

# Nanoteknologia: txikiaren handitasuna

*E. Zarate*

CIC nanoGUNE Consolider, Tolosa Hiribidea 76, E-20018 Donostia

*J. M. Pitarke*

CIC nanoGUNE Consolider, Tolosa Hiribidea 76, E-20018 Donostia

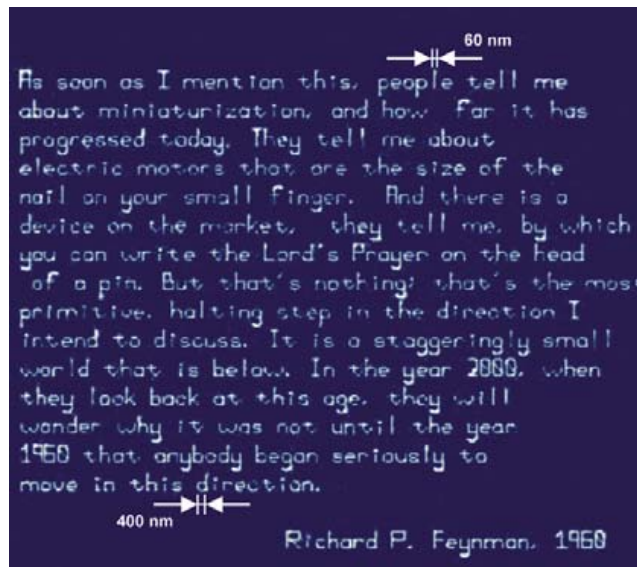
Materia Kondentsatuaren Fisika Saila,  
DIPC eta Materialen Fisika Zentroa (CSIC – UPV/EHU),  
644 Posta Kutxatila, E-48080 Bilbo

**Laburpena:** Artikulu honetan, Rychard Feyman-en «Hondoan leku asko dago» hitzaldi irudikorra aitzakiatzat hartzen da nano iraultzaren arlo nagusietako batzuk aztertzeko. Nanoeskala definitzen da, eta sistema biologiko oinarritzkoen dimentsioak eskala horretan kokatuak daudela erakusten da. Nanoeskalako unibertsoa kuantikoa (Mekanika Kuantikoaren lege bitxien arabera) delako eta eskala horretan azalak (eta haien eragina) nagusitzen direlako nano-a ezberdina dela erakusten da. Materia atomoz atomo ikustearen eta manipulatzaren erronka handia zertan datzan aztertzen da, eta gaur egun horretarako eskura ditugun tresna garrantzitsuenak deskribatzen dira. Nanoteknologia bezalako eremu berri baten etorkizuneko eragina zein izango den jakiterik ez dagoen arren, nanoteknologiaren aurrerapen berrien eraginagatik aldaketa sakonak jasango omen dituzten hiru esparru aukeratzen dira: nanomaterialak, nanoelektronika eta nanomedikuntza.

**Abstract:** Taking as an excuse Richard Feynman's «There is plenty of room at the bottom» visionary talk of 1959, this article explores some of the key aspects of the so-called nano revolution. The nanoscale is defined, and it is shown that the fundamental units of biological systems have dimensions at this scale. It is also shown that 'nano is different', as a consequence of the key role played by quantum mechanics and the fact that surfaces dominate at the nanoscale. The technological challenge of visualizing and manipulating matter atom by atom is addressed, and the basic concepts of the most relevant technologies and tools are described. Although it is not easy to evaluate the future impact of an emerging field such as nanotechnology, three fields are chosen here that should be expected to suffer deep changes due to new advances in nanotechnology, namely nanomaterials, nanoelectronics, and nanomedicine.

## RICHARD FEYNMAN, IRUDIMENAREN AITZINDARIA

Richard Feynman fisikari ospetsuak nanoteknologiaren aroaren atea irekiko zituen hitzaldi garrantzitsua eman zuen 1959. urtean Kaliforniako Teknologia Institutuan. Hitzaldi haren izenburua hauxe izan zen: «Hondoan leku asko dago; fisikaren arlo berri bati hasiera emateko gonbidapena» (hitzaldi osoa, ingelesez, <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html> web orriari aurki daiteke). Feynmanek hitzaldi hartan irudimen- eta prospektiba-ariketa sakona egin zuen atomoz atomoko manipulazioari buruz: atomoz atomoko manipulazioaren bideragarritasuna, atomoen bidezko idazkera eta informazioa gordetzeko ahalmena, eta hauen harira ahalbidetuko ziren aplikazioak izan zituen gai nagusi. Irudimen handiko ariketa bazen ere, ideia iraultzaile eta aipamen zorrotz haiek gaur egun errealitate bihurtzen ari dira izenburu berri baten azpian: nanoteknologia.



**1. irudia.** Feynmanen «There is plenty of room at the bottom» hitzaldiaren zati bat. Nanoeskalari idatzitako testu hau indar atomikoko mikroskopia baten bidez lortutakoa da. *Iturria:* Mirkin Group, Northwestern University.

Feynmanek gehitu zuen Fisikaren oinarriek ez zutela ukatzen gauzak atomoz atomo manipulatzeko aukera, baina garai hartan atomoak ikusterik eta manipulaterik ez zegoen, gizakiok handiegiak baikara atomoak gure begiez ikusteko eta gure eskuez ukitzeko. Gaur egun, aldiz, berrogeita hamar urte geroago, gizakiaren historian lehen aldiz, atomoak ikusten, ukitzen eta antolatzen ikasi dugu. Aurreikuspen guztien arabera, gainera, atomo eta molekulen mailako unibertso hori aukera berriez beterik dago eta hondoan agian Feynmanek berak aurreratu zuena baino leku gehiago dago.

Artikulu honetan Feynmanen hitzaldia aitzakia modura erabiliko dugu nanoteknologiaren ezkutuko ezaugarriak, etorkizuna eta erronkak jakitera emateko.

Nanoeskalaren definizioarekin hasita, «nano is different» esaldia zertan datzan azalduko dugu, nanoeskalari aritzean erabili ohi diren tresnen eta prozeduren oinarriak deskribatuko ditugu eta, bukatzeko, etorkizunerako aurreikusten diren zenbait aplikazio aipatuko ditugu.

### ***THERE IS PLENTY OF ROOM AT THE BOTTOM: HONDOAN LEKU ASKO DAGO***

Gizakion berezko neurria metroaren ingurukoa da. Gure eskuek, esaterako, 20 cm inguruko luzera dute eta erreminta egokiak dira  $1\text{ cm} = 10^{-2}$  m-tik gorako objektuak manipulatzeko. Materiaren adreiluak (atomoak), berriz, askoz txikiagoak dira; atomo baten batez besteko diametroa  $10^{-10}$  m-koa da. Zortzi magnitude-ordena ditugu materiaren adreiluetatik (atomoetatik) gure eskuek manipula ditzaketen objektuetara iristeko. Feynmanek adierazi zuen bezala, hondoan leku asko dago, teknologia eta aplikazio berriak ahalbidetu ditzakeena.

Gure irudimenean bidaia egin dezakegu gizakion eskalatik materiaren oinarriko adreiluetara iristeko; horrela, txikitasunean zenbat leku dagoen ulertu ahal izango dugu. Bidaia horretan hamarren berredurak erabiliko ditugu.

1 m: Metroaren eskala gizakion eta, oro har, ornodun handi guztion eskala dela esan daiteke. Gure garaiera eta gure etxebizitzetako gelen neurria metrotan adierazten ditugu.

$10^{-1}$  m: Gure eskuen eskala da. Neurri hau duten objektuak erraz manipulatu ditugu: neurri honetakoak dira edalontziak, labanak, baloiak edo xake-piezak. Hau ornodun txikien eskala ere bada; saguak, txoriak eta beste animalia batzuk neurri honetakoak dira. Ez da kasualitatea maskota gehienak eskala honetakoak izatea.

$10^{-2}$  m: Gure behatzen eskala da, eroso manipulatzeko muga. Hortik beherako objektuak manipulatzeko trebetasun berezia edo eta entrenamendua behar izaten dira. Intsektu handien eskalan gaude: euliak, erleak, tximeletak, ... Hauek uxatzeko aukera dugu, baina txikiegiak dira haiekin benetako elkarrekintza izateko.

$10^{-3}$  m: Honaino iristeko ikusmen ona behar izaten da edo lupa bat erabiltzen dugu. Eskala honetako objektuak erabiltzeko trebezia berezia behar izaten da: josteko orratzak, torloju txikiak eta kable finak erronka handiak izaten dira ohiturarik ez duen pertsona batentzat. Intsektu txikien eskala da, bereziki bizkarroiena, arkakusoen erresuma.

$10^{-4}$  m: Neurri honetako objektuak begi hutsez bereiztezinak dira. Mikroskopia txiki baten laguntza behar dugu. Eskala honetan dago paper orri baten lodiera, bai eta zelula handien neurria (gizakion obuluaren neurria adibidez) eta ameba bezalako animalia zelulabakarren neurria ere.

$10^{-5}$  m: Zelula eukariotikoen unibertsoan jarraitzen dugu, eta bertan mikroskopia optiko on baten bidez arazorik gabe azter daitezke objektuak. Gure odolaren globulu gorrien tamaina 10 mikra ingurukoa da ( $1 \text{ m} = 10^{-6} \text{ m}$ ).

$10^{-6}$  m ( $1 \text{ m}$ ): Mikra bakterioaren neurria da, gizakion hesteetan bizidun *Escherichia Colli* bakterioaren neurria adibidez.

$10^{-7}$  m (100 nm): Birusen eta zelulen organuluaren tamaina dugu hau. Nanometroa (nm) metroaren mila milioirena dugu. Argi ikusgaiaren uhin-luzera 400 eta 700 nm bitarteko tartean kokatua dago. Difrakzioaren eraginez, uhin-luzera horren erdia dugu mikroskopia optikoen bereizmen txikiena, 200 nm ingurukoa.

$10^{-8}$  m (10 nm): Egungo konputagailuetako transistoreen neurria 45 nm-koa da. DNAREN informazioa erabiliz proteinak ekoizten dituzten erribosomen neurria 30 nm ingurukoa da. Eskala honetako egitura ohiko mikroskopia optikoen bidez ikusterik ez dago; egitura txiki hauek ikusteko, bada, beste era bateko mikroskopiaak erabili behar izaten dira: mikroskopia elektronikoa eta zunda-mikroskopiaak.

$10^{-9}$  m (1 nm): DNA molekularen helize bikoitzaren erradioa nanometro batekoa dugu. Molekulen eskalan gaude. Nanometro batean lerrokaturiko 10 hidrogeno atomo edo 6 karbono atomo sartzen dira, gutxi gorabehera.

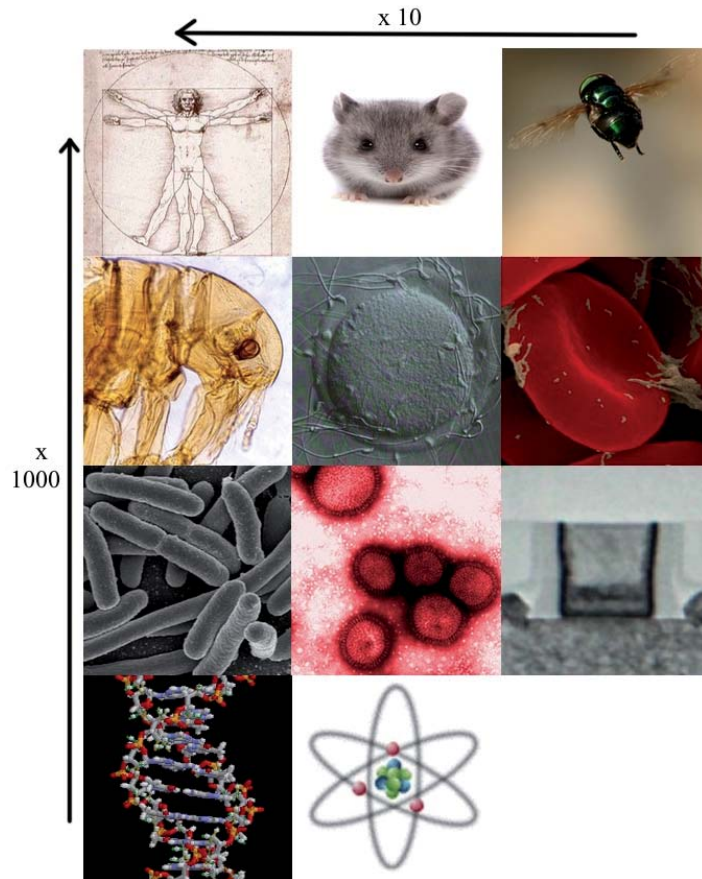
$10^{-10}$  m (0,1 nm): Atomoen berezko neurria eta atomoen arteko ohiko distantziak nanometroaren hamarrenetan neurtzen dira.

Hemen bukatzen da gure bidaia, baina ez egitura txikiagorik ez dagoelako: atomoaren nukleoaren erradioa  $10^{-14}$  m-koa da, protoi eta neutroien erradioa  $10^{-15}$  m-koa da, eta soka supersimetrikoek, egotekotan, Planck-en luzera izango lukete,  $10^{-35}$  m. Materiaren oinarritzko osagai manipulagarriak (adreiluak), ordea, atomoak dira.

Hamarren berreduren bidaia urratsez urrats egin beharrean, badago bidai hori hiru jauzitan egitea. Gizakion metrotik arkakusoaren milimetrora lehenengo jauzia, neurria mila aldiz txikiagoa egiten duen jauzia. Eskala-aldaketa bera egingo dugu bigarren jauzian, arkakusoaren milimetrotik bakterioaren mikrometrora, berriro mila aldiz txikiagoa den neurrira. Eta bukatzeko, bakterioaren mikrotik nanometrora, hau da, DNAREN erradiora (mila aldiz txikiagoa den neurrira) doana. Hau da, arkakusoaren arkakusoa bakterioa da, eta bakterioaren arkakusoa, DNA molekula; hiru arkakusojauzi egin behar ditugu, beraz, metrotik nanometrora jaisteko.

Pausoka zein saltoka, bidaia luze honetan nanoeskala 0,1 eta 100 nm bitarteko tartean kokatu ohi da. Eskala honetako (nanoeskalako) objektuak atomoak baino handiagoak dira (zenbait atomo edo molekula izan ditza-kegu) eta, aldi berean, mikro eta makroeskalako ezaugarrien aldean ezau-garri nabarmenki ezberdinak erakusteko adinako txikiak dira.

Atomoak ongi ulertzen ditugunez, nanoeskalan ezer berririk ez dagoela pentsa liteke; baina atomoen propietateak ezin dira estrapolatu nanoaren eskalara eta, era berean, eskala mikroskopiko eta makroskopikoaren pro-pietateak ezin dira estrapolatu nanoaren eskalara, atomoak kontu ditzake-gun eskalara alegia. Ez da aski sistema fisikoek eskala handietan duten jo-kamoldeari begiratzea atomo gutxi batzuetako mailetan zer gertatzen den aurreikusteko. Horrexegatik esaten dugu nanoa ezberdina dela: «nano is different».



**2. irudia.** Nanometroraingoko bidaia. Eskuinerako bidean 10 aldiz txikiagoa den objektu batera heltzen gara. Beherako bidean 1.000 aldiz txikiagoa den objektura iristen gara. Irudietan (irakurketaren ordena berean) hauexek ikusten ditugu: Giza-kia, hamsterra, eulia, arkakusoa, obulua, globulu gorria, bakterioa, birusa, transis-torea, DNA molekula eta atomoa.

**ATOMS ON A SMALL SCALE BEHAVE LIKE NOTHING ON A LARGE SCALE: ESKALA TXIKIKO ATOMOEN JOKABIDEAK EZ DU BALIOKIDERIK ESKALA HANDIETAN**

Mikroeskala gaindituta, nanoeskala miniaturizazioaren hurrengo urratsa dugu. Neurri txikiagoaren abantailak ugari dira: lehengai eta energia-kontsumoaren murrizketa, abiadura handiagoko txipak, eduki handiagoko memoriak, ... Baina nanoeskalan, miniaturizazioaren abantailaz gain, ezau-garri berriak azaltzen dira.

Urreak, adibidez, makroeskalan metal noblea (kimikoki ez-aktiboa) da, eroale elektriko eta termiko ona da, eta berezko kolore horia erakusten du; nanoeskalan, ordea, beste era batekoa izan daiteke. Urrezko txanpona behin eta berriro zatitzen badugu, nanoeskalara jaistean propietateak beste batzuk izango dira eta, gainera, tamainaren araberakoak. Besteak beste, urreak nanoeskalan noblea izateari uzten dio eta haren kolorea aldatu egiten da.

Feynmanen hitzetan, «Atoms on a small scale behave like nothing on a large scale for they satisfy the laws of quantum mechanics», hau da, «eskala txikian atomoen jokabideak ez du baliokiderik eskala handietan, mekanika kuantikoaren legeak betetzen baitituzte». Nanoeskalan, bada, esparru kontzeptuala mekanika kuantikoa da; gainera, azalak (gainazalak) nagusitzen dira eta, makroeskalan ez bezala, propietate fisikoek tamainarekiko menpekotasuna dute.

Urrearen adibidera itzulita, urrezko nanopartikulen eta argiaren arteko elkarrekintzaren ondorioak ez dira makroeskalako antzerakoak, nanopartikularen neurriaren araberako erresonantzia fenomenoak agertzen baitira. Hari-instrumentuetan, adibidez, soinuaren maiztasuna musika-tresnaren neurriaren araberakoa da. Bibolinak, hari laburrak dituelarik, maiztasun handiko notak igortzen ditu (nota altuak); kontrabaxuak, berriz, hari luzeak dituela, maiztasun txikiko notak (nota baxuak) igortzen ditu. Urrezko nanopartikuletan gauza bera gertatzen da; nanopartikula txikiek maiztasun handiko erradiazioarekin dute elkarrekintzarik estuena eta erradiazio hori izango da, bereziki, xurgatuko dutena. Argi ikusgaiaren kasuan maiztasun handia kolore urdinari dagokionez, urrezko nanopartikula txikiek kolore gorritzka erakusten dute, kolore urdinak xurgatzeko joera baitute. Nanopartikula handien kasuan alderantziz gertatuko da; nanopartikula horiek maiztasun baxuak (argi gorriari dagozkionak) xurgatzen dituzte eta beraz, osagai gorri horiek xurgatuta, kolore urdinxka erakusten dute. Zein da, beraz, urrezko nanopartikulen kolorea? Esaterik ez dago, nanopartikularen neurriaren araberakoa baita; mikroeskalan eta makroeskalan, aldiz, urrea horixka ikusten dugu beti. Hau fenomeno berria dela badirudi ere, Erdi Aroko artisauek metalezko nanopartikulez osatuak zeuden koloideak erabiltzen zituzten beirari kolore

bereziak emateko, koloide horien nanoeskalako egituraketaren jakitun izateke baina; beiraren kolore berezi horiek laugarren mendeko Lycurgusen kopan (ikus irudia) eta Erdi Aroko katedral gotikoen beirateetan ikusten ditugu. Maiz gertatu den bezala, teknologiaren garapena zientziaren garapenari aurreratu egin zitzaion.



**3. irudia.** Lycurgusen kopa. Beirak dituen nanopartikulei esker, kopa hau argi islatuaren bidez ikusten dugunean berde ageri den bitartean, barrutik argitzen denean eta, beraz, argi transmitituaren bidez ikusten dugunean gorri ageri da. *Iturria:* British Museum.

Nanoeskalako propietateak, bada, ezin dira ondorioztatu eskala mikroskopikoaren eta eskala makroskopikoaren propietateetatik. Era berean, atomoen jokabidea ezagutzea ez da nahikoa elkarri eragiten dioten zenbait atomo eta molekula ditugunean zer gertatzen den asmatzeko. Zenbait atomoz eta molekulaz osaturiko sistemetan atomoen eta molekulen arteko elkarrekintzek sortzen duten konplexutasuna azkar hazten da, propietate berriak agerian jarritz. Oinarrizko partikulen jokabidea eta haien arteko elkarrekintzak menperatzea baldintza beharrezkoa da nanoeskanan gertatzen dena asmatzeko; baina ez da baldintza nahikoa, nanoeskanan fenomeno berriak agertzen baitira, haietako batzuk erabat ustekabeak. Xakearen jokoaren kasuan, adibidez, arauak ongi ezagunak dira; baina hori ez da nahikoa. Posizioen ugaritasunak dakartzan aukerak kontaezinak dira, denak oinarrizko arauekin bateragarriak; izan ere, xakearen interesa aberastasun horretan datza, eta ez jokoa definitzen duten arau zerrenda laburrean.

Beste adibide bat itsasoko ur molekulena dugu. Ur molekulen egituraren eta haien arteko elkarrekintzen ezagutzatik ez dira berehala ondoriozta-

tzen olatuen fenomenoa (fenomeno emergentea) eta surfa (aplikazioa). Nanoeskalako atomoen eta molekulen arteko elkarrekintzen aberastasunak eta aniztasunak propietate emergenteak sortzen ditu, beti ere oinarrizko legeek ahalbidetzen dituzten propietateak.



**4. irudia.** Olatuen izaera eta jokabidea ur molekularen ezagutza soiletik ondorioztatzerik ez dago. Ur molekulen arteko elkarrekintzen aberastasunak eta aniztasunak propietate emergenteak sortzen dituzte (olatuak), eta propietate emergente horiek aukera berriak ahalbidetzen dituzte (surfa, besteak beste). *Iturria:* wikipedia

Nanoeskalaren ezaugarri nagusiak hauexek dira: (i) esparru kontzeptuala mekanika kuantikoa da (sarritan mikroeskalari eta makroeskalari ezkutatuak gelditzen diren efektu kuantikoak dira nagusi), (ii) propietate fisikoek tamainarekiko menpekotasuna dute (makroeskalari ez bezala), eta (iii) azalak nagusitzen dira.

Partikula makroskopikoen azalean dagoen atomo kopurua partikularen atomo guztien ehuneko txiki bat besterik ez da, sarritan arbuiagarria. Partikula makroskopikoen propietate batzuk azalak dakartzan aberastasun eta zailtasunen ondorio dira (Wofgang Pauliren hitzetan «**God made the bulk; surfaces were invented by the devil**»: Jainkoak solidoen barnealdea egin zuen; azalak deabruak asmatu zituen), baina propietate gehienetan azalen eragina arbuiagarria da, azalean dagoen atomo kopurua oso-oso txikia baita. Nanoeskalari, aldiz, atomoen gehiengoa azaletan kokatzen da, eta azalen eragina, beraz, garrantzi handikoa dugu. Makroeskalari eta mikroeskalari araua dena nanoeskalari salbuespen bilakatzen da; makro eta mikroeskalari salbuespena dena nanoeskalari araua bilakatzen da.

Esaterako, erdieroaleen teknologiak silizio solidoaren egitura elektronikoa oinarritzen dira. Nanoeskalari egitura elektronikoa hori aldatu egiten denez, miniaturizazioak muga bat dauka; izan ere, ohiko teknologien miniaturizazioaren mugaren atarian omen gaude. Oztopoa ala aukera? Nanoeskalari



eskaintzen dizkigun aukerei etekina atera nahi badiegu, orain arteko garapenaren paradigmatik baztertu egin beharko dira. Nanoeskalari aritzeak ikuspuntu berriak, pentsatzeko era berriak eta gauzak egiteko modu berriak behar ditu.

Diogun, bestalde, nanoeskalari ez dagoela metodo kimiko, mekaniko eta elektrikoak mikroeskalari eta makroeskalari bezala bereizterik. Nanoeskalari, gainera, sistema biologiko oinarritzeko eskala dugu. Beraz, nanoeskalari aritzeak jakintza arlo klasikoaren bat egitea dakar. Fisika, biologia, materialen ingeniariari eta kimika bat datoz eta, horrela, jakintza-esparru berriak sortzen da: nanozientzia.

### ***I WANT TO TALK ABOUT THE POSSIBILITY OF MANEUVERING THINGS ATOM BY ATOM: GAUZAK ATOMOZ ATOMO MANIPULATZEKO AUKERAZ HITZ EGIN NAHI DUT***

Gizakiok handiegia gara eta argia ere (argiaren uhin-luzera) handiegia da atomoak eurak gure begiezi ikusteko eta gure eskuez ukitzeko. Baina 80ko hamarkadatik hona baditugu atomoak banan-banan ikustea eta ukitzea ahalbidetzen duten tresnak, eta horiei esker gertatu dira, neurri handi batean, nanozientzia eta nanoteknologiaren jaiotza eta garapena. Ondoren, tresna horietako batzuk aztertuko ditugu.

#### **Mikroskopia elektronikoa**

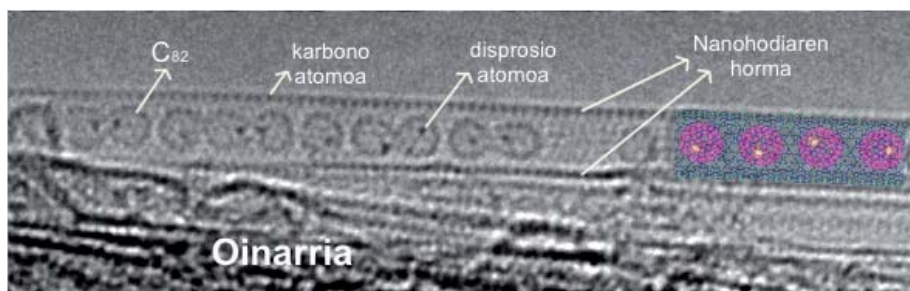
Difrakzioarengatik, mikroskopia optikoen bereizmen-ahalmena argi ikusgaiaren uhin-luzera handiak (400 eta 700 nm bitarteko uhin-luzerak) mugatzen du; horrexegatik esaten dugu argi ikusgai nanoeskalako objektuak ikusteko handiegia dela. Argi ikusgaiarena baino uhin-luzera txikiagoko argia (erradiazio elektromagnetikoa, hots, fotoiak) erabilia arazo konpontuta egongo litzatekeela pentsa liteke; alabaina, mikroskopia optikoen osagai nagusiak erradiazioa gidatzeko ahalmena duten lenteak dira, eta uhin-luzera txiki erradiazioaren kasuan (X izpien kasuan, adibidez) erradiazioa gidatzeko ahalmen hori oso murrizta da. X izpiak eta  $\gamma$  izpiak bezalako uhin-luzera laburreko erradiazioak, gainera, energia handiko erradiazioak dira, erradiazio ionizatzaileak, zenbait laginen gainean (adibidez lagin biologikoen gainean) kalte iraunkorrak sor ditzaketenak. Ondorioz, X izpien bidezko mikroskopia optikoa erabiltzerik ez dago.

XX. mendearen hasieran garaturiko mekanika kuantikoari esker, bada-kigu partikulek (adibidez elektroiek) batzuetan uhinen propietateak (ur-uhinenak eta erradiazio elektromagnetikoenak bezalakoak direnak) erakusten dituztela. Partikula bakoitzari dagokion uhin-luzera partikula horren momentu linealaren alderantzizkoa da. Hala, bada, energia handiko elektroiak erabiliz, nanometrotik beherako uhin-luzerak lor daitezke, eta horiek nanoes-

kalako objektuak ikustea ahalbidetzen dute. Mikroskopia elektronikoaren funtzionamendua mikroskopia optikoaren antzekoa da, baina elektroiek ezin dute beira zeharkatu eta ezin dute gure begien erretina inpresionatu; argiak, berriz, bai. Horregatik, mikroskopia elektronikoan, beirazko lenteen ordez, lente elektromagnetikoak erabiltzen dira, eta elektroiek sortak behatzaileen begira zuzenean iritsi beharrez, irudia (giza begiarentzat ikusgai dena) pantaila fluoreszente batean sortzen da.

Mikroskopia elektroniko ohikoenak hauexek dira: transmisioaren bidezkoa (transmission electron microscope - TEM), transmisio eta ekorketaren bidezkoa (scanning transmission electron microscope - STEM) eta ekorketaren bidezkoa (scanning electron microscope - SEM).

- Transmisiozko mikroskopia elektronikoa (TEM): Lagina zeharkatzen duen elektroiek sorta erabiltzen da; irudia pantaila fluoreszentea edo sentsore elektronikoak erabiliz osatzen da. Lagin osoaren irudia lortzen da aldi berean. Lagin meheak behar izaten dira, elektroiek zeharkatu ahal izan ditzaten. Gaur egungo bereizmen handieneko TEMez baliaturik, atomoak banan-banan ikus daitezke.
- Transmisio-ekorketazko mikroskopia elektronikoa (STEM): Elektroiek laginaren transmisioa eta laginaren ekorketa egiten ditu. Irudi osoa ekorketa prozesuaren amaieran lortzen da. Mikroskopia honen bereizmena TEMarena bezalakoa da.
- Ekorketazko mikroskopia elektronikoa (SEM). Elektroiek laginari erasotzean partikula horien eta laginaren arteko elkarrekintza gertatzen da eta, horren ondorioz, mikroskopia irudia eratzeko erabiliko dituen hainbat seinale ateratzen dira. Seinale horiek hauexek izaten dira: laginetik ateratzen diren energia baxuko elektroiek ('elektroi bigarrenak' deitzen direnak), X izpiak eta argia, besteak beste. Mikroskopia honek transmisiozko mikroskopia elektronikoak baino magnitude-ordena bat gutxiagoko bereizmen-ahalmena izan ohi du, baina edozein lodieratako laginen irudiak lor daitezke eta hori abantailatsua da.



**5. irudia.** Bereizmen atomikoko irudia, TEM baten bidez lortua. Karbonozko nanohodi baten horma bakarraren barnean C82 fullerenoak ikusten dira (borobilak) eta haien barruan, Dy (disprosio) atomoak (puntu ilunak). Nanohodiaren nahiz fullerenoen hormetan karbono atomoak bereiz daitezke. *Iturria:* A. Chuvilin, nanoGUNE.

Mikroskopia elektronikoak garestiak dira, eta laginak huts altuan mantendu behar izaten dira. Hala behar du elektroioi sortak, airea egonez gero dispersatu egiten delako, airearen atomoen aurkako talkek eraginda.

Mikroskopia bibrazioetatik eta perturbazio elektromagnetikoetatik babestuta egon behar du; horregatik, sotoetan eta azpiegitura bereziak dituzten eraikuntzetan instalatu behar izaten dira. Laginaren aldetik, lagin eroaleak edo erdieroaleak hobesten dira; isolatzaileak diren laginei batzuetan urrezko estaldura ematen zaie, eroale bihurtzeko daitezten. Estaldura hauek laginetan benetan ez dauden egiturak (artefaktuak) sor ditzakete irudietan. TEM eta STEM kasuetan, gainera, lagin mehe-meheak behar izaten dira, elektroioi sortek zeharkatu ahal izan ditzaten.

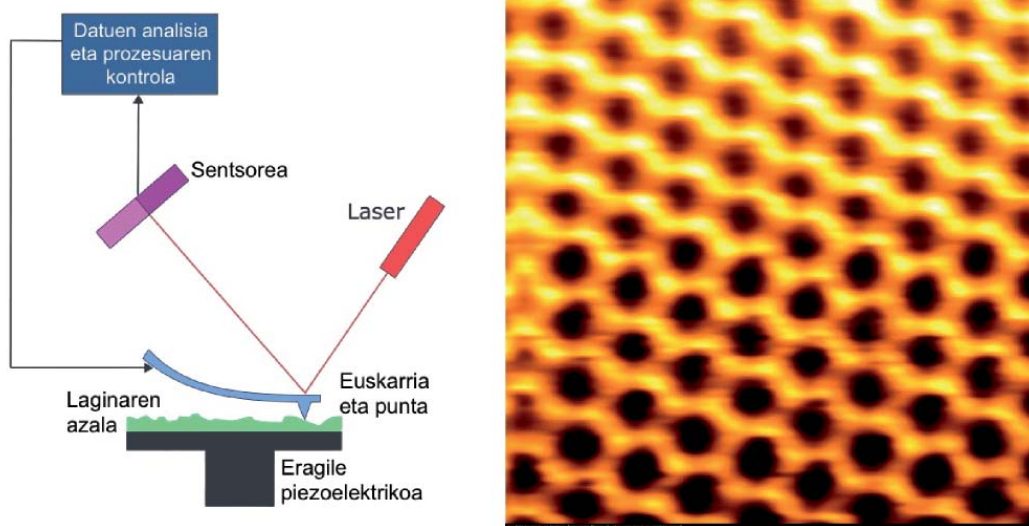
### **Ekorketazko zunda-mikroskopiaok**

Ekorketazko zunda-mikroskopiaetan zunda bat (zenbait atomo osaturiko metalezko ziria) ikusi (edo manipulatu) nahi den laginean zehar higiarazten da. Asmatutako lehen ekorketazko zunda-mikroskopia ekorketazko tunel-mikroskopia izan zen (Scanning Tunneling Microscope - STM), 1981 urtean asmatutakoa bera. Tunel-mikroskopiaok tunel-efektua du oinarri, hots, elektroioek uhinak izategatik potentzial-langak tunelatzeke duten ahalmenean oinarritua dago. Laginaren gainetik atomo bakar batez buka daitezkeen ziri (punta) zorrotz eroale bat higiarazten da, oso distantzia txikian. Potentzial-diferentzia baten bitartez ziriaren eta laginaren arteko eremu elektrikoa ezartzen denean, tunel-efektuari esker ziriaren elektroio gutxi batzuek ziritik laginera jauzi egin eta korrante elektrikoa sortzen dute; ziriaren eta laginaren arteko distantzia oso gutxi aldatuta ere, korrante elektriko hori izugarri aldatzen da.

Ziria laginaren gainetik higiaraztean tunel-korrantea (eta, beraz, distantzia) konstante mantentzea agintzen badugu, ziriak azala irudikatuko du, atomoz atomo. Tunel-mikroskopia banakako atomoen posizioak manipulatzeko ere erabil daiteke. Tunel-mikroskopiaoren ziriak gure begien eta gure eskuen zeregina betetzen du, atomoak ikustea eta ukitzea ahalbidetzen baitu.

Tunel-mikroskopiaoren osagai nagusia tunel-korrantea da. Tunel-korrantea egon dadin, ziriak eta laginak, biek, eroaleak izan behar dute eta, beraz, lagin isolatzaileak ikusterik ez dago. Azal isolatzaileen irudiak egiteko indar atomikoko mikroskopia (Atomic Force Microscope, AFM) erabili ohi da; mikroskopia hau ziriaren eta laginaren arteko indar atomikoa kontrolatuz dabil. Laginaren azalak jauzi-ohol bat bezalako hegala baten gainean eragiten duen indarraren efektua neurtzen da, eta horrek azalaren irudikapena dakar. Hegalaren higidura detektatzen duen sentsoreak 0,1 nm baino desplazamendu txikiagoak bereiz ditzan, hegala laser argiaz argiztatu eta, argi-detektatzaile baten bidez, sorta islatuaren posizioa erregistratzen da. Argi-detektatzaileak oinarri piezoelektrikoa aktibatzen du, eta oinarri hori

korrante batek kontrolatzen du, ziriaren eta laginaren arteko distantzia konstante mantentzen dadin. Ziriaren higidurak, bada, laginaren azalaren irudia dakar. Indar atomikoko mikroskopioak ingurune ugartan lan egin dezake: airean, uretan, tenperatura baxuetan edo hutsean. Mikroskopio hau aminoazidoak, DNA molekula, proteinak eta antzeko molekula biologikoak irudikatzeko erabiltzen da, bai eta prozesu kimiko batzuk gertatu ahala irudikatzeko ere.



**6. irudia.** Indar atomikoko mikroskopioaren eskema eta grafeno-lagin baten irudia, halako mikroskopio batek gauzatua. Grafenoa karbono atomoz bi dimentsioan eraturiko kristal-sare monoatomikoa dugu, 2004. urtean lehen aldiz sortua. *Iturria:* wikipedia eta [www.physik.uni-augsburg.de/exp6/imagegallery/](http://www.physik.uni-augsburg.de/exp6/imagegallery/)

## Nanogeruzen deposizioa

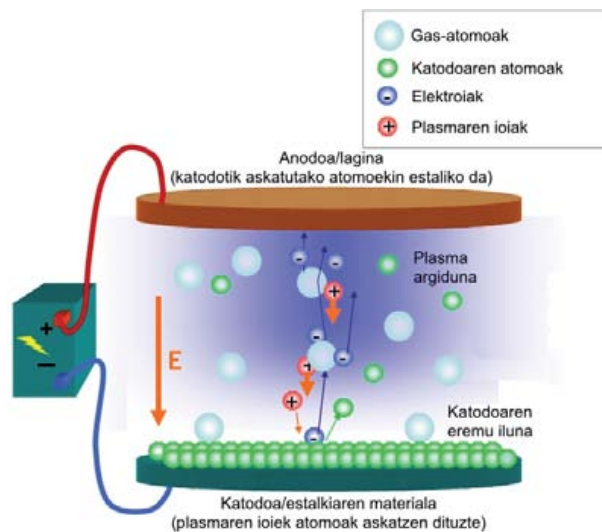
Objektuak nanotzat hartu ohi dira haien dimentsioetako bat gutxienez 0,1 eta 100 nm bitarteko tartean (nanoeskanan) dagoenean. Nanoeskanan dimentsio bakarra dugunean, beste bi dimentsioetan objektua mikro edo makroskopikoa izanik, objektu horri nanogeruza deritzen. Nanogeruzak interes handikoak ditugu materialen zientzian; ohiko materialei ezaugarri bereziak (gogortasuna, korrosioaren aurkako babesa, ezaugarri kimikoak edo optikoak, ...) emateko erabili ohi dira, bai eta nanoegitura funtzionalak (multi-geruza magnetikoak, disko gogorretan erabiltzen direnak, edo geruza erdie-roaleak) sortzeko ere. Lagin baten gainean nanogeruzak sortzeko bi multzo zabaletan sailka daitezkeen teknika ugari erabiltzen dira: lurrunketaren bidezko teknikak eta plasmaren bidezkoak.

Lurrunketaren bidezko metodoetan, laginaren gainean ezarri nahi den materiala solido egoeratik gas egoerara igaro behar da lehenik. Tenperatura-igoera baten bidez solido-lurrin fase-trantsizioa (sublimazioa) aktibatzea izaten da

gas-atomoak lortzeko dauden metodoen artean ohikoena. Sublimazioa gerta dadin, prozesua oso presio baxuetan egin behar da; deposizio guztiak, bada, huts altuan egin behar izaten dira. Tenperatura igotzean, laginaren gainean ezarri nahi den materiala gas fasera pasatzen da, eta gas-atomo horiek laginaren gainean itsatsita geratuko dira, egoera hori termodinamikoki egokiagoa baita. Prozesua abiadura txikian gertatzen da eta geruzen lodiera zehaztasun handiz kontrolatzea dago, tenperaturaren eta prozesuak irauten duen denboraren araber. Lurrunketaren bidez lortutako nanogeruzak oso leunak dira.

Plasmaren bidezko metodoak azkarragoak dira, baina lortutako azalek zimurtasun handiagoa erakusten dute, nahiz eta nanogeruzaren lodiera homogeenagoa izan. Plasmaren bidezko metodoetan, laginaren gainean ezarri nahi den materialaren atomoak plasma bat erabiliz ateratzen dira; plasma hori oso tenperatura altuan jarritako gas ionizatu bat izaten da, argona adibidez.

Argon ioiek, ezarri nahi den materialaren aurka talka egitean, atomoak askatzen dituzte eta atomo horiek laginean ezarriko dira. Prozesuaren kalitatea eta abiadura hobetzeko magnetroi bat erabiltzen da orokorrean: eremu magnetiko batek ganbaran dauden partikula kargatuak gidatzen ditu prozesu osoaren eraginkortasuna hobetzeko.



**7. irudia.** Plasmaren bidezko ‘sputtering’ deposizioaren eskema. Plasmaren ioi positiboak (katioiak), ezarritako eremu elektriko baten eraginez, katodorantz azeleratzen dira. Katioiek katodoarekin talka egitean katodoaren atomoak askatzen dituzte, eta atomo horiek anodoaren azalean itsatsita geratuko dira, nanogeruza bat osatuz. Prozesuaren eraginkortasuna hobetzeko asmoz, sarritan eremu magnetikoa erabili ohi da.

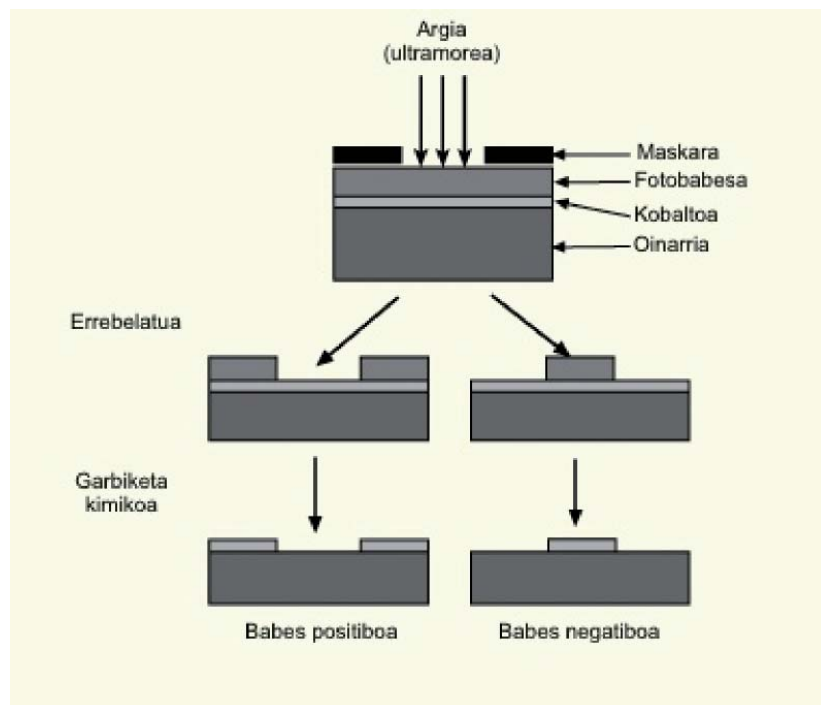
## Fotolitografia

Litografia izan da, neurri handi batean, mikroelektronikaren iraultza ahalbidetu duen teknologia.

Demagun silizio-azal baten gainean egitura jakin bat sortu nahi dugula, kobaltoa (Co) ezarriz. Lehenik, silizio-azal osoan ezarriko den kobalto-geruza argiarekiko sentikorra den geruza batekin (fotobabesa) estaliko dugu. Estalita dagoela, sortu nahi den egituraren irudia proiektatzen da fotobabesaren gainean. Argituta dauden puntuetan argiak erreakzio kimikoa sortzen du fotobabesean, eta haren ezaugarri kimikoak aldatzen ditu.

Behin argituz gero, egitura «errebelatzeko» bi prozesu erabil daitezke. Babes positiboaren prozesuan, argitutako fotobabesa garbitzeko disolbagarriak erabiltzen dira; era horretan, fotobabesaren azpiko kobaltoa agerian uzten da. Babes negatiboaren prozesuan, argitu gabeko fotobabesa da disolbatzen dena.

Hurrengo urratsean, kobalto-geruzaren aurka eraso kimikoa egiten da, eta fotobabesak babesten ez dituen puntuetan kobalto geruza desagertu egingo da. Prozesuari bukaera emateko, geratzen den fotobabesa garbitu egiten da, maskara (babes positiboa) edo haren osagarria (babes negatiboa) kobaltoz eginda gera dadin.



**8. irudia.** Fotolitografia prozesuaren eskema. Fotobabesa garbitzeko erabiltzen den prozesuaren arabera, maskararen positiboa edo negatiboa lor daiteke.

Prozesu hauek garbitasun handiko eremuetan egin behar dira. Hauts-partikulak sortu nahi dugun egitura baino askoz handiagoak izan daitezke; horregatik, prozesu horiek gela zuri batean egin behar izaten dira. Gela zurietako airea etengabe iragazten da, airean ahalik eta hauts-partikula gutxien egon dadin.

Fotolitografiaren muga, mikroskopio optikoetan bezala, erabilitako argiaren uhin-luzeraren araberakoa da. Difrakzioaren eraginagatik, erabilitako argiaren uhin-luzeraren erdia baino txikiagoak diren egiturak egiterik ez dago. Egitura txikiagoak egiteko, argi ultramorea erabiltzen da, haren uhin-luzera argi ikusgaiarena baino txikiagoa baita; bestela, mikroskopio elektronikoetan bezala, energia handiko elektroien sorta erabili ohi da. Elektroien sorten bidezko litografiak nanoeskalako egiturak (nanoegiturak) egitea ahalbidetzen du.

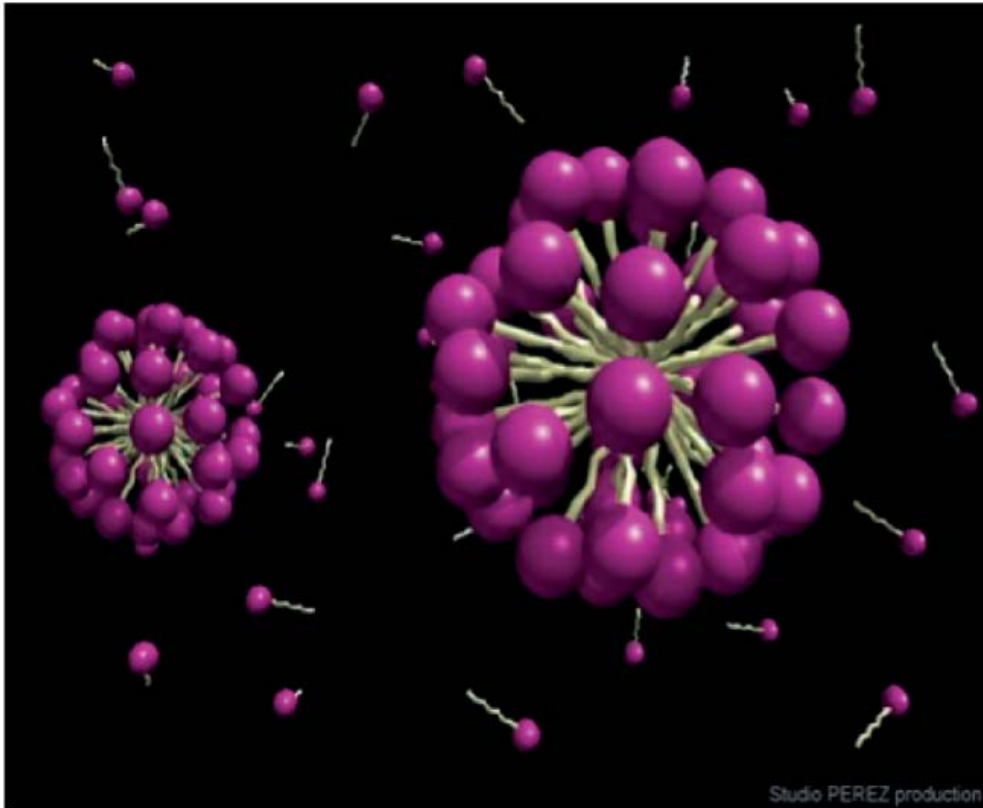
### **Autoantolaketa**

Nanoegiturak sortzea ahalbidetzen duten metodoak bi multzotan sailka daitezke. Alde batetik, handitik txikira (*top-down*) doazen metodoak ditugu: makroeskalako lagin batetik abiatuta, materia kentzen da nahi den nanoegitura sortu arte. Hori eskultorearen estrategia bezalakoa dugu, zizelaren bidez bloke handi batetik artelana sortzen delarik. Fotolitografia *top-down* metodoen adibidea dugu; horrelakoetan, zizelaren ordez argia erabiltzen da. Bestetik, txikitik handira (*bottom-up*) doazen metodoak ditugu: materia osatzen duten adreiluak (atomoak eta molekulak) erabiliz sortzen dira nanoegiturak, umeentzako erai-kuntza jokoetan bezala. Tunel-mikroskopioaren bidezko manipulazioa eta nanogeruzen deposizioa *bottom-up* metodoen adibideak ditugu.

*Bottom-up* metodoen beste adibide bat autoantolaketa dugu. Autoantolaketa Naturaren oinarrizko propietatea da; autoantolaketa izaki bizidunetan berez gausatzen da. Zeluletako erribosomek, adibidez, aminoazidoen autoantolaketa ahalbidetzen dute, hau da, zenbait aminoazido mihiztatzen dituzte, DNA molekulan kodifikaturiko aginduei jarraiki proteinak berez osa daitezten; proteina horiek gure gorputza osatzen duten oinarrizko adreiluak ditugu. Erribosomak, 30 nm inguruko neurria dutela, benetako lantegi molekularrak ditugu.

Gaur egun, autoantolaketa gauza dadin behar diren osagai guztiak ditugu eskura: atomoak, molekulak eta haien arteko elkarrekintzak. Naturak nola egiten duen ikasi behar dugu, Naturan berez sortzen ez dena sortu ahal izan dezagun. Dauden aukerak kontaezinak dira.

Adibidez, molekula lipidikoetan bi zati bereiz daitezke. Buru hidrofila, uraren kontaktuan egoteko joera duena, eta buztan hidrofoboa, urarengandik ihes egiten duena. Molekula horiek uraren barruan askatzean, buztan hidrofoboak elkartu egiten dira eta buru hidrofiloek urari ukituz geratuko diren azal esferikoak sortzen dituzte.



**9. irudia.** Nanopartikula lipidikoak, berez autoantolatzen direnak. Buru hidrofiloak kolore arrosan azaltzen dira, eta buztan hidrofoboak, kolore zurian. Ur-ingurune baten barruan sartzean, buztan hidrofoboak elkartzen dira eta buru hidrofiloak oskol baten barruan ezkututzen dira; horrela, nanopartikula esferikoak osatzen dira. *Iturria:* Studio Perez.

Autoantolaketaren beste adibide bat ‘elektrospinning’ teknikan oinarritua dago. Teknika honen bitartez, zenbait molekula organikoz osaturiko disoluzioa intentsitate handiko eremu elektriko baten eraginpean ezarriz gero nanozuntzen autoantolaketa gauzatzen da.

Badago era berean naturak berak sortutako nanoegiturak birziklatu eta teknologiako helburuak lortzeko erabiltzea. Tabakoaren mosaiko-birusa dugu halako nanoegituren kasu bat, gizakiontzat inongo arriskurik ez duena; izan ere, erretzaileek haien eskuetan milioika dituzte. Birus horrek nanoeskalako hodi itxura du; 300 nm-ko luzera du, 18 nm-ko diametroa eta barruan 4 nm-ko kanala. Bere itxura bereziagatik, ez da zaila teknologiako aplikazioak ekar ditzakeela imajinatzea. Adibidez, geruza metalikoa ezarriz gero, 300 nm-ko nanokableak lortzen ditugu, eta barruko kanaliz baliaturik kable horiek nanogordailu bihurtu ditzakegu, molekula txikiak gordetzeko.



**WHAT WOULD THE PROPERTIES OF MATERIALS BE IF WE COULD REALLY ARRANGE THE ATOMS THE WAY WE WANT THEM?: ZEINTZUK IZANGO LIRATEKE MATERIALEN PROPIETATEAK ATOMOAK NAHI DUGUN ERAN ANTOLATZEKO BENETAKO AUKERA BAGENU?**

Gaur egun nano aurrizkia modan dago. Feynmanek aurreikusi zuenez, XXI. mendeko iraultza erraldoia nanoeskalan ezkututzen omen da; baina zein ote da nanoteknologiaren eskaintza? Alde batetik, materia osatzen duten adreiluetan oinarri duen teknologia izanik, lehengaien eta energiaren kontsumoaren murrizketa ekarriko duela pentsa daiteke. Horretaz gainera, nanoeskalan egituraturiko materiaren propietateak eskala makroskopikoaren eta mikroskopikoaren propietateak ez bezalakoak izanik, nanoeskalan aritzeak aukera berriak eskaintzen ditu, haietako asko gaur egun irudikaezina direnak. Nanoteknologiari etekina aterako ez dion sektorerik ez dago. Nanoteknologiak eragina izango du elektronikan, eraikuntzan, garraioan, energian eta medikuntzan, besteak beste. Garapen jasangarriaren gakoetako bat izango da, zalantza izpirik gabe, ekoizpena materiaren eta energiaren kontsumo txikiagoarekin eta hondakinen sorpen murriztuagoarekin gauzatu tuko baita.

Tentagarria bada ere, oso arriskutsua da bidea hasi bezain laster etorkizuneko aplikazio iraultzaileak zeintzuk izango diren asmatzen saiatzea. Nanoteknologiaren azken helburua aplikazioa dela ere, haraino iristeko biderik laburrena zein den asmatzerik ez dago. Nanozientziaren eginkizuna, beraz, ez datza aplikazioen bilaketan (edo, behinik behin, aplikazioen bilaketa hutsean), ezagutzaren sormenean baino. Eta ezagutzaren sormen horretatik aplikazioak etorriko dira, zalantza izpirik gabe. Aplikazio haietako batzuk gaur egun irudikaezina dira.

Heinrich Rohrer 1986. urteko Fisikako Nobel saridunaren esanetan, nanoteknologiaren erronka nagusia hau da: nanoegitura jakin bat sortu ahal izatea, posizio jakin batean eta helburu jakin batekin. Hori lortzen dugunean, ondorioak ikaragarriak izan litezke. Baina etorkizunean ezinbestekoa irudituko zaiguna oraindik zer den ez dakigu.

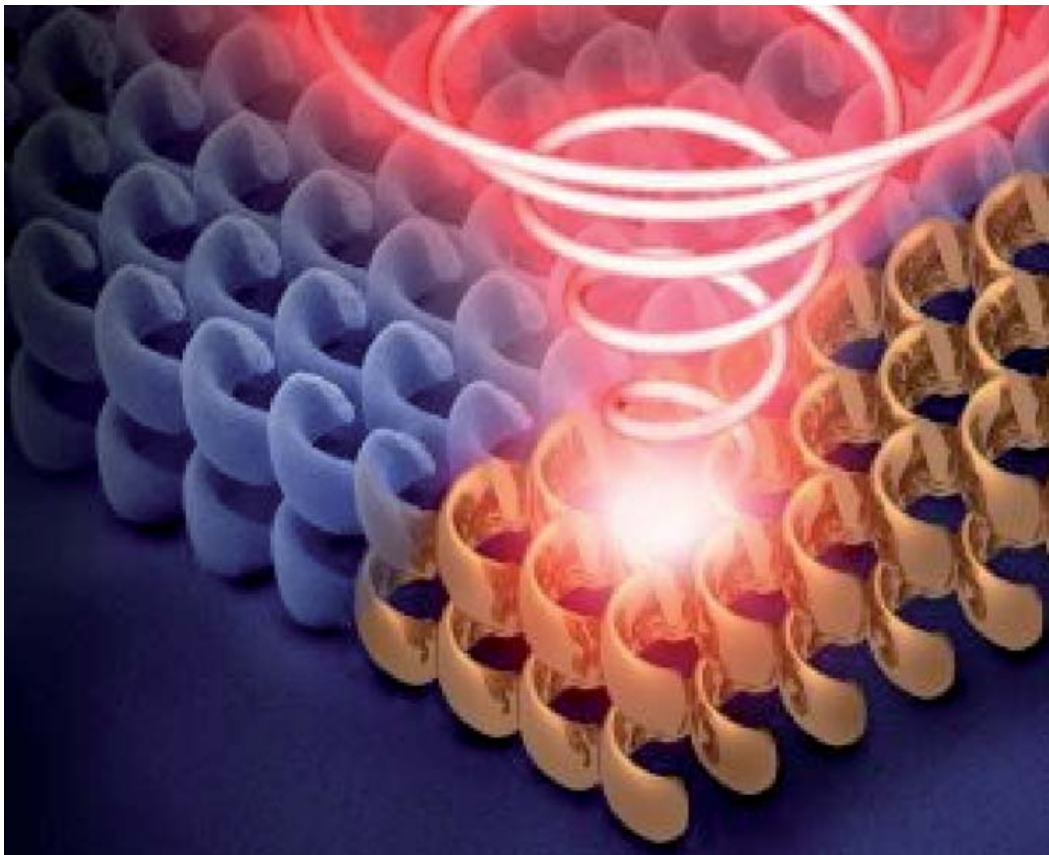
Gaur egungo ikerketa erakusten ari denaren arabera, nanoteknologiak gutxienez hiru eremu hauetan izango du eragina: nanomaterialak, nanoelektronika eta nanomedikuntza.

### **Nanomaterialak**

Nanomaterialak nanoeskalan egituraturiko materialak ditugu. Batetik, baditugu nanoeskalan egituraturiko material horien konposaketa kimikoaren eta tamainaren arabera ezaugarri bereziak, esaterako urrezko eta zilarrezko nanopartikulek erakusten dituztenak. Bestetik, nanomaterialak na-

noeskan geometrikoki era ezberdinetara egituratzeko gaitasunak aukera berriak irekitzen ditu, metamaterial horien propietateak gure beharrianen arabera sintonizatuz.

Horrela, zikinkeriaaren aurkako oihalak lor ditzakegu, bai eta pantaila malguak, elektronika gardena, material ikusezinak, eta abar luze bat. Zerrenda hori irudimena bezain luzea izan daiteke. Konputagailuen disko zurrunen azala da, agian, gaur egun gehien erabiltzen den nanomateriala, non nanogeruza magnetikoak eta isolatzaileak konbinatuz magnetoerresistentzia erraldoiaren fenomeno garrantzitsua gauzatzen den.



**10. irudia.** Ekorketazko mikroskopio elektroniko baten bidez lorturiko irudia, konputagailuz egindako irudi batekin konbinatua. Urrezko nanoegitura espiralez osaturiko nanomaterial artifiziala (metamateriala) ageri da; nanoegitura horri esker metamaterialak iragazki polarizatzaile bezala jokatzen du: norabide jakin batean polarizatuak dauden eremu elektromagnetikoak (argi-izpiak) igaro daitezke soilik. *Iturria:* CFN, Karlsruhe Institute of Technology

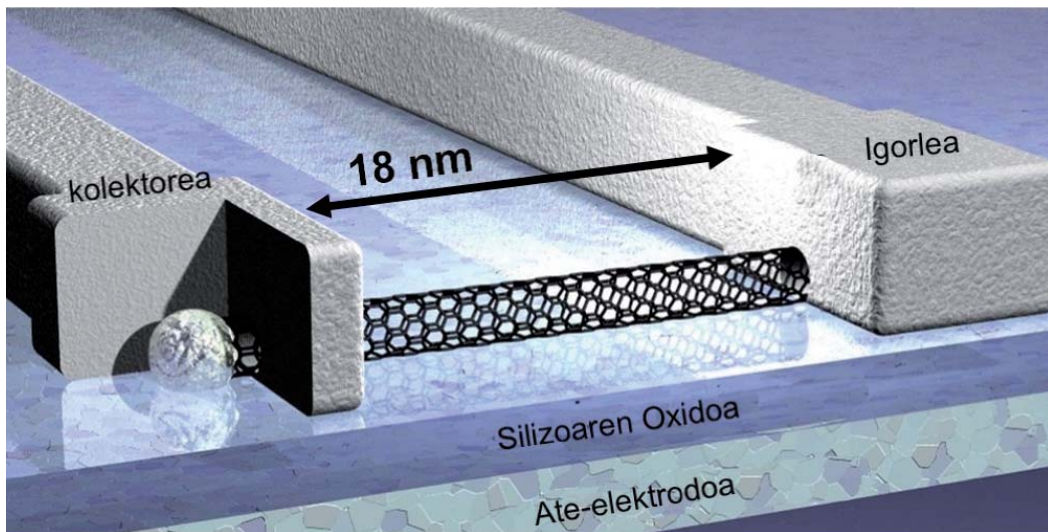
## Nanoelektronika

Silizioaren teknologian oinarrituriko mikroelektronika eta zirkuitu integratuak, gaur egun ezagutzen ditugun moduan, azken mugaraino iristear daude.

Gure poltsikoetako gailuak osatzen dituzten transistoreek 45 nm-ko teknologiarekin eginak daude, baina gaurko teknologiarekin miniaturizazioak ez du luze iraungo, hemendik urte batzuetara nanometro bakar batzuetako transistoreak izango baititugu. Beraz, elektronikak aurrera egingo badu, material berriak behar ditugu. Molekula bakarreko gailuak eta kontaktuak egiten ikasi behar dugu. Ideia eta garapen berriak beharko dira, eta horixe da, hain zuzen ere, nanoteknologiaren erronketako bat.

Iraultza berri baten atarian gaude, eta sortuko diren paradigma berriek hurrengo urteetako garapena baldintzatuko dute ziur asko.

Adibidez, karbonoaren nanoegitura alotropiko berriak (fullerenoak, nanohodiak, grafenoa) silizioaren ordezkariak izan litezke, laborategietan silizioarenak baino ezaugarri elektroniko hobekiak erakusten baitituzte. Material berri horiek industria-ekoizpenaren arazoak gainditzeko gai izango diren ez dakigu.



**11. irudia.** Infineon Technologies enpresak munduko eremu-efektuzko transistorerik txikiena sortu du nanohodi bat erabiliz. *Iturria:* Infineon Technologies AG

Diogun, bestalde, gaur egungo elektronika elektroien kargaren garraioan oinarritua dagoela. Elektroien karga garraiatu beharrean elektroien spina garraiatzea lortuz gero, elektronika mota berri baten aurrean egongo ginateke. Elektronika mota berri horri spintronika deritzo. Etorkizuneko

konputagailuen oinarria spintronika izango al da? Gaur gaurkoz galdera horri erantzuterik ez dago.

### **Nanomedikuntza**

Nanoeskala sistema biologiko oinarrizkoenen eskala dugu. Nanoeskala menderatzeak, bada, medikuntzari ekarpen iraultzaileak ekarriko dizkio. Besteak beste, diagnostiko-teknika eta sendagai zehatzago eta zehaztuagoak ahalbidetuko ditu. Nanoteknologiari esker gaixotasunen diagnostikorako balioko duten sentsore txikiagoak, merkeagoak eta fidagarriagoak izango ditugu. Are gehiago, molekulen eskalako elkarrekintzen kontrolak aukera eman diezaguke sendagaiak diseinatu, gidatu eta gaixotasunaren jatorrian kokatu ahal izateko.

Gaur egun minbiziaren aurka egiten diren ohiko tratamenduetan (kimioterapiaren adibidez) uholdearen estrategia erabiltzen dugu: sendagaia gorputz osoan zehar zabaltzen da, zelula gaixoetaraino iritsiko dela ziurtatzeko. Nanoteknologiak metodo hautakorragoak sortuko ditu: behin gaixotasunaren jatorria aurkituta, bertara gidatu eta askatuko dira molekula sendagarriak (nanorroboten bidez agian). Feynmanek bere hitzaldi ospetsuan esan zuenez, zirujaua irensteko aukera izango dugu agian. Ametsa ala egiazko etorkizuna?



**12. irudia.** Kolore anitzeko puntu kuantikoen zundek, xagu batean injektatuta, tumore ezberdinekin topo egin dezakete. (*Nat Biotechnol.* 2004;22:969-976). (*Irudiaren jatorria:* Xiaohu Gao, PhD, and Shuming Nie, PhD, Emory University)

## **NANO GUNE: TXIKIAREN ERRONKA HANDIA**

2006. urtearen bukaeran ikerketa kooperatiboko nanoGUNE Consolider ikerketa-zentroa abian jarri zen, Euskal Autonomia Erkidegoan egiten den nanozientziaren eta nanoteknologiaren ikerkuntza jarduera estrategikoa bultzatu, koordinatu eta kudeatzeko asmoz, Eusko Jaurlaritzak bultzatutako nanoBasque Estrategiaren esparruan, bai eta Zientzia eta Berrikuntza ministerioak abiatutako Consolider-Ingenio 2010 programaren baitan ere.

Bereziki, nanoGUNE ikerketa-zentroak puntako azpiegiturak eta ikerlariak dituen espazio fisiko berria eraiki du. Espazio fisiko hori 2009. urteko urtarrilean inauguratu zen, Euskal Herriko Unibertsitateko Donostiako Ibaetako campusean. Bertan, dagoeneko 50 inguru ikerlari ari dira lanean (hainbat doktorego-ikasle, doktorego osteko ikerlari, bisitari eta teknikari barne hartuta), honako eremuetako ikerketa lanetan ari direnak: nanomagnetismoa (nanogeruza anitzetan oinarrituriko material magnetikoen fabrikazioa eta nanopartikula magnetikoen urrutiko kontrola), nanooptika (difrakzioaren muga gainditzen duen eremu hurbileko zunda-mikroskopia optikoa), autoantolatuta (nanoeskalako egituren sintesia, batez ere landareetako birusak oinarrituta), nanobioteknologia (nanokristalen eta puntu kuantikoen erabilera medikuntzako aplikazioetarako) eta nanogailuak (spintronika, helburu anitzeko gailu hibridoak eta nanofabrikazio aurreratua).

NanoGUNE ikerketa-zentroaren zeregina hauxe da: Euskal Herriko hazkunde ekonomikoan eragina izango duen mundu mailako ikerketa egitea. Ildo horretan, nanoGUNEko ikerlari batzuk Euskal Herriko zenbait enpresarekin elkarlanean ari dira dagoeneko. Are gehiago, nanoGUNE ikerketa-zentroa eratu berri den enpresa baten bultzatzailea izan da. Enpresa horrek (Grapheneak) grafenoa ekoiztea du helburu; grafenoa (duela sei urte aurkitua) bi dimentsioko nanomateriala dugu, eta aurten Andre Geim-ek eta Konstantin Novoselov-ek Nobel saria jaso dute grafenoaren aurkikuntzagatik.

Laburbilduz, nanoteknologiaren apustua sendoa da, etorkizuneko apustua bada ere. Nanoteknologiaren etorkizuna zein izango den ez dakigu, baina ziur gaude etorkizuna materiaren nanoeskalako egituraketan oinarrituko dena.

Hondoan benetan leku asko dago, agian Feynmanek berak aurreikusi zuena baino gehiago. Erronka handia dugu, bada, nanoeskalarena, diru-inbertsio handiak eta iraunkorrak beharko dituen. Izan ere, nanoeskalak eskainiko dizkigun aukerak izugarriak izango dira. Horixe da nanoeskalaren handitasuna.

## **BIBLIOGRAFIA**

*Elhuyar Zientzia eta Teknologiaren Hiztegi Enziklopedikoa*, Elhuyar Edizioak / Euskal Herriko Unibertsitatea, 2009.

*Nanociencia y nanotecnología: Entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro*, JOSÉ ÁNGEL MARTÍN, CARLOS BRIONES, ELENA CASERO, PEDRO A. SERENA, FECYT (www.fecyt.es web orrialdean eskuragarria), 2009.

*There is plenty of room at the bottom. An Invitation to Enter a New Field of Physics*, R. P. FEYNMAN-ek emandako hitzaldiaren transkripzioa, <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.

*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, ERIC DREXLER, Non Basic Stock Line, 1987.

*Introduction to nanotechnology*, CHARLES P. POOLE JR., FRANK J. OWENS, Wiley-Blackwell, 2003.

*Nanophysics and Nanotechnology: An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience*, EDWARD L. WOLF, Wiley VCH, 2006.