikoari buruz garatzen ari diren eta garatzeaz dauden ideiak frogatu ahal izateko esperimentu berriak burutu behar dira. Oso zaila da, aldiz, esperimentu horiek abiatzea, elkarrekintza grabitazionala gainerako elkarrekintzekiko oso ahula baita. Izan ere, grabitazioaren kuantizazioaren efektuak Planck-en luzera ($L_p \sim 10^{-33}$ cm) baino txikia-

goak diren distantzietara mugatzen dira, eta une honetan efektu horiek nabariak bilaka daitezkeeneko laborategiko esperimentuak burutzea ezinezkotzat jo dezakegu. Era horretako esperimentuak heltzear daudekeen ideia berriekin bildu eta kontrastatu ahal izatearen ondorioak gure irudimenetik kanpo daudenaz ziur egon gaitezke.

Sinpletasunetik konplexutasunerantz

Materia Kondentsatuaren Fisika

Mekanika Kuantikoa plazaratu bezain laster nukleo, atomo, molekula eta solidoen Fisikaren oinarriak ezarrita zeuden. Alabaina, esperientziak sinpletasunetik konplexutasunerantzko bidea luze eta auresanezina dela erakutsi digu, propietate berri eta emergenteen bilaketan, horretarako teknikaren garapenak berak funtsezko zeregina bete duelarik. XX. mendeko materia kondentsatuaren fisikaren bilakaeran aurki ditzakegun bi adibide adierazkor aipatuko ditugu: transistorea eta supereroankortasuna.

Transistorearen asmakizuna Bell laborategietan gauzatu zen, Mervin Kelly lehendakariordeak 1945. urtean abiatutako oinarritzko ikerketa-programa baten baitan. Kelly-k zientzialari teoriko eta esperimentalak bildu zituen, garai hartan garatu berriak ziren erdiekoaleak telefono-zerbitzuen hobekuntzan erabiltzeko asmoz. Lantegi pribatu batean oinarritzko ikerketa-programa gauzatzen den lehen aldia zen, eta ondorioa bikaina izan zen: 1948. urtean John Bardeen-ek, William Shockley-k eta Walter Brattain-ek transistorea asmatu zuten. Asmakizun horrek konplexutasunerantzko ikerkuntzaren garrantzia agerian utzi zuen, sinpletasunaren barrutian auresanezinak diren propietate eta ideia berriak aurki daitezkeela erakutsiz.

Supereroankortasunaren fenomenoak Kammerling Onnes-ek aurkitu zuen esperimentalki, 1911. urtean, merkurioak oso tenperatura txiki batetik behera (tenperaturak har dezakeen baliorik txikienetik oso hurbil, ~ -273 °C) erresistentzia elektrikoa galdu egiten duela erakutsiz. 1930eko hamarkadan materia osatzen duten partikulen banakako jokabidea (sinpletasuna) ezaguna zelarik ere,

zenbait materialek erakusten duten nolakotasun berri horren jatorria (konplexutasuna) ulertu ahal izateko zenbait urte igaro behar izan ziren. Supereroankortasunaren teoria kuantikoa Leon Cooper-ek, Bardeen-ek eta J. Robert Schrieffer-ek plazaratu zuten, 1957. urtean. Gaur egun BCS izenez ezagutzen dugun teoria horren arabera, supereroankortasunaren jatorria elektroi-bikoteek oso tenperatura txikitarako pairatzen duten kondentsazioan datza. Supereroankortasunik ez dagoenean elektroi bakar batek energia galtzen du, ez-purutasunekiko nahiz kristal-sarearen bibrazioekiko elkarrekintzaren eraginez, erresistentzia elektrikoa sortuz; aldiz, elektroi-bikoteen kondentsazioa suertatzen denean, horiek energia galtzeko ezintasuna erakusten dute eta erresistentzia elektrikoa nulua bilakatzen da.

BCS teoriak azaltzen duen supereroankortasunaren tenperatura kritikoa (tenperatura handiagoetarako supereroankortasunik ez dago) oso-oso baxua da ($T_c < -250\text{ }^\circ\text{C}$), supereroankortasun mota horrek teknologiaren aurrerapenari eman liezazkiokeen ekarpenak, beraz, urriak izanik. Alabaina, 1986. urtean Georg Bednorz-ek eta Karl A. Müller-ek supereroankortasun mota berri bat aurkitu zuten esperimentalki, material keramiko konplexu bat erabiliz. Hau tenperatura altuko supereroankortasuna dugu: Bednorzen eta Müller-en esperimentuan erabilitako supereroalearen tenperatura kritikoa $-230\text{ }^\circ\text{C}$ -koa den bitartean, 1987. urtean $-176\text{ }^\circ\text{C}$ -ko tenperatura kritikoko supereroaleak aurkitu ziren, eta gaur egun lor daitekeen tenperatura kritikorik altuena $-135\text{ }^\circ\text{C}$ -koa dugu. Tenperatura horiek giro-tenperaturarekiko txikiak izan arren, laborategi guztietan eskura dezakegun nitrogeno likidoaz baliaturik lor ditzakegu, eta etorkizunean giro-tenperaturan supereroankortasuna erakusten duten materialak aurkitu ahal izango dira, agian, horrek egungo gizartean sor lezakeen iraultza teknologikoa nabari-nabaria delarik. Adibidez, gure etxeetako argi-indarra ehundaka kilometro bidaiatu ondoren heltzen zaigu, zentral elektrikoek sorturiko energia gehiena bidean galtzen delarik. Argi-indarra daramaten kableak kobrezkoak izan beharrean supereroa-

leak balira ez litzateke energiarik galduko, energia elektriko hainbat merketuko litzatekeelarik.

Hamalau urte pasatu dira, dagoeneko, tenperatura altuko lehen supereroalea aurkitua izan zenetik eta fenomeno berri hori ulertzeko asmoz burutu diren ikerketa teoriakoen kopurua handia izan da, baina ahalegin guztiak hutسالak izan dira. Berriro ere, konplexutasunaren ondoriozko propietate emergenteen garrantziaren adibide baten aurrean gaude.

1970eko hamarkadan huts-teknologiaren garapen azkarrak gainazalen azterketa xehatua ahalbidetu zuen, hala nola ingeniaritza kuantikoa eta nanoteknologia. Sorta molekularen epitaxia teknikaz (MBE) baliaturik sustrato baten gainean atomo-geruzak banan-banan eraiki ahal izan dira, konposaketa %1-eraino kontrolatuz. Are gehiago, elektroien litografiari esker eite ezberdineko gainazalak eraiki dira, hala nola, erdieroaleen edota material magnetikoen arteko heteroegiturak, deigarriena beraien neurria izanik. Gaur eguneko txipa osatzen duten transistoreak 200 nanometrokoak ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) izan daitezke, miniaturizazio horrek konputagailuen memoriaren handipen ikaragarria dakarrelarik.

Schrödinger-en Uhin-Mekanika plazaratu bezain laster Robert Oppenheimer eta Gamow tunel efektu mekaniko kuantikoaz baliatu ziren, eremu elektriko bortitzen eraginpeko hidrogeno-atomoaren egoera kitzikatuen autoionizazioa eta nukleo pisutsuen α desintegrazioa azaltzeko, hurrenez hurren; eta objektu kuantikoek potentziallangak zeharkatzeko duten ahalmenari esker XX. mendean zehar diseinaturiko aparailuak asko izan dira. Urte asko itxaron behar izan ziren, aldiz, hutsean zeharreko tunel-korrontearen berri esperimentalala jaso arte. 1981. urtean Gerd Binnig-ek eta Heinrich Rohrer-ek, bi metalen arteko hutsean zeharreko tunel-korrontea kontrolatuz, tunel mikroskopioa (STM) diseinatu zuten, gainazaletako atomoen posizioak bereizmen handiz ikustea lortu zutelarik. Are gehiago, gaur egun atomoak banaka manipulatzeko ahalmena ere badugu, oraindik garatzear dagoen nanoteknologia sortu delarik.

Tunel mikroskopioaren bidez gainazaletako katalisi-erreakzio eta erreakzio kimikoak ere ikertzen dira, nanozientzia/nanoteknologiaren baitan fisika eta kimika bereiztezinak bilakatzen ari direlarik. Bestalde, oinarriko material biologikoak, hala nola DNA, lipidoak eta proteinak ere nanoteknologiaren barrutian koka daitezke, XX. mendearen bukaera aldera material horien egitura eta beraien arteko elkarrekintzak modelatzen hasi direlarik. Horretarako tunel mikroskopioak berebiziko garrantzia izan du, bai eta horren ondorengotzat har daitezkeen beste hainbat mikroskopio mota ere. Zalantzarik gabe, bada, maila nanometrikoan fisikak, kimikak eta biologiak bat egin dutena baieztatu dezakegu, eta milurteko berriaren atarian konputagailuen ahalmenaren handipenak hiru zientzia horien arteko lotura indartuko du.

Informazio eta konputazio kuantikoa

Sinpletasunetik konplexutasunerako bidean ustekabeko emaitzak sortzeko dagoen ahalmenaren erakusgarri berria informazio eta konputazio kuantikoaren sorkundea dugu.

1935. urtean Einstein-ek, Boris Podolsky-k eta Nathan Rosen-ek distantzia handitara kokaturiko partikulen arteko koerlazioa aztertu zuten, Mekanika Kuantikoak deskribatzen ez dituen aldagai ezkutuen beharrezko frogatzeko asmoz. John Bell-ek, 1964. urtean, aldagai ezkutuetan izanez gero esperimenterik beharrezko zenbait probabilitatek limite jakin batzuk baino txikiagoak izan beharko luketela frogatu zuen. 1982. urtean Alain Aspect-ek limite horiek gainditu egiten direneko esperimenteria burutu zuen, aldagai ezkuturik ez dagoela erakutsiz eta Mekanika Kuantikoaren osotasuna, bada, egiaztatuz. Gaur egun burutzen ari diren esperimenteru guztiek Mekanika Kuantikoaren iragarpenak egiaztatzen dituzte, Naturaren deskribapen lokalaren ezintasuna agerian jarritz. Halaber, esperimenteru horiek distantzia handitara kokaturiko partikulen arteko koerlazioa badagoela erakusten dute, eta partikulen propietateak, beraz, *konpartituak* izan daitezke, horrek izan ditzakeen ondorioak ikaragarriak direlarik.

Egoera konpartituak komunikabide kuantikoaren bizidun sistemen eraikuntzan erabili dira, dagoeneko, eta etorkizunean konputazio kuantikoa egia bihurtu lezake, beronen ahalmena pentsaezina izango litzatekeelarik. Kriptografia kuantikoaz baliaturik begiluzekeriari aurre egingo liokeen komunikazio-teknologia gara liteke, eta teleportazio kuantikoari esker informazioa elkartrukatzeko modua egongo da, ohizko irakurri-transmititu prozedurari jarraitzearen beharrezanik gabe.

Zientziaren alderdi guztien arteko lotura indartzen ari den une honetan Mekanika Kuantikoa biologian ere ikerkuntza eremu berrietara eramango ote gaituen galde diezaiokegu gure buruari. Biologiaren kimika azaltzeko orduan Mekanika Kuantikoa oinarri-oinarrian dagoena gauza jakina da, baina egon al daiteke sistema biologikoen gaineko koerlazio eta gainezarmen kuantikoaren eragin nabarmenik? Oraingoz erantzuna zein den ez dakigu.

Kimika eta biologia

Sinpletasunetik konplexutasunerako deskribapenaren maila berriak kimika eta biologian aurki ditzakegu. Lotura kimikoaren ezaguerak informazio genetiko guztia bame hartzen duen DNA molekula organikoaren helize bikoitzeko egituraren aurkikuntza ahalbidetu zuen, eta XX. mendearen bukaera aldera laserrak nahiz fotolitografiako metodo berriak erabiltzen hasiak ziren, gizakiaren DNA-ren sekuentzia aurkitzeko helburuarekin.

Are gehiago, konstante fisikoen balioak eta unibertsoaren eskala handiko egitura bera ere konplexutasun biokimikoaren eta beraz izaki bizidunen ugalketarekin erlazionaturik egon litezke, fisika, kimika eta biologia uztartuz. John Barrow fisikariak azpimarratzen duenez, gure unibertsoaren zenbait aspektu bizitzaren eboluzioaren aurkakoak direla dirudien arren konplexutasun biologikoaren existentziaren baldintza beharrezkoak besterik ez dira.

XX. mendeko zenbait fisikariek beren buruari egin dizkieten galderen artean hauxe dugu: zeintzuk dira, konplexutasun biokimikoa existi dadin, naturaren konstante ezagunek izan ditzaketen balioak? Kontsidera ditzagun,

adibidez, elektroien eta protoien masen arteko zatidura ($\frac{m_e}{m_p} \sim 1/1840$) eta egitura meheko konstantea, hots, oinarriko egoerako hidrogeno-atomoaren elektroien abiaduraren eta argiaren abiaduraren arteko zatidura ($\frac{v}{c} = \frac{e^2}{2\epsilon_0 hc}$, non e delakoa elektroien karga den, h , Planck-en konstantea, eta ϵ_0 , hutseango permitibitatea). $\frac{v}{c}$ a reagentuz gero ez lirateke egitura molekular ordenatuak egongo eta bizia ez litzateke existituko, elektroiek nukleoaren Coulomb-en elkarrekintzaren eraginpeko ongi definituriko posizioak izateko modurik ez bailitzateke egongo. Bestalde, $\frac{v}{c}$ delakoa $\frac{v}{c} > 200$ baino txikiagoa balitz ez litzateke izarrik egongo eta elementu biokimikorik ez litzateke existituko, gas-lainoen tenperaturak errekontza nuklearra abiarazteko txikiak izango bailirateke.

Erredukzionismoa

Ezagaturiko materia bere osagarri elementaletan erreduzitzeko tendentzia historian zeharreko konstante bat izan da. Dagoeneko duela bi mila urte filosofo grekoek jarrerara honen oinarriak ipini zituzten munduko konplexutasuna azaldu nahian, bere osagarri elementaletan erreduzitu zutenean. Kristo aurretiko seigarren mendean Tales-ek proposatu zuen gauza guztien oinarriko elementua ura zela; ondoren pentsalariak mundua lau elementu lurtarrez osaturik zegoela proposatu zuten: lurra, airea, sua eta ura. Osagarri horien kantitate osoak iraun egiten zuela pentsatzen zuten, baina beraien artean era oso ezberdinetan nahas zitezkeela pentsatzen zen. Gorputz zerutiarak bosgarren osagarri edo esentzia batez osaturik zeuden, eterea edo «quintaesentzia» deiturikoa, hain zuzen ere. Gaur egun, nekez lorturiko jakituria dela medio, pentsamolde honek iribarrea sor diezagukeen arren, bere baitan oinarriko aurrerapena dakar, argumentu magikoen arbuiapena, hain zuzen ere. Anaxagoras-ek (500-428 k.a.) aurreko teoriak oinarritik hobetu zituen, partikula edo «atomo» kopuru infinituaz populaturiko unibertso infinituan pentsatzen zutenean. Izan ere, zerua eta lurra substantzia ber-

berez eginak zeudela proposatu zuen, «heresia» hori zela-eta bere bizia kinka larrian jarriz. Leuzipo-k ere materiaren teoria atomikoa garatu zuen, eta ondoren bere ikasleak, Demokrito-k, teoria hori aurrerago eraman arren, gehienek teoria ahanzi egiten dute, filosofo nagusienek, Aristoteles-ek, Platon-ek eta Sokrates-ek arbuia egin zutelako. Hala ere, beranduago, Epikuro-k (341-270 k.a.) ideia atomikoak berpiztu zituen.

Atomismoaren ezaugarri nagusia, mundua bi osagaiez osaturik dagoela sinestea da: deuseztatu ezinezko atomoak eta hutsa. Atomoak banaezinak dira, hutsean barrena aske mugi daitezke eta eite ezberdin askotan bil daitezke sistema konplexuak sortuz. Atomoak txikiegiak ziren zuzenki ikusi ahal izateko. Kimikaren jaiotzarekin, hipotesi atomikoa era sistematikoan sartzen da pentsamendu zientifiko modernoan. John Dalton (1766-1844) kimikariak atomoek pisu ezberdinak dituztela, eta konposatu kimikoak osatzeko proportzio jakin batzuetan nahasten direla proposatzen du, baina oraindik ere, atomoen ebidentzia fisiko zuzena falta zen. XIX. mende amaiera arte itxaron behar da falta den ebidentzia aurkitzen hasteko. Gaur egun, gutxi gorabehera 90 elementu natural identifikatu dira lurrian eta dozena bat baino gehixeago artifizialki sortu dira.

Aurreko lerroetan ikusi dugun bezala, atomoak nukleo eta elektroietan bana daitezkeela aurreko mendean ikasi genuen. Eta ez hori bakarrik, nukleoa bera ere protoi eta neutroietan bana daiteke eta hauek are gehiago quaraketan. Ezagutzen ditugun naturako lau elkarrekintzen kasuan ere, grekoek hasiriko tendentzia erredukzionisten bitartek darraite aurrera lau elkarrekintza horien baturaren atzetik, hots, teoria batuaren atzetik. Beraz, iraganean fisika, bere kontzepzioan, oso erredukzionista izan da, natura osagarri gero eta txikiagoen arabera aztertzean eta batasuneko oinarrizko legeak ezagutaraztean.

Zientiaren eta Teknologiararen XX. mendeko garapena arautu duten lorpen nagusienetarikoak laburbildu aurretik, Richard Feynman-ek, XX. mendeko fisikari handienetarikoak, idatzitako *The Feynman Lectures on Physics* liburuan bere buruari egiten dion galderara joko dugu:

Kataklismo batean zientziaren ezagutza guztia galduko balitz eta ondorengo belaunaldira perpaus bat besterik transmitituko ez balitz, hitz kopuru gutxieneko zein esaldik transmitituko luke informazio maximoa?

Feynman-en erantzuna *hipotesi atomikoa* da, gauza guztiak atomoez eginak daudela, geratu gabe etengabe higitzen ari diren partikulak, elkar erakarriz banatzen direnean, baina elkar aldaratuz metatu nahi direnean. Beraz, hipotesi atomikoan oinarrituta, hiru dira, gure ustez, XX. mendean Zientziaren eta Teknologiaren alorrean mugak zabaldu dituzten lorpenak. Hiru hitzekin sintetizatuko ditugu: *atomoa*, *genea* eta *bita*. *Atomo* adieraztean, aurreko mendea materiaren egituraren ikuspegi mikroskopiko batetik bideratu duela esan nahi da, hots, bide horretatik materia ulertzeaz gain gure onurarako erabiltzerik izan dugularik. *Gene* aipatzen denean, lotura kimikoaren ezagutzak DNA-ren helize bikoitzaren egituraren aurkikuntza bideratu duela esan nahi du, bere baitan «erreplikaren» mekanismoa atxikirik daramana eta beraz Crick-en hitzak jarraituz «Biziaren Sekretua» gordetzen duena. Eta, *bit* aipatzean, informazioaren bitaz ari gara, edo era ulergarriagoan konputagailuaz, XX. mendeko non-nahiko tresna, hain zuzen ere.

Aurrerapen hauek guztiak ere erredukzionismoaren bidetik lortu dira, hots, ikertzeko objektua zati txikiagoetan banatuz, eta gero zati horiek guztiak perspektiba global batean berrosatuz lortu dira. Erredukzionismoa ez da fisikara mugatzen, Zientzia guztia da hein handi batean erredukzionista, eta adituak behar ditu. Erredukzionismoak espezializazio galanta eskatzen du. Etorkizunak ikuspegi globala eskatzen du, diziplina ezberdinen arteko lan komuna, hain zuzen ere. Beraien diziplinetan adituak (espezialistak) diren generalistak beharko ditugu.

Hala ere, arrisku galanta dago erredukzionismoa murreraino eramaten bada. Einstein bera ere arrisku horretan erori zen, erredukzionismoa era erradikal batean murreraino eramanez, ondorengo bere hitzek agerian erakusten diguten bezala: «Fisikari baten test nagusi

sia, kosmosa, dedukzio purua jarraituz, eraikitzeko bidea emango duen oinarritzko lege unibertsalera iristea da».

Erredukzionismo prozesu horrek mito erredukzionistara eramaten gaitu, hots, oinarritzko legeak ezagutzen gero orozagutzen dela ondorioztatzen. Izan ere, horixe egiten dute *Physics World* aldizkari zientifikoan fisika teorikoaren amaiera hurbil ote dagoen hainbat zientzialariri galdetzen diotenean. Inplizituki, teoria batuaren lorpenak («*Theory of everything*» deiturikoa) fisika teorikoaren amaiera dakarrela argudiatzen ari baitira. Horrelako galderari, Phil Anderson nobel saridunak, zuzen erantzuten dio:

The question is an insult to me and to all those who call themselves theoretical physicists. A unified theory is unlikely to tell us much at all, though it may simplify a few questions about cosmology. Theoretical physics has plenty of problems on the frontier of complexity to keep us busy for quite a while. For instance, the problem of how life originated is at least partially a physics one. [Galdera hori iraingarria da niretzat eta bere burua fisikari teorikotzat duen edonorentzat. Nekez esango digu ezer askorik teoria batuak, nahiz eta kosmologiari buruzko galdera gutxi batzuk sinplifika ditzakeen. Fisika teorikoak baditu konplexutasunaren mugatan gu tarte luze batean lanpetuta edukitzeko adina arazo. Adibidez, bizitzaren sorreraren arazoa, partzialki bederen, fisikarena da.]

Bide beretik, Procaccia zientzialariak dio maila handi batean erredukzionismoak porrot egin duela, konplexutasuna (gure ingurune osoa) ulertzeko, teoria batura iristeko proposatzen diren kontzeptuekin ezin baita hasi. Erredukzionismoa ezin da maila horretan bakarrik azaldu, maila bakoitzak bere logika, matematika eta fenomenologia ditu-eta. Demokrito eta Leuzipo-ren Greziatik gaur egun arte, eta Steven Weinberg nobel saridunak gogoratzen digun bezala, oinarritzko partikularren ideia edo kontzeptua zientzialariren helburu nagusiaren ikurra izan da: *Naturaren konplexutasuna termino sinpletan ulertzea*. Procaccia-~~ren~~ bidea jarraituz, ikurra zabaldu egin behar da, maila bakoitzean konplexutasunaren ulermenak oinarritzko ezaugarriak dituela aldarrikatuz. Hots, helburua berbera da, konplexuta-

sunako termino sinpleetan ulertzea, baina terminoak maila bakoitzean ezberdinak izan daitezke eta izan behar dute.

«More is different» artikulua famatua Anderson-ek dioenez, «hipotesi erredukzionistak ez du inola ere hipotesi konstruktibistarik sortzen». Oro oinarriko lege sinpleetara erreduzitzeko trebetasunak ez du esan nahi lege horietatik hasita unibertsoa eraiki daitekeenik, ez eta gutxiagorik ere. Hipotesi konstruktibistak porrot egiten du eskalako eta konplexutasuneko zailtasunei aurre egin behar zaienean.

XX. mendean barrena ezagupena hainbat maila ezberdinetan egituratzen dela ikasi dugu, beraien artean loturarik gabe, baina aurrekoarekin bateragarriak. Horregatik, kimika, fisika aplikatua baino askoz gehiago da, eta medikuntza, biologia molekularra baino askoz gehiago ere. Izan ere, maila askoz gehiago daude; etikaren eta DNA-ren artean distantzia askoz handiagoa dago DNA-ren eta oinarriko partikulen artean baino.

Gaur egungo munduaren konplexutasuna fisika atomikoaren sinpletasunetik sortzen da, lege baten eskutik, oinarriko lege bakar batetik, Coulomb-en legetik hain zuzen ere; beharbada Pauli-ren bateraezintasunaren printzipioa gehitu beharko genuke (elektroiek ezin dutela den-dena berdin eduki dion printzipioa). Baina, argi dagoena zera da: atomo asko dagoenean, hots, 10^{23} atomo (materiaren 1 cm^3 -ko atomo kopurua neurria), hots, bilioika bilioi atomo; bilioika bilioi atomok, atomo bakar batek egin ezin dituen gauza asko egin ditzakete. Hau da, propietate berrien emergentzia sortzen da materiaren oinarriko osagarrien arteko elkarrekintzen bidez, hain zuzen ere. «Oinarriko» partikulez osaturiko aglomeratuaren portaera ezin da ulertu partikula gutxi batzuen estrapolazioaren bidez; era berean, futbol estadio bateko paniko egoerak ezin dira ulertu bi pertsonen arteko elkarrekintzen bidetik. Propietate «emergente» berriak agertzen dira, sasoi batean marxistek, Engels aipatuz, esaten zutena: «kantitatea, (10^{23} atomo) kalitate bilakatzen da». Hemingway-k kantitatea kalitate bilakatzen deneko ideia oso ongi laburbiltzen zuen, Parisko kaleetatik zihoanean, Fitzgerald-i esaten zionean: «Aizu, aberatsak gugandik oso ezberdinak dira» —kalitatea—.

«Bai, bai —erantzuten zion Fitzgerald-ek—, diru askoz gehiago daukate» —kantitatea—.

Maila bat bestearekin lotzeko arrastoak egon arren, ezinezkoa da aglomerazioak sortzen duen konplexutasuna deduzitzea. Izan ere, XX. mendeko zientziaren egituraketaren giltza «prozesu emergenteena» izan da. Horren adibide esanguratsu batzuk aipatzearen, supererorkortasuna, superjariankortasuna, Hall efektu kuantikoa... Horrek ez du esan nahi, hala ere, arlo batean erabiltzen diren ideiak eta teknikak bestetan erabilgarriak ez direnik.

Konplexutasunaren ulermen hori, hots, osotasuna bere zatien batura baino askoz gehiago izatea, fisika kuantikoaren arakastaren oinarrian dago. Eta hori dela-eta, materiaren ezagutzaren bidez gure onurarako erabili dugu. Aldaketa iraultzailea sortu du energia ekoizteko eran, komunikatzeko eran, harremanetan, ekonomian; hitz batean esanda, kulturen aldaketa itzela eragin du.

Etorkizuna

Atal honi hasiera emateko *Nature* aldizkari zientifiko ospetsuaren J. Maddox zuzendari ohiaren hitzekin abiatuko gara.

Azken mendeak, aurkikuntza- eta berrikuntza-uzta ederra ekarri du. Hala eta guztiz ere, hurrengo mendeetan oraindik aurrerapen aberatsagoak lortuko dira. Zientzia bere hastapenetatik amaieratik baino hurbilago dago.

Argi dagoena hauxe da, iraganean bezala orain ere aurrean gabeko eta aurrean ezinezko sorpresak izango ditugula. XIX. mende amaieran nork imajina zezakeen denbora gutxira Einstein-ek honakoa proposatuko zuela, hots, ezerk ezin duela argia baino abiadura handiagoz bidaiatu? Edo berehala aurkituko zela unibertsoa zabaltzen ari dela? Edo DNA-ren egiturak emandako bizitzaren azalpena kitzikagarria izango zela bizitza prozesuaren xehetasun gehiago ulertzeko? Hurrengo mendeetan mota honetako hainbat sorpresa egongo da. Inork ezin du aurrean sorpresa horiek zeintzuk izango diren eta nora eramango gaituzten.

XIX. mendearen bukaera aldera, 1874. urtean, Philipp von Jolly fisikariak eta Munich-eko Unibertsitateko Fisika Fakultateko Dekanoak Max Planck gazteari fisika ez den beste zerbait ikas zezan gomendatu zion ondoko hitzekin: «Fisika ia osaturik dagoen zientzietako adarra da. Aurkikuntza garrantzitsu gehienak eginak dira. Beraz, ez du merezi fisika arloan ikasketak egitea». Eskerrak Planck-ek Dekanoak esandakoa ez zuen jarraitu, Fisika izan baita XX. mendean gehien aurreratu den zientzia, eta horregatik Fisikaren mendea deitu ohi zaio. Eta Planck bera izan zen, hain zuzen ere, Fisikaren garapenean lehendabiziko harriak jarri zituenetarikoa. Esan beharra dago gainera, XIX. mendearen amaieran Munich-eko Fisika Fakultateko Dekanoaren iritzia komunitate zientifikoaren baitan oso zabaldurik zegoela. Horren lekuko, 1894. urtean A.A. Michelson fisikako lehen nobel saridunak esan zuena: «fisikaren lege garrantzitsuenak dagoeneko ezagunak dira». Alabaina, XX. mendearen hasieran ideia berri eta aurre-sangaitzak plazaratu ziren, gaur eguneko zientziaren oinarriak finkatuz, eta ordutik hona gauzaturiko aurkikuntzen nahiz berrikuntzen kopurua paregabea izan da. Era beretsuan, datorkiguna zer den ezin dugu auresan, baina datozen mendeetan zientziaren garapenak eskainiko dizkigun aurrerapenak XX. mendekoak baino handiagoak izanen direla baieztatzen auzar gaitezke.

Ondoko lerroetan, zientzia eta teknologiako atal ezberdinetan mende honetan gerta daitezkeen aurrerapenak auresatera ausartuko gara. Irakurle, gogoratu goian aipaturiko guztia, hots, XIX. mendean inork ez zuela gero etorkiko zena auresan; kasu honetan ere, muga berbera daukagu. Aipatuko diren gai batzuk, egungo erronka nagusiekin lotuta daude (grabitazio kuantikoa, garuna...); beste zenbait arlotan, berriz, auresankortasunak erazagoa dirudi, XX. mendearen amaieran arlo horiek itzelezko bultzada jasan baitzuten eta gutxienez mende honetan beraien jarraipena espero baita.

Oinarrizko Zientziak

Oinarrizko zientzietan hainbat galderak erantzuna itxaroten dute, eta guztietatik larrienak espazio eta denboraren egungo ezagutzara garamatza. Lehenago aipatu denez, Einstein-en teoria unibertsoa ezagutzeko eta bere garapena auresateko erreferentzia da. Erlatibitatearen teoria orokorrak doitasun handiz azaltzen du grabitazioa. Meknika kuantikoa elektroia bezalako objektu oso txikien higidura deskribatzeko lengoia da. Teoria bi hauek XX. mendeko lorpen handiak izan dira. Baina, beraien arteko uztarketa, orain arte, porrota izan da, eta XXI. mendeko erroka nagusienetarikoa bat da berau, grabitate kuantikoa hain zuzen ere. Bi teoria horiek uztartu arte, ezin izango da unibertsoaren jatorriari buruzko deskribapen koherentea egin, nahiz eta egun dauden datuen arabera, unibertsoa tenperatura handiko espazioko burbuila batetik sortu zen. Tenperatura horrek nahikoa izan behar zuen, burbuila zabaltzen joan ahala, izar guztien masa galaxietan sortzeko eta unibertsoa zabaltzen mantentzeko.

Inork ez daki aipaturiko bi teoria horien uztarketa etorkizunean nola gaitutuko den. Ziur asko espazioari buruzko egungo kontzepzio jarraitua hankaz gora eroriko da. XX. mendean fisika kuantikoak ondorioztatu duenez, energia objektu batetik bestera kantitate diskretuetan edo *quantum*etan transferitzen da, eta karga elektrikoa nahiz atomoaren energi mailak kuantizaturik daude, hots, kantitate finko eta diskretuetan ematen dira. Etorkizunean, beharbada, atomoaren egoera kuantikoaz berba egiten dugun bezalaxe, espazio-denborako eskualde baten geometriaren egoera kuantikoari buruz berba egingo da, hots, era diskretuan ere.

Garuna

Beste muturreraino joanik, zalantza izpirik gabe esan daiteke egungo ezagutzaren huts handiena garunaren funtzionamenduaren ezjakintasunean datzala. Gizakia harroen sentiarazten duen funtzioa, pentsatzeko ahalmena, ezezaguna da. Garunak pentsatzeko ahalmena nola garatzen duen ez dakigu. 1880. urtean Ramón y Cajal-en

eskutik hasi zen gizakiaren garunaren ikerkuntza sistematikoa. Hala ere, egun inork ez daki, erabaki bat hartzeko prozesuan, neuronen (nerbio-zelulak) jokaera zein den. Horrek erantzunik gabe jarraitzen duen bitartean, ezin dugu esan garunaren funtzionamendua ulertzen dugunik. Izan ere, horrek esan nahi du eskizofrenia bezalako gaixotasun psikiatriko larrietan, garuna gaizki dabilenean, ezin dugula azaldu garunean zer gertatzen den edo normalitatearekiko bereizketa egin.

Goian aipaturiko prozesu kognitiboen ezagutza eza oso lotuta dago geneek eta inguruneak gizakiaren pertsonalitatean duten eraginarekin. Giza-geneei buruzko funtzionamenduan azken hamarkadetako ezagutza azeleratuak, zenbaitetan, edozein gizakiren ezaugarriak geneek mugatzen dituztela pentsatzera eramán arren, hori ez da horrela. Psikiatrak eta psikologoak mende bat baino gehiago egon dira gizakiaren pertsonalitatea aztertzen, eta agerian utzi dute gure haurtzaroko hezkuntzaren eragina pertsonalitatean. *Natura* eta *estimuluaren* arteko oreka oso eztabaidatua izan da. Bi eragin horien arteko orekaren ezagutza lor dadin, ezinbestekoa izango da genetikaren mugak ikerketa sakonago batez definituta geratzea eta garunak nola funtzionatzen duen hobeto ezagutzea. Orduan, XXI. mendeko unerén batean psikologia berreraikiko da, genetika eta nerbio-sistemaren ezagutza berrietan oinarrituta. Bitartean, geneak oso garrantzitsuak izan arren, hainbatetan errepikaturiko «geneen ondorioa gara» esaldiari ez zaio kasu gehiegirik egin behar, geneak oso-oso garrantzitsuak izanda ere zerbait gehiago bagara-eta.

Nanoteknologia/Konputagailuak/Bioteknologia

Hala ere, zenbait gauza auresan daitezke. XX. mendeko azken urteetan zientziako hiru arlok bultzada itzela hartu dute, eta ziurrenik gizartearen bizitzan eragin ikaragarria izango dute XXI. mendean. Ez ginateke harrituko XX. mendean gure gurasoen eta aiton-amonen bizitzek jasandako aldaketak baino askoz handiagoak gertatuko balira XXI. mendean. Nanoeskalako zientzia, informazioa-

ren zientzia eta biologia molekularra oso arin garatzen ari dira ingeniartzako diziplinatan bilakatzeko, eta hurrengo urteetan bakoitzak iraultza teknologiko garrantzitsu baten ardura izan dezake.

Gainera, gizartearen historia osoan ez da horrelakorik jazo, hots, aldaketa iraultzaile horiek guztiak aldiberean gertatzea. Sortuko diren teknologiek elkarri bortizki eragingo diote ikerketa-arlo berriak sortuz, eta, ziur asko, intelektuaren eta ekonomiaren garapenerako probetxugarrienak beraien arteko gainezarmenak sorturiko eremuak izango dira.

Nanoteknologia

Aipatu den legez, etorkizuna auresatea oso arriskutsua izan arren, agerian dago nanoteknologiak edo atomoen neurrian eragiten duen ingeniartzak bide ikusgarriak zabalduko dituela mende berri honetan. Atomoak eta molekulak dagoeneko banan-banan manipula daitezke. Nanoteknologia atomikoak eta molekularrak pentsatu ezinezko bideak jarraituz mende honetan ikaragarritzko eraginak sortuko dituela itxaroteak arrazoizkoa dirudi. Pentsatu ezinezko mailako errobotak ez dira inondik ere fikzioa.

Materialen propietateak maila atomikoan eta maila horretako toki berezietan ikertzeaz ari gara, hots, atomo soilen ingeniartzaz edo nanoteknologiak, hain zuzen ere. Zenbaitetan, Zientzia eta Teknologiaren etorkizuneko bigarren buruzko auresanek huts egin dute; beraz, horrelako burutapenak tentu handiz hartu behar dira. Baina, une honetan behinik behin, argi dirudi etorkizuneko urrats garrantzitsu bat, egungo mikra eskalatik (edo mikrometro eskalatik) etorkizuneko nanometro eskalara salto egitea izango dela. Miniaturizazioa, azken hamarkadetan, milimetro eskalatik mila aldiz txikiagoa den mikra eskalara pasatu da. Lorpen teknologiko itzela izan arren, ez du oinarritzko iraultza zientifikorik eragin. Dagoeneko bazegoen egon oinarritzko ezagutza zientifikorik, eta mikroskopia elektronikoa bezalako tresnen edota metodoen garapenek aipaturiko miniaturizazioa egia bihurtu dute. Nanometroaren eskalan, berriz, kontzeptu berriak beharko dira, eta

hauek teknologia berriak eskatuko dituzte. Maila horretan, fisikak ideia berriak behar ditu. Ideia berriak lortu ostean, horrek loturik ekarriko duen aurrerapenak atzerako urratsa eskatuko du, hots, maila nanometrikoan ikasitakoa maila handiagoetara aplikatzea, konplexutasuna oraindik ere are gehiago handituko delarik.

Konputagailuak

Badirudi azken 20 urteetan gure mahai gaineko ordenagailuek jarraitu duten tendentziak, abiadura eta ahalmen handiagoarena, 2010-20ra arte jarraituko duela, orain dugun ezagutzaz baliatuz. Ohar gaitezen XX. mendeko azken 21 urteetan konputagailuetako txipen 7 belaunaldi egon direla. Bakoitzak aurrekoak baino 4 bider transistore gehiago zeukan. Denbora tarte horretan, beraz, informazioa metatzeko eta prozesatzeko konputagailuen ahalmena 16.000 aldiz gehitu da. Transistoreak gero eta txikiagoak direnez, txip bakoitzean transistore askoz gehiago eta hurbilago koka daitezke, beraz txipak askoz ahaltsuagoak eta arinagoak bihurtu daitezke.

Mota honetako aurrerapenak duela 21 urte pentsatu ezin ziren hainbat produktu sortu dituzte, adibidez mahai gaineko konputagailuak, sakeleko telefonoak, kamera digital merkeak eta Internet.

Transistoreen metaketan eman diren aurrerapen itzelek muga galanta dute. Adibidez, transistoreetako Si-SiO₂-Si heteroegituretan, Si aldean arteko SiO₂ interfasea gero eta estuago eraikitzen saiatu dira, transistoreak ahalik eta txikiak izan daitezen txip bakoitzean gero eta transistore gehiago metatu ahal izateko. Baina, interfaseen zabalera Angstromaren mailara iristen denean (egun 20 Å ingurukoa), transistore efektua eragozten duten mota ezberdinetako efektuak agertuko dira (estatistikoak, elektroien tunelaketak...) eta bide horretatik ezin izango da miniaturizazioa jarraitu. Aipaturiko muga 2010-20 inguruan gertatuko dela pentsatzen da, eta ordutik aurrera konputagailuen garapena nanoteknologiaren bidetik etorriko da.

Nanoteknologiaren helburuetariko bat konputagailuetako zirkuitu integratuen eremuan dago, eta dagoeneko

munduan zeharko hainbat taldek bide honetan lan egiten dihardute. Etorkizuneko zirkuitu integratuetan, egungo silizioko txipak izan beharrean, osagai indibidualak plastiko malguetan depositatuko dira prozesu kimikoen bidez, eta argazkietako pelikulen itxura ukan dezakete. Osagai indibidualak «switch» molekularrak eta nanohariak izango dira. Elementu horiek nanometro mailakoak direnez, osagaien dentsitatea askoz ere handiagoa izango da, eta egungo teknika litografikoen bidez eginiko edozein zirkuitu baino askoz ere arinagoak izango dira.

Azken 20 urteetan, informazioa kontzeptu fisikoa dela ohartu gara eta unibertso materiala gidatzen duten lege berberak gidatzen dutela jakin dugu. Azken urteetako informazioaren ulermenak bide eman die konputazio eta komunikazio kuantikoan gertatu diren hainbat garapen kitzikagamei, zeinak aldizkari teknikoetan zein egunkari arruntetan argitaratu baitira.

Informazioaren natura fisikoaren ulermen hobeagoa lortzen denean, garrantzitsua den informazioa biltzea, gordetzea, prozesatzea eta berreskuratzea errazagoa izango da. Hainbat oso kexu da informazioak gainezka egiten digulako, baina, beharbada, aurkakoa jasaten dugu. Klasifikatu gabeko informazio uholdea daukagu, berez balio gutxikoa; horrek kemena eta denbora itzela eskatzen du informazio erabilgarri bihurtzeko. Web-eko aurkitzaile bat erabili duen edozeinek ongi asko daki egindako galderarekin harreman gutxi duten milaka gauza iristen zaizkiola. Beraz, Web-eko bezeroak oso ongi ulertzen du arazoa. Informazioaren naturari buruz gehiago ikastea, informazioa sailkatzeko eta banatzeko tresnak eta algoritmoak erabiltzeko gai izango gara, eta hura gure ezagutzaren parte bihurtuko da. Eta hori erabakiak hartzeko oso lagungarri gerta dakiguke.

Bioteknologia

Oso arin garatzen ari diren zientzi arlo horietatik, jende arruntarentzako ezagunena biologia molekularrarena da. XXI. mendean eragin handia izango duen teknologia abiatuko da, geneek organismo bizidunengan duten

ezagutzatik datorrena, hots, bioteknologia. Dagoeneko giza-genomaren mapa osoa lortu da. Are gehiago, genomak gordetzen dituen funtzioak zeintzuk diren eta nola eragiten duten ulertzen hasiak gara. Hoberako edo txarrerako, genetikoki aldaturiko landareak eta animaliak sortu ditugu, eta beste zenbait material berri eta polimerikoentzako, drogentzako eta botikentzako ingeniartzaren oinarria izan daiteke. Teknologia hau dagoeneko erabiltzen da ospitaletan, non beste ezein bidetik sortu ezin diren botikak erabiltzen diren. Adibide bat diabetesaren tratamenduan erabiltzen den insulina da. Duela gutxi arte, txerrietatik lorturiko insulinaz tratatzen zen jendea. Lehenago tratamendurik ez zeukaten gaixotasunak sendatzeko hainbat eta hainbat medikamentu esperimentatzen ari dira, homologazio definitiboa lor dezaten.

Nano-, info- eta bio-teknologiaren etorrera bateratuarekin, gaur egun erabiltzen ditugun hainbat gauzen jokaera milaka aldiz hobeto daiteke. Oraindik garrantzitsuagoa, gaur egun oso garestiak edo ezinezkoak diren zenbait gauzen eta zerbitzuen asmakuntza ikusiko dugu. Horrek guztiak aldaketa itzelak eta oso arinak eragingo ditu. Gizartearentzat oso zaila izango da hain arin aldatzen ari den eta are arinago aldatuko den ingurunera egokitzea.

Hurrengo urteetan, ziur asko, posible izango da fisikari batek kimikariak idatzitako substantzia baten formula kimikoa sintetizatzea. Nola? Kimikariak esaten duen tokian atomoak kokatuz, substantzia eraikiz. Kimika eta Biologiako arazoak gainditzeko oso lagungarria izan daiteke maila atomikoan zer egiten ari garen, «ikusteko» gai bagara.

Egungo superkonputagailuak baino konputazio-potentzia gehiago jantzea ahalbidetuko du nanoteknologiak. Jantzearekin haxe esan nahi da, erlojua jantzen dugun bezalaxe, gurekin batera jantzita emango ditugula etorkizuneko ahalmen handiko konputagailuak. Internet (World Wide Web) nahi dugunean eta bat-batean, ura edo elektrizitatea bezala, jantzita daramagun konputagailuaren bitartez erabili ahal izango da, eta behar dugun informazio erabilgarria zuzenean bilatzeko moduan izango gara.

Gaur egun pertsona baten diagnostiko medikoa egiten den legez, etorkizunean pertsonaren genoma osoa irakurriko da. Medikuak gai izango dira gaitza diagnostikatzeko eta pertsona jakin horrentzako egokituriko tratamendu partikularizatua agintzeko.

Eta zergatik ez, medikuntzako ebakuntzetan kirurgia-laria zainetatik, giharretatik, pertsonen barrenera sartuko da. Kirurgialari mekanikoa odol zainetan ipiniz bihotzeraino zuzenduko da, eta inguruan «begiratu» ostean (informazioz elikatu beharko litzateke), gaizki dagoen zaina aurkitu eta, laban txikitxo bat zabalduz, hura ebaki eta josteko gai izango da. Beste makina txikitxo batzuk ere behin-behinean edo behin betiko ondo funtzionatzen ez duen organoari laguntzeko gorputzean kokaturik egon litezke. Horrelako asmakuntzak, basati xamarrak, urrun daudela iruditu arren, ez ukan zalantzarik mende honetan egia bihur daitezkeela. Izan ere, ziur asko, mota horretako hainbat eta hainbat aplikazio tekniko gauzatuko dira.

Fusio Energia

Gizartea garatu ahal izateko, energi iturriak funtsezkoak dira, denok dakigunez. 1970eko hamarkadan petrolioaren krisiak mendebaleko gizartea larritu zuen eta energi iturri berri eta zaharren garapena areagotu egin zuen. Eta gaur ere, energi iturriak eta hauen inguruko arazoak gizartearen kezka nagusietakoak dira. Zalantzarik gabe baieztatu daiteke energiaren problematika «harri aroan» dagoela, XX. mendea ez baita gai izan energiaren arazo larria gainditzeko. Egun erabiltzen diren energi iturriak, sailkapen zabal bat eginik, bi motatakoak direla esan dezakegu:

1) Energi kopuru handiak ekoizteko gai direnak: fisiko zentral nuklearrenak eta erregai fosilenak, hain zuzen ere. Teknologikoki oso garatuak dira, ikuspegi ekonomiko-tik oso emankorrak, baina ingurugiroarekiko kaltegarriak izan daitezke (Txernobil, hondakin erradioaktiboak, euri azidoa...).

2) Energia alternatiboak: printzipioz garbiak dirudite, ingurugiroari ez diote erasotzen (nahiz eta azken bolada

honetan energia eolikoak eztabaida sortu duen), baina ez dira gai egungo gizartearen egiturak behar duen energi kopuru itzela sortzeko.

Munduko populazioa haziz doan heinean eta jendeak energi baliabide urrietatik ihes egiten duen heinean, XXI. mendean energia nazioarteko egonkortasunerako oso preziatua izango da. Populazio hazkuntzaren estimazio kontserbakorrenak kontuan hartuz ere, argi dago energiaren kontserbazioa eta energia berriztagarrien aurrerapen handiak ere ez direla nahikoa izango munduko gizartea sustatzeko. Mende honen bigarren erdian, ingurugiroan kalte gutxi egiten duten eta hondakin kaltegarririk uzten ez duten energi iturri berriak beharko dira.

Energi iturriei buruzko eztabaida horretan, hainbatean aipatzen da etorkizunean energi dentsitate itzelak sortzeko gai izango den energi iturria, Eguzkia eta izarrak pizten dituen energiaren oinarriturikoa, izango dugula, hots, amaigabea eta garbia. Gero eta hurbilago dagoela esan arren beti urrun dagoena. Bai, fusio nuklearrean sortzen den energiari ari gara. Atomo arinek, fusionatzen direnean, elektrizitate bilaka daitekeen energia askatzen dute. Hidrogenoaren bi isotoporen, hots, deuterioaren eta tritioaren arteko fusio erreakzioa laborategian egin daiteke. Teorian, populazioaren hazkundera edozein delarik ere, gizarte osoaren energi beharrak ekoizteko ditzake. Bestalde, ez du berotegi efektua eragiten duen gasik sortzen, eta fusio erreaktorea, erregai-kopurua oso urria denez, edozein unetan da segurua. Erreaktorearen urteia edo fisioko erreaktorean gerta daitekeen beste edozein egoera kritiko ezinezkoa da. Fusioko erreakzio nuklearrean sorturiko neutroiek erreaktorearen egitura aktibatua arren, bizi luzeko hondakinik ez da sortzen.

Fusio nuklearrerako, elkar aldaratzen duten nukleo arin bi batu egin behar dira, hots, bi nukleo horien aldarapen elektostatikoa gainditu, nukleoak batzeko gai izan daitezten. Ohar gaitzkeenez, fusio-prozesua ez da batere erraza. Izarrek masa handia (itzela) dutenez, erakarpen grabitatorioari esker izarren masa guztia konfinatzeko gai dira; hari esker, nukleoaren arteko batzeak energi andana

igortzen du espaziorantz. Lur planetan horrelako konfinamendu grabitatoriorik gerta dadin ezinezkoa da; beraz, nukleoan konfinamendu hori bestela egin behar da.

Fusio-erreakzioak lortzea, era kontrolatuan zein kontrolgabean, ez da berehalakoa. Egun garatzen ari den fusio-erreakzioetarako teknologian lehenengo urratsa fusio-erreakzioaren elektroien eta ioien zopa lortzea da, *plasma* hain zuzen ere. Plasma gure planetan agerian ez dagoen materiaren beste egoera da, laugarrena hain zuzen ere. Lurrean ez aurkitu arren, unibertsoko materiaren %99 plasma-egoeran dago. Solido bat berotuz, likido bihurtuko da eta, areago berotuz, lurrundu egingo da, gas bihurtuta. Berotzen jarraitzen badugu, tenperatura 11.000 °C-ra iristean, gasaren atomoak elektroiak galtzen hasiko dira eta elektroien negatiboz eta ioi positiboz osaturiko zopa bilakatuko dira. Halere, egoera honetan ez da oraindik fusio-erreakziorik gertatuko, ioi positiboaren arteko aldarapen-indarra baitago. Baina plasma areago berotuz gero, ioi edo nukleo horiek abiadura galanta har dezakete, eta abiadura horri esker gerta daiteke indar aldaratzailea gai ez izatea nukleoaren arteko talkak eragozteko. Esperimentalki frogaturik dago hori posible dela, baina horretarako plasmaren tenperaturak itzela izan behar du, gutxienez 100 milioi gradukoa. Tenperatura horretan fusio-erreakzioak gertatzen has daitezke, baina bakar batzuk gertatzea ez da nahikoa, tenperatura horretara iristeko erabiliriko energia ikaragarria izan baita. Komenigamiena da denbora-unitateko fusio-erreakzioen kopurua handia izatea. Ikusten ari garenez, fusioak zurgatzen duen energia oso handia da eta, jakina, fusioaren zentral batean fusioan lorturiko energiak kontsumiturikoa baino askoz ere handiagoa behar du izan.

Gaur egun, fusio proiektuak nazioarte mailakoak dira, proiektu horien diru-eskaerak itzelak baitira. Belaunaldi honetako esperimenduek «break-even» inguruko egoera lortu nahi dute, hots, fusioak sorturiko energia eta fusioa iristeko erabili den energia berdina izatea. Hurrengo belaunaldiko erreaktoretan ignizio-baldintzetako plasma lortzea espero da: hots, plasma fusio erreakzioetarako bal-

dintzetara iristean, kanpotik berotu gabe baldintza horietan mantentzea.

Fusio energiak perspektiba oso onak eduki arren, goian aipatuenez, erronka zientifikoak eta teknologikoak oso handiak dira. Gauzak aurreikusten diren bezala jarraituz gero (ez da erraza izango), mende honetako bigarren zatirako fusio nuklearra energi iturri oso probetxugarria izatea egia bihur daiteke.

Klimatologia

Gaur egungo eredu klimatikoek gure klimaren oinarriko egoera nahiko ongi aurreikusten dute. Batez bestean, hurrengo egunekoa eta eskualde zabal baterako nahiko ondo asmatzen dute. Ete ez bakarrik hurrengo egunekoa, egun batzuk aurretik ere eguraldia aurreikusten da, hori bai, arrakasta gutxiagorekin. Horrelakoetan, eredu klimatikoaren bereizmena 50 km ingurukoa izaten da. Baina, eredu klimatikoek, aurreikortasuna hurrengo egunetarako izan beharrean etorkizun urrunagorako bada, ezin dute uneko giroa aurreikusi; bakarrik, adibidez, hilabetearen batez bestekoak tenperaturan, aire-banaketan, ekaitzen bideetan, eta halaber urte-sasoia zikloa eta klimaren muturreko gertakizunen probabilitatea. Honen guztiaren bereizmena 200 km ingurukoa da.

1997-98 urteetan itxaso barearen ekialdean gertaturiko «El Niño» fenomeno klimatiko oso bortitza, eta horren atzetik etorritako «La Niña» ere, 6 hilabete aurretik aurreikusi zituen «European Centre for Medium-Range Weather Forecasts» institutuak. Izan ere, egungo eredu klimatiko arrakastatsuek aurreikusi dezakete kanpoko eraginpeko epe luzeko batez besteko klimaren erantzuna, adibidez, berotegi efektuko gas-kontzentrazioen aldaketek sor ditzaketenak. Suposatzen da ere «El Niño» bezalako egoerak askoz lehenago, urteetako mailetan, aurreikusi direla etorkizunekoan.

Hala ere, gaur egungo eredu klimatikoek hainbat arazo dituzte. Hodeien sorrera edo Euskal Herriko alde ezberdinetako klimatologia, hots, maila lokaleko klimaren au-

rresankortasuna oso zaila da egitea, eredu bereizmenaren mailan baitago. Konputagailuek ahalmen handiagoa azaltzen dutenean, maila lokaleko auresankortasuna hobe daitekeela itxaron daiteke.

Badaude beste arazo batzuk konputagailuaren ahalmenarekin lotuta ez daudenak eta ulertzen ez direnak. Horietariko adibide garrantzitsu bat, eta ongi ulertzen ez dena, sistema klimatikoaren eta ziklo biogeokimikoen arteko elkarrekintza da. Elkarrekintza hauek lurreko eta itxasoko biosferan eragin zuzena dute, eta klimaren gainean kontrol handia sortzen dute, CO₂, metano eta ozono bezalako berotegi-efektuko gasen kontzentrazioa aldatuz.

Aldaketa klimatikoaren eragina gizakiaren bizi-baldintzetan garrantzi itzelekoa da, baina oraindik ere «*terra incognita*» dela esan genezake. Klima-aldaketaren eta sistema sozio-ekonomiko globalaren arteko elkarrekintza oso konplexua da. Politika berezien bidez, aipaturiko elkarrekintzak zuzentzen saiatzen gara, baina oso gutxi ulertzen dira. Politikariek, aldaketa globalaren arazo zailarekin borrokan zuhur hasten direnean, zientzialariengana laguntza eske joko dute, eta orduan bai, problema horiek gero eta larriagoak eta presa handiagokoak bihurtuko dira. Eronka horiei aurre egiteko, klimatologian diharduten zientzialariek horizontea zabaldu beharko dute eta beste diziplinetako zientzialariek elkarlanean aritu beharko dute, Lurra sistema oso bat bezala hartuz, maila horretako azterketen eremu berri eta kitzikagarria garatzeko.

Gehiago irakurtzeko

Joan den mendeko zientziari buruzko artikulu, artikulu sorta edo lan orokorrak:

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.

Special Issue: «Past, present and future: Physics prepares for the 21st century», *Physics World*, Vol. 12, December 1999.

PLAZAOLA F., 2001, «Atomoaren eta Egitura Atomikoaren Ekarpenak XX. Mendean», *Ekaia* 14 (argitaratzeaz).
 Gai bereziagoei buruzko artikuluak eta liburuak:

BARROW J.D., TIPLER F.J., 1986, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press.

BENNET C.H., 1995, «Quantum information and computation», *Physics Today*, October, 24.

BINNING G., ROHRER H., 1987, «Scanning Tunneling Microscopy. From Birth to Adolescence», Nobel Lecture, *Rev. Mod. Phys.* 59, 615.

EGUSQUIZA I.L., URRESTILLA J., 2000, «Telegaraio Kuantikoa», *Ekaia* 12, 59-68.

FEYNMAN R., 1996, *Feynman Lectures on Computation*, Ed. A. Hey and R. Allen, Addison Wesley, Harlow.

HENDEE W., RITENOUR E., 1992, *Medical Imaging Physics*, Mosby-YearBook, St. Louis.

PLAZAOLA F., 1999, «Fusio Nuklearra: hurbilago, baina urrun», *Elhuyar* 141, 38-43.

RIORDAN M., HODDESON L., 1997, *Crystal Fire: The Birth of the Information Ages*, W.W. Norton, London.

ROA G., 2000, «Nanoteknologia, txikiak nagusi», *Elhuyar* 159, 28-32.

WILLIAMS R.S., 1998, «Computing in the 21st century: nanocircuitry, defect tolerance and quantum logic», *Phi., Trans., R. Soc. Lond. A* 356, 1783.¶