

# Argia txiki egiten denean

(When light becomes small)

Javier Aizpurua\*

Materialen Fisika Zentroa (EHU-CSIC)  
eta Donostia International Physics Center (DIPC), Donostia, Euskal Herria

**LABURPENA:** Argiaren kontzeptuari buruzko perspektiba historiko laburra aurkezten da artikulua honetan, haren uhin-izaera azpimarratuz. Uhin-izaera honek materiaren eta argiaren arteko elkarrekintzaren zenbait ezaugarri finkatzen ditu teoria elektromagnetikoaren barruan. Horien artean, aipatzekoa da difrakzio-muga, mikrometro erdi baten azpitik argia lokalizatzea ahalbidetzen ez duena. Metalezko nanopartikulek haien elektroien eroleen kitzikapenaren bitartez, gainazaleko karga-dentsitatearen uhinak (plasmoiak) sortzen dituzte, eta, horiei esker, argia difrakzio azpiko dimentsioetara eramatea lortzen da. Metalezko nanoegiturek argia harrapatzen eta igortzen duten nanoantena moduko portaera azaltzen dute, fotonika nanoeskalaren erresumara eramanez. Tes-tuinguru honetan, nanoantena optikoen aplikazio teknologikoetako batzuk erakusten dira zenbait arlotan: besteak beste, nanoskopia optikoan, gainazaleko handitutako espektroskopia molekularrean, terapia onkologikoan, energi metaketan, metamaterialetan, edota informazioaren teknologietan.

**HITZ GAKOAK:** Nanofotonika, Elektromagnetismoa; Optika; Plasmonika; Nanoantena.

**ABSTRACT:** A brief historical perspective on the concept of light is introduced, focusing on some of the aspects derived from its undulatory nature, which determines many of the properties of light-matter interaction within the electrodynamical theory. The undulatory nature of light sets up a diffraction limit, which prevents standard localization of light below half a micrometer. The use of metallic nanoparticles, and the excitations of their conduction electrons with the generation of electronic surface charge density waves, so-called plasmons, allows for bringing the energy and momentum of light down to sub-diffraction dimensions. Metallic nanostructures are shown to act as effective optical nanoantennas which capture and emit light, opening photonics to the realm of the nanoscale. Examples of technological application of optical nanoantennas in the fields of optical nanoscopy, surface-enhanced molecular spectroscopy, oncological therapy, energy harvesting, metamaterials and information technologies are discussed.

**KEYWORDS:** Nanophotonics, Electromagnetics, Optics, Plasmonics, Nanoantennas.

\* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Javier Aizpurua. Materialen Fisika Zentroa (EHU-CSIC) eta Donostia International Physics Center (DIPC), Paseo Manuel de Lardizabal, 4 (20018 Donostia-San Sebastián, Gipuzkoa, Euskal Herria). – [aizpurua@ehu.eus](mailto:aizpurua@ehu.eus) – <https://orcid.org/0000-0002-1444-7589>.

**Nola aipatu / How to cite:** Aizpurua, Javier (2020). «Argia txiki egiten denean»; *Ekaia*, 38, 2020, 275-293. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.21261>).

Jasoa: 19 azaroa, 2019; Onartua: 26 maiatza, 2020.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2020 UPV/EHU



Obra hau Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentziatzen da

## 1. SARRERA

Argia alde guztietatik inguratzen gaituen natura-elementu bat da. Argia, azken finean, Lurreko biziaren gakoetako bat da; haren bidez lortzen da eguzki-energia, eta eguzki-energiak materia organiko bihurtzen du materia bizigabea, eta, azken batean, Lurrean ezagutzen dugun bizia sortzen. Aspaldiko belaualdietatik hona, Eguzkia gauza onekin, positiboekin eta bizi-prozesuen birsorkuntzarekin lotu izan da, eta iluntasuna, berriz, negatibotasunarekin, epelkeriarekin eta heriotzarekin. Pentsamendu hori bera izan dute historiaurreko kulturetan, kultura egiptoar eta greko-erromatarretan, Ekialdeko filosofietan eta erlijio kristauan. Kultura horietan guztietan, argia jatorrizko elementua da, gainerako sorkuntzaren iturria. Naturaren funtsezko elementua izaki, arrazoizkoa da filosofoek argiaren izaerari buruzko galderak egin izatea hasiera-hasieratik, eta, bereziki, gizakiaren ikuspegitik argiak duen alderdirik praktikoenari buruzkoak: ikusmena. Pitagorasek, K.a. VI. mendean, eta Platonek, ondoren, esaten zuten «argia» sentore gisa jarduten zuten izpi batzuez osatuta zegoela, eta izpi horiek begitik objektura bidaiatzen zutela [1]. Haien arabera, izpiek objektua ukitzen zutenean jasotzen zen ikuste-sentsazioa, ukimenarekin gertatzen den antzera. Beste filosofo batzuek, Aristoteles buru zutelarik, argia «inguru-nearen» aldaketa gisa ulertzen zuten, zehaztu gabeko eta berezko izaerarik gabeko zerbait bezala. XVI. mendean zientzia enpirikoa iritsi zen, eta XVIII. mendeko ilustraziora arte iraun zuen haren bilakaerak. Aldi hartan, humanistak eta zientzialariak zorroztasun handiagoz hasi ziren argiaren izaerari buruzko planteamenduak egiten, metodo zientifikoan oinarrituta. Bi funtsezko korrante zeuden, eta lehen begi-kolpean kontrajarriak ziruditen errealitateak planteatzen zituzten: argiaren teoria ondulatorioa eta teoria korpuskularra. XVII. mendean, Christiaan Huygens-ek argiaren izaera ondulatorioa proposatu zuen [2]. Teoria horren arabera, argia uhin gisa hedatuko litzateke, eta uhin guztiek bezala, argiak ere difrakzioaren fenomenoak jasango luke. Difrakzioaren eraginez, uhin-fronte orok, oztopo bat topatzen duenean, perturbazio-iturri bihurtzen du oztopo hori ere, eta, ondorioz, beste uhin-fronte eraldatu bat eratzen. Hizkera arruntean esanda, oztopo baten aurrean, uhina «tolestu» eta «hedatu» egiten da. Difrakzioaren fenomeno hori ez litzateke gertatuko argiak korpuskuluak transmitituko balitu; izan ere, korpuskulu horiek errealitate materialak dira, eta, oztopo batekin talka egitean, ibilbide jakin batetik desbideratuko lirateke, talka hori erabat neutralizatzeraino ere. Newtonen ustez, objektu argidunek energia irradiatzen dute partikula edo korpuskulu eran, eta partikula horiek lerro zuzenean bidaiatzen dute [3]. Postulatu horren arabera, argia hainbat motatako korpuskuluz osatuta egongo litzateke, eta korpuskulu mota bakoitza kolore jakin bati lotuta egongo litzateke. Kolore horiek agerian gelditzen dira, korpuskuluak, prisma batetik igaroarazi, eta elkarrengandik bereizten direnean. Argiaren izaerari buruzko disgresio historiko honetan, mugarri bat

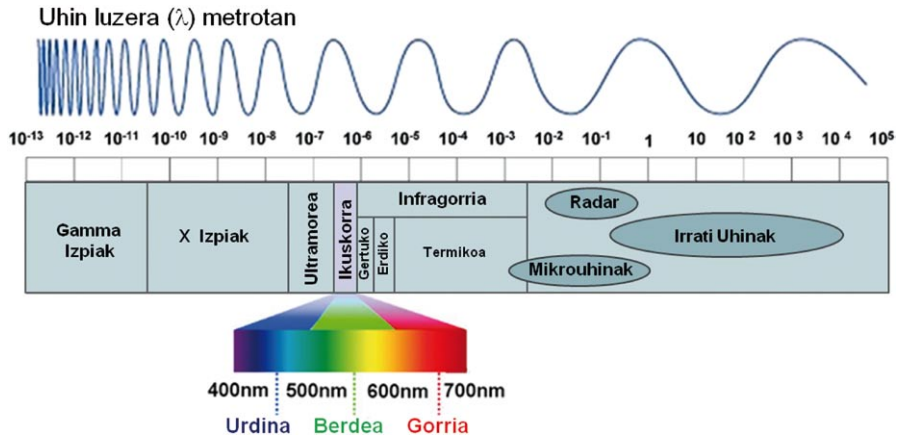
ezarri zuen esperimentu batek. Esperimentu hori funtsezkoa izan zen fisikaren historiarako, eta, jakina, optikarenerako. Thomas Young zientzialari ingelesak esperimentu gako bat egin zuen XIX. mendean: bi zirrikitu mehe jarri zituen, haietatik zehar argia pasarazteko. Zirrikitu horien beste aldean pantailan bat jarrita, Young-ek ikusi zuen ezen txandakatuz doazen lerro distiratsu eta ilunek osatutako patroï bat sortzen zela. Patroï hori interferentzia-patroï bat zen; uhinei dagokien patroï bat, hain zuen ere. Esperimentu horrek anbiguotasunik gabe berretsi zuen argiaren uhin-izaera. Hori dela eta, argiaren hedapenaren teoriak sustatzeko akuilu izan zen. Beste pentsamendu korrante batzuen artean, XIX. mendeko zientzialari askok «eter» edo ingurune «garden» baten ideia defendatzen zuten. Haien arabera, eter horrek sostengatzen zuen argiaren hedapena ingurune horretan zehar.

## 2. ARGIAAREN IZAERA

1865ean, James Clerk Maxwell-ek argiaren oinarritzko teoria argitaratu zuen «Eremu elektromagnetikoaren teoria dinamiko bat» izeneko lanean [4]. Lan hori elektrizitateari eta magnetismoari buruzko bere tratatuarekin osatu zuen, 1873an. Lan horretan, Maxwellek bateratu egin zituen elektrizitatea eta magnetismoa «Maxwellen lau ekuazio» ezagunetan. Ekuazio horiek elektromagnetismoaren funtsa dira, eta haietatik zera ondorioztatzen da: argia eremu elektrikoen eta magnetikoen segida bat da, eta eremu horiek uhin gisa eta atzeraelikatuz barreiatzen dira denboran eta espazioan zehar. Ekuazio horietan oinarrituta, erreferentziazko luzera bat zehaztu daiteke uhin elektromagnetikoak espazioan egiten duen hedapenarekin erlazionatuta; erreferentziazko luzera hori eremu elektromagnetikoaren ondoz ondoko bi maximoren arteko distantzia gisa definitzen da, eta distantzia horri **uhin-luzera** ( $\lambda$ ) deitzen diogu. Uhin-luzearen balioaren arabera, hainbat uhin elektromagnetiko daude, eta sorta zabala osatzen dute, 1. irudian ikus daitekeen bezala: zenbait metro edo kilometroko uhin-luzerak dituzten irrati-uhinak, mikrouhinak, infragorriko uhinak, uhin optikoak (450-750 nm), bai eta angstrom ( $\text{\AA}$ ) gutxi batzuetako uhin-luzera duten X izpiak ere. Giza begiek uhin optikoak soilik detekta ditzakete. Hori dela eta, uhin-tarte horri uhin ikusgaien tarte ere deitzen zaio. Esan daiteke, esajeratu gabe, elektromagnetismoaren garapenak, funtsezko zientzia gisa eta, gerora, ingeniaritza aplikatuan izan zuen bilakaeraren bidez, aurrekaririk gabeko iraultza teknologikoa ekarri zuela XIX. mendean. Eta, horri esker, hainbat gailu garatzen jarraitzen dugu gaur egun, esate baterako, nanoeskalako korrante elektrikoak dituzten txip miniaturizatuak, edo zuntz optiko bidezko komunikazio-seinaleak, XXI. mendean hasieran informazio-transmisioaren oinarri direnak.

Maxwellen ekuazioen aplikazioak arrakasta handia izan du. Izan ere, aplikazio horretan bat egiten dute ekuazio funtsezko, harmoniatsu eta

nahiko simple batzuen berezko edertasunak eta industriako gailu sofistika-  
tuenen indarrak eta konplexutasunak (zentral elektrikoak, gailu elektroni-  
koak ekoizteko plantak...).



**1. irudia.** Espekto elektromagnetikoa Erdiko taulan uhin elektromagnetiko arruntenak ageri dira, ganean uhin elektromagnetiko mota bakoitzari dagokion uhin-luzeraren balioen tarte kuantitatiboekin batera, metrotan. Ikusten denez, uhin elektromagnetikoen uhin-luzera zenbait magnitude-ordenatan zehar zabaltzen da. Hala, irrati-uhinek zenbait metroko edo kilometroko uhin-luzera izaten dute ( $1 \cdot 10^5$  m) eta X izpiek, berriz, nanometro hamarreneko luzerak ( $10^{-10}$ - $10^{-8}$  m). Argiak edo erradiazio ikusgaiak, ordea, 400 nm-tik (urdina) 750 nm-ra (gorria) arteko uhin-luzerak izaten ditu, taularen azpiko tarte handituan ikusten den bezala.

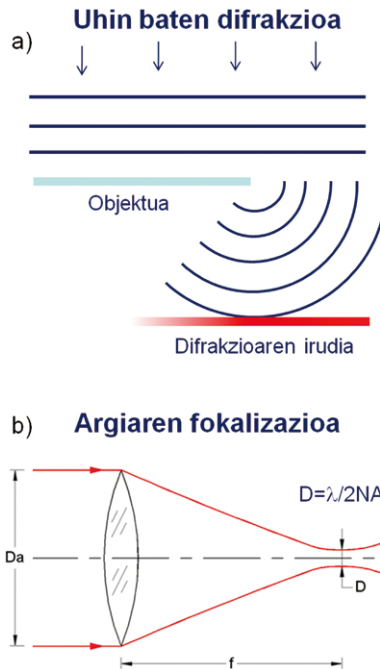
XIX. mendean bazirudien Maxwellen ekuazioek argiaren inguruko galdera guztiei erantzuten zietela; alabaina, 1905. urtean, Albert Einsteinek argiaren izaerari buruzko azalpen guztiz bestelakoa proposatu zuen gainazalen fisikako fenomeno konplexu bat azaldu ahal izateko: efektu fotoelektrikoa. Gainazal metaliko bati argi sorta batez erasotzean, gainazal horretako elektroiak erauzi egiten ziren, baina erauzitako elektroi horien propietateak ez zetozen bat elektromagnetismo klasikoaren arauekin, eta Einsteinek modu puskatzaile batez proposatu zuen ezen argiaren izaera korpuskularra ere bazela; beste era batera esanda, argia **fotoi** izeneko kuantuz edo energia-paketez osatuta zegoela. Fotoi horiek argiaren eta solido baten elektroiaren arteko elkarrekintza azaldu dezakete. Efektu fotoelektrikoa esperimentera egiaztatu zen, eta Einsteinini Nobel saria eman zioten. Hala, egiaztatuta gelditu zen inguratzen gaituen munduaren uhin-korpuskulu dualtasuna. Dualtasun hori Louis de Broglie postulatatu zuen, geroago, 1924an. De Broglie esan zuen objektu orok duela izaera duala —uhina eta korpuskulu—, eta izaera hori abiaduraren arabera zela. Izan ere, argiak uhin gisa jokatzen du askotan, baina, beste egoera batzuetan, argiaren osa-

gai diren energia-kuantu edo «fotoi» horiek gailentzen dira argiaren jokae-ran, eta haiek baldintzatzen dute argiak beste elementuekin eta ingurunea-rekin egiten duen energia- eta momentu-trukea. Dualtasun zoragarri horrek trinkotasunez azaltzen ditu argiaren eta materiaren arteko elkarrekintza ho-rretan gertatzen diren fenomeno ia guztiak.

### 3. DIFRAKZIO-MUGA

Elektromagnetismoak zorrotzasunez eta zehaztasunez deskribatzen du, Maxwellen ekuazioen bidez, argiak ingurune batean duen hedapena, eta as-kotariko tamainako eta osaketako objektuekin duen elkarrekintza. Lehen aipatu dugun difrakzioaren fenomenoak, uhin batek eta objektu batek elka-rri eragiten diotenean gertatua, uhinaren berezko fenomeno berezi bat eragi-ten du: uhin-fronte bat ezin da mugarik gabe lokalizatu edo harrapatu. Uhin batek —dagokion uhin-luzerarekin (kolorea)— eta materiak elkarri era-giten diotenean, uhin hori «hedatu» egiten da, eta ezin da lokalizatu bere uhin-luzera baino distantzia txikiagoan, 2a). irudian eskematikoki azaltzen den bezala. Hizkera arruntean, uhina ezin da harrapatu bere uhin-luzera baino txikiagoa den tarte batean. Uhin bat lokalizatzeko muga horri difrak-zio-muga deitzen zaio Fisikan. Uhin guztiek berezkoa duten muga horrek atalase bat ezartzen du, eta handik behera uhin bat ezin da lokalizatu; ho-rrenbestez, uhin batek ez du balio  $D$  luzera baino tamaina txikiagoa duten objektuak bereizteko. Argia lokalizatzeko distantzia minimo  $D$  hori uhin-luzeraren mende dago (honako ekuazio honen arabera:  $D = \lambda/2NA$ , non  $NA$  mikroskopia baten irekiera numerikoa den), 1873an Ernst Abbe-k eza-ri zuen bezala [5]. 2b). irudian efektu hau erakusten da, argia lente batek fokalizatzen duenean. Bereizmen optikoaren balio-muga da, eta muga hori difrakzio-mugak ezartzen du.

Difrakzio-mugak erronka bat jartzen dio optikari: espektro ikusgaiko uhin-luzerek ( $\lambda \approx 450 \text{ nm}-750 \text{ nm}$ ) 200 nm-tik 400 nm-rako tamaina duten difrakzio-mugak ezartzen dituzte; hori dela eta, sorta optiko konbentzional bat ez da gai tamaina hori baino txikiagoko objektuak optikoki identifikatu eta bereizteko. Lente ahaltzuenek eta zuntz optiko sofistikatuenek zelula-osagaietako elementuak identifika eta bereiz ditzakete, elementu horien ta-maina zenbait mikrometrotakoa baita; alabaina, mikroskopia optiko bat ez da gai mikra-erditik beherako tamaina duten objektuak argiztatzeko. Beraz, nanomundua, optika konbentzionalaren testuinguruan, argiaren helmenetik kanpo gelditzen da.



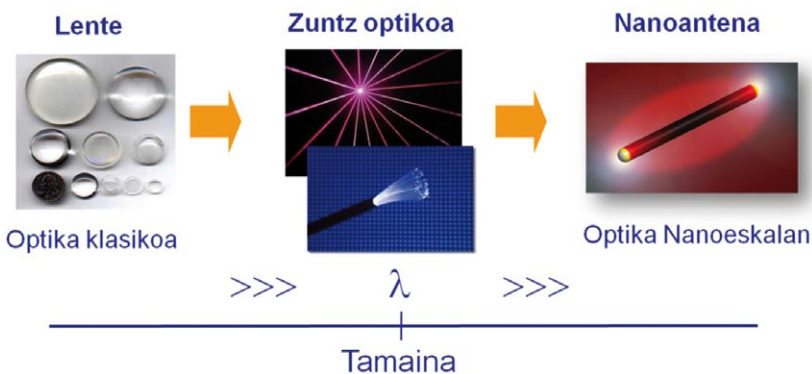
**2. irudia.** a) Difrakzio-prozesuaren eskema. Goitik etorritako uhin bat, objektu bat topatzen duenean, «difraktatu» egiten da; hala, uhin horren uhin-frontea barreiatu egiten da, eta lortutako irudiari difrakzio-irudia deitzen zaio. b) Difrakzio-muga erakusten da eskematikoki. Difrakzioagatik, lente batek lortzen duen argiaren fokalazioa mugatua dago. Irudi honetan, zehazki, ezkerretik etorritako  $\lambda$  uhin-luzerako uhin-fronte bat,  $D_a$  diametroa eta  $f$  distantzia fokala dauzkan lente arrunt batek fokalizatzen du eskuinean. Argia fokalizatzeke  $D$  tamaina minimoa difrakzio-muga zehazten du,  $D = \lambda/2NA$  erlazioaren bidez, non  $NA$  lentearen irekiera numerikoa den.

#### 4. NANOOPTIKA

Nanozientziak eta nanoteknologiak, azken hamarkadetan, gizateriaren estatus teknologikoa irauli dute. XXI. mendean gizakia jada ohituta zegoen garaiko errealitate teknologikora, baina egitura nanometrikoak ( $10^{-9}$  metro inguru luze izaten dira) asmatzeak, ekoizteak eta erabiltzeak ikaragarri aldatu du errealitate teknologiko askorekiko ikuspegia. Esate baterako, silizio-txipak miniaturizatu, eta 7 nm-tik beherako atakak dituzten transistoreak egin dira. Adibide horrek ongi erakusten du zer-nolakako eragina duen nanoteknologiak gure bizitza gobernatzen duten gailu elektroniko ia guz-

tietan. Material eta gailu berriak nanoeskalan garatzean, prozesu fisiko, kimiko eta biologikoak eraginkortasun handiagoz eta modu miniaturizatuan egin daitezke, eta energia asko aurreztu; hori dela eta, material horiek fidagarriagoak eta seguruagoak dira. Jada ezarritako prozesuak eta teknologiak hobetzeaz gain, nanoteknologiak aukera ematen du ezagutzaren muga berriak erdiesteko, nanomundurako atea irekiz. Mundu horretan, zientzialarien eta teknologen eskuera gelditu da atomo eta molekulekin «jolasteko» ametsa. Optikari onura handiak ekarri dizkio nanozientziaren eta nanoteknologiaren garapenak. Argiaren kaptadore eta igorgailu gisa jarduten duten nanoegitura metalikoak ekoizteak iraultza ekarri du argi ikusgaian oinarritutako teknologietara; izan ere, nanopartikula metaliko horiek ezinezkoa zirudiena ahalbidetu dute: argia nanoeskalan harrapatzea. Nanopartikula metalikoen gainazaleko elektro-plasmaren edo «gainazal-plasmoiden» kitzikapen batzuei esker, argia (baldintza normaletan ezin da lokalizatu difrakzio-mugaren azpitik) nanopartikularen dimentsioetan harrapatuta gelditzen da, nahiz eta dimentsio hori erabilitako uhin-luzera (kolorea) baino askoz txikiagoa izan [6]. Fenomeno hori elektro-kitzikapen horien mugimenduak eta ezaugarriek ahalbidetzen dute; hala, argiak elektroiekin «bat egiten du», eta, modu horretara, nanoeskalarekin konektatuta gelditzen da. Nanopartikula horiek, nolabait, nanoantena optiko gisa jarduten dute, argia nanoeskalan jaso eta igortzen baitute, eta, horrenbestez, nanomundua argizatzen duten nanolinterna gisa jokatzeko dute (ikus 3. irudia) [7]. Nanopartikularen plasmoiden esker argia difrakzio-mugaren azpitik harrapatzeko aukera berri horrek bidea ematen du hainbat aplikazio teknologiko garatzeko. Jarraian, aplikazio horietako batzuk zehazten dira.

## Optikatik Nanooptikara



**3. irudia.** Optika konbentzionaletik (lenteak), zuntz optikoetarako eta nanooptikarako (nanoantena) trantsizioa erakusten duen eskema. Trantsizio horretarako, beharrezkoa izan da argia jasotzen duten egituren tamaina uhin-luzeraren azpitik ( $\lambda$ ) murriztea.

#### 4.1. Nanooptikaren aplikazioak

Gehiegi sakondu gabe, eta modu argigarri batean, nanooptikak eragin teknologiko handia izan dezakeen eremu batzuk aipatuko ditugu. Eremu horiek oinarrizko erronka sozialei erantzuteko promesa sendoak dira. Nanooptikaren egungo errealitatea ahalbidetu duten mugarri teknologikoen azken erdiespenak dituzte oinarri. Nanooptikak eremu askotan izan du eragina. Hala ere, esan liteke arlo hauetan izan dituela jarduera eta lorpen nabarmenenak:

- (i) Nanoskopia optikoa (instrumentazioa eta karakterizazioa nanoeskalan).
- (ii) Espektroskopia molekularra (segurtasuna eta osasuna).
- (iii) Termoterapia onkologikoa (osasuna).
- (iv) Energiaren metaketa (jasangarritasuna).
- (v) Material artifizialak (ingeniaritza optikoa).
- (vi) Komunikazioaren teknologiak (konputazio kuantikoa fotoiekin).

Jarraian, azaletik deskribatuko ditugu eremu horietako batzuk, nanooptikak duen ahalmenaren ideia orokor bat egiteko.

##### 4.1.1. Nanoskopia optikoa

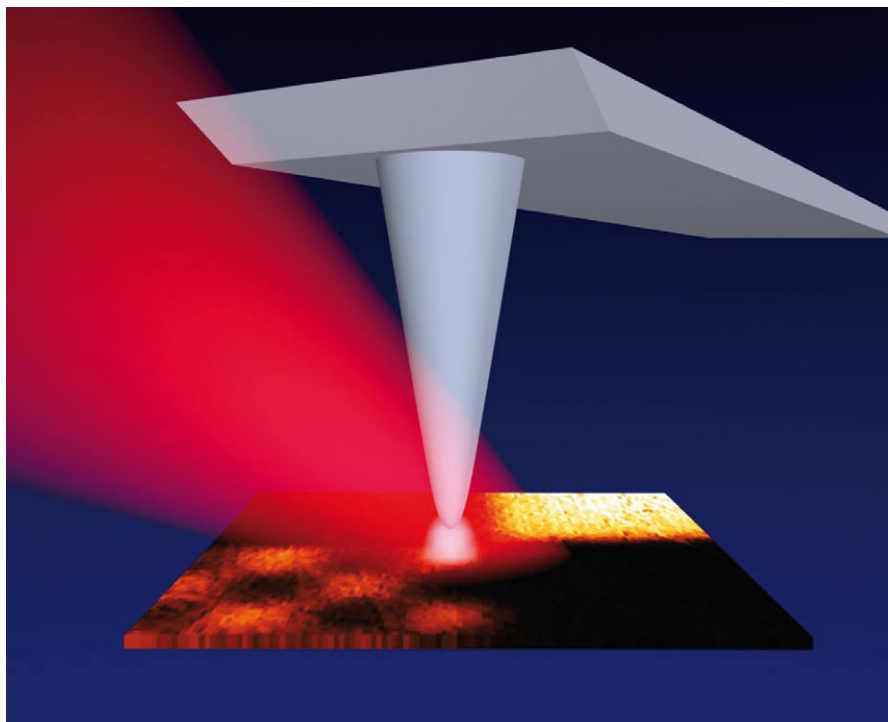
Sarreran esan den bezala, difrakzio-mugak eragotzi egiten du argi ikusgaiarekin mikra-erditik beherako objektuak eta egiturak bereiztea optika errefraktibo arruntarekin; alabaina, nanoantena optikoak erabilia, nanoegitura metaliko bat eraiki daiteke argia nanoeskalan lokalizatzeko. Aurreko atalean aipatu den bezala, kasu honetan, nanoegitura metaliko baten argia lokalizatzeko printzipioa elektroieroaleen kitzikapen kolektiboan datza, hau da, materia kondentsatuaren kitzikapen batean eta ez argiaren errefrakzio ibilbidearen fokalizatzean. Atal honetan nanoegitura hauek sortutako nanoskopia egiteko ahalmenaz arituko gara. Hala ere, hau ez da nanomunduaren informazioa eta nanoeskalako bereizmen optikoa lortzeko modu bakarra. Azken hamarkadan, nanoegituren eta nanoantenen plasmoiak erabili beharrean, argi-igorle bereziak ere erabili dira, adibidez, molekulak edota puntu kuantikoak (fluoroforoak). Hauek dauzkaten argia igortzeko ezauzgarriak eta estatistika kontrolatuz, nanoeskalako ingurune biologikoen bereizmen handiko irudi optiko harrigarriak lor daitezke. Adibidez, zelula baten barruan horrelako igoerleak jarriz, zelula horren osagaien irudi optikoak eskuratu dira. Printzipio hau erabiltzen duten teknikei «fluoreszentzia-mikroskopiak» deitzen zaie. Teknika hauek eremu urruneko superbereizmen mikroskopia eta zelularen egitura edo osagaiak optikoki bereizteko teknologia irauli dute. Mikroskopia hauen artean, argi-igorleen portaera ez-linealaz baliatzen direnak aipa daitezke (*igorpen estimulatua*ren txikiagotze (STED, ingelesezko izenetik) mikroskopia [8], adibidez) edota igoerlearen fo-



toiak igortzeko dinamika desberdinez baliatzen direnak (*fotoaktibatutako lokalizazioko mikroskopia* (PALM) [9] eta *berreraikuntzako mikroskopia optiko estokastikoa* (STORM) [10], besteak beste). Teknika hauek egindako ekarpen zientifiko eta teknologikoengatik 2014ko Nobel saria lortu zuten S. Hellek, E. Betzigek eta W. Moernerrek. Fluoreszentzia-mikroskopia hauek fluoroforoek igorritako argiaren eremu urruna detektatzeko ahalmeanean oinarrituta daude.

Nanoingurune bateko material baten ezaugarri optikoak bereizteko, fluoroforoak erabili beharrean, badago bereizmen handiko irudi optikoak lortzeko beste aukera bat: nanoingurune horren ondoan argia lokalizatzen duen nanoegitura bat (nanoantena moduan) kokatzea. Horrela, aukeraturako nanoegitura horrek, bere elektroien kitzikapenei esker (plasmoiak), etorritako argia harrapatzen du, eta, era honetan, zuzenean materialaren eremu zehatz baten informazio optikoa lor daiteke. Nanoeskalako informazio optiko hori nanoegituraren (nanoantenaren) eta materialaren eremu elektriko hurbilaren arteko elkarrekintzatik lortzen da. Beraz, horrelako nanoegitura bat nanomundua argiztatzeko eta bereizteko nanolinterna gisa erabil dezakegu. Egitura hori kono-formako punta metaliko bat izan daiteke, eta argiak punta horren kontra jotzen duenean, nanopuntaren plasmoiak gai dira argia punta horretan harrapatzeko. Punta hori aztergai den materialaren inguruan mugitzen baldin badugu (ekortzea), toki bakoitzeko informazio optikoa lor daiteke, eta, horrela, bereizmen handiko irudi optikoa lortu; hala, punta horrek ekortze-nanolinterna bezala funtziona dezake. Punta hori dispersio bidezko ekortze-mikroskopia optikoen (s-SNOM ingelesezko siglak) oinarria da. Mikroskopia horien bidez, bereizmen nanometrikoarekin ikus eta bereiz daitezke gainazaleko materialen eta inguruenean ezaugarriak [11]. Ahalmen horren adibide bat 4. irudian erakusten da [12]. Uhin ikusgaiko edo infragorriko uhin-luzerako laser sorta batek mikroskopia-punta horietako bat argitzen du. Ikusten den bezala, argia punta horretan harrapatuta gelditzen da, eta punta horrek nanoantena hartzaile eta igorle gisa jarduten du. Argia lokalizatzeaz gain, nanopunta horrek material baten kontraste optikoko informazioa igortzen du material hori ekortzen ari den heinean, eta, horrela, bereizmen nanometrikoa duen irudi optiko bat sortzen du, puntaren azpian dagoen gainazalaren irudi optikoan ikusten den bezala. Bide horretan, nanoantena bidezko nanooptikak, materialen mikroskopia egin ordez, materialen «nanoskopia» egiteko aukera ekarri du, lortutako irudi optikoez ez baitute difrakzio-mugarik. Printzipioz, teknika honi esker lortutako erresoluzioa, mikroskopiaoren puntaren erradioak ezartzen du. Normalean, s-SNOMean erabilitako puntak 15 nanometro inguruko erradioa daukate. Hori horrela, antena hauekin lortutako erresoluzio-balioek difrakzio-muga erraz gainditzen dute. Ahalmen horri esker, fabrikazio industrialeko prozesuetan kalitate-kontrolak egiteko metodo optikoak gara daitezke, besteak beste. Adibidez, txip elektronikoen baten materialen ezaugarriak azter litezke nanoskopia honi esker,

transistore baten erdieroaleen dentsitate elektronikoaren gune desberdinak bereiziz. Horrela, transistore horren bi dimentsioko mapa elektronikoa lor liteke [13].

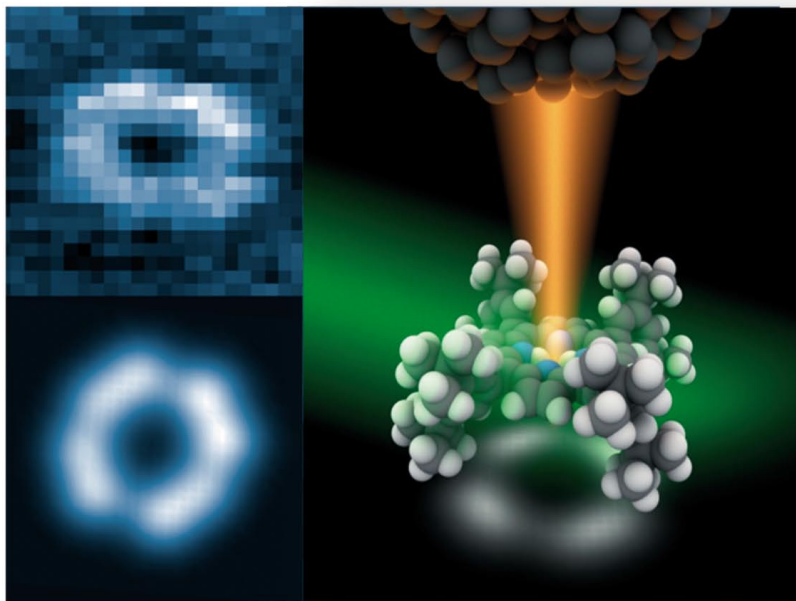
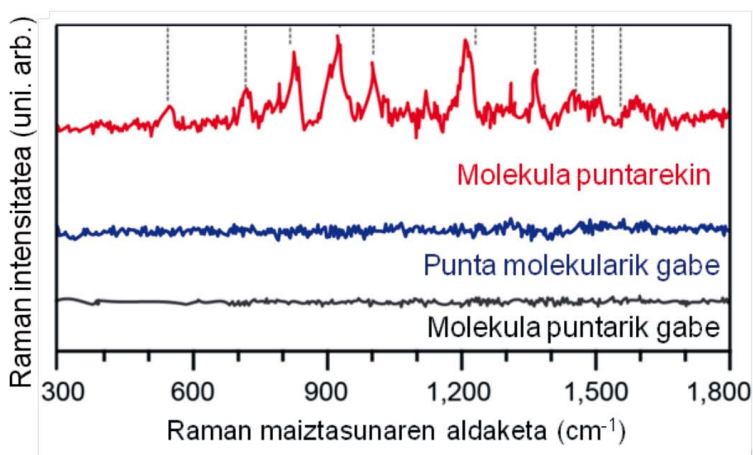


**4. irudia.** Gainazal baten nanoskopia optikoa. Nanopunta metaliko batek argi harrapa dezake bere muturrean, punta horri argi sorta batekin erasotzen zaionean. Nanopunta horrek nanolinterna gisa funtzionatzen du; hala, punta horrekin material bat ekortzean, lagin horren irudi optiko bat lortuko dugu, eta irudi horrek bereizmen nanometrikoa izango du. NeaSpec-eko baimenarekin erabilitako irudia.

#### 4.1.2. *Espektroskopia molekularra*

Materia organikoa hobeto ulertzeko eta haren propietate kimiko eta fisikoak ikertzeko, material hori osatzen duten molekulak aztertzea oso egokia da. Molekulen egitura elektronikoa eta bibrazionala ezagutzeko (eta, orokorrean, materiarena), mota desberdinetako zundak erabiltzen dira, molekulen kitzikapenak eragin ditzaketenak. Zunden artean, elektroizakarrak [14], neutroiak [15] edota, artikulu honetan azaltzen den mo-

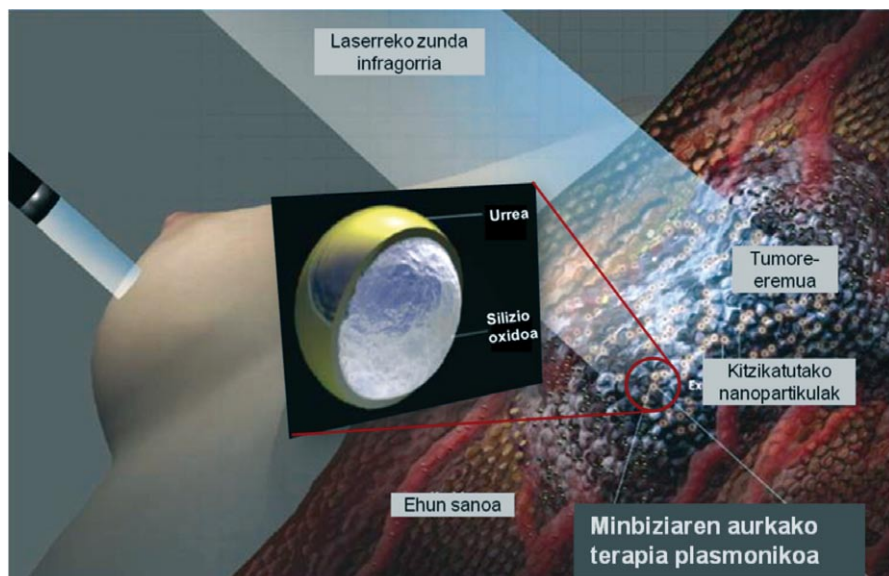
duan, erradiazio elektromagnetikoa aurkitzen dira. Hain zuzen ere, erradiazio elektromagnetiko ikusgaiek eta infragorriek zenbait kitzikapen molekular sor ditzakete, eta kitzikapen horien intentsitatea erradiazioaren uhin-luzeraren arabera (hau da, energiaren arabera) ikustaten bada, molekula horien kitzikapenen espektroa lor daiteke. Molekula baten espektroak molekula hori identifikatzen du: espektroaren kitzikapenen az-tarnak molekula espezifiko bati dagozkio. Espektroari esker, beraz, substantziak identifikatzeko gailuak gara daitezke zenbait arlotan intereseko biomolekulak era eraginkorrago batean detektatzeko: adibidez, medikuntzan edota segurtasun-alorrean. Molekula baten espektroa argi ikusgaiarekin edota infragorriarekin lortu nahi denean, molekula arruntan erantzun optikoa oso ahula da eta, askotan, espektroa oso zaratatsu agertzen da; ondorioz, molekulen kopurua txikia denean, informazio lortzea ezinezkoa da. Molekulen inguruan nanoantena bat jarritz gero, molekulak igorritako argiaren intentsitatea handitu daiteke; horrela, molekula horren seinalea eta informazioa jasotzeko modu eraginkorragoa lortzen da. Hori da nanoantena (edo gainazalak) handitutako espektroskopia molekularren oinarria. Esan bezala, nanoeskalan egiten den nanoantena handitutako espektroskopia optikoari esker, molekula bat ikusteaz gain, molekula hori anbiguotasunik gabe identifika daiteke, molekula horren hatz-marka espektroskopikoei esker [16, 17]. Honen adibidea 5. irudian azaltzen da. Beheko eskuineko irudian, molekula bakar baten nanoskopia eta espektroskopia era bateratuan azaltzen dira. Ikus daitekeen bezala, molekula organikoaren gainean kanpotik etorritako argia nanoeskalan fokalizatzen duen punta metaliko bat kokatzen da. Argi harrapatu horri esker, molekularen bibrazio-espektroaren seinalea askoz garbiago bereiz daiteke. Irudiaren goiko panelean molekularen Raman espektro bibrazionalak azaltzen dira: molekula bakarrik dagoenean (lerro beltza), nanoantena-punta bakarrik dagoenean (lerro urdina) eta, azkenik, argi lokalizatua duen puntarekin molekula aztertzen denean (lerro gorria). Lehenengo bi kasuetan, seinalea oso zaratatsua da eta ezinezkoa da seinale bibrazionala identifikatzea; hirugarren kasuan, ordea, argi ikusten da puntaren eragina molekularen Raman seinale bibrazionala nabarmenki azalduz. Halako teknologiei esker, substantzia baten kantitate oso txikiak detektatzen dituzten sensorsak gara daitezke; horrek eragin handia du hainbat erronkatan: besteak beste, segurtasunean (lehergailuak, substantzia toxikoak) eta osasunean (antigenoen eta substantzia kaltegarrien detekzioa). Espektroa handitzeko gaitasunarekin batera, punta molekularen ondoan ekortzean, eta bibrazioa energia zehatz bat aukeratuz, seinale bibrazionalaren irudi optikoa lor daiteke, 5. irudiaren beheko ezkerreko paneletan erakusten den bezala [17].



**5. irudia.** Goian:  $H_2TBPP$  molekula baten Raman espekto bibrazionala zilarrezko gainazal batean, punta metaliko bat zunda bezala erabiltzen denean (lerro gorria), kontrol bezala molekularik ez dagoenean (lerro urdina), eta molekula soil bat dagoenean, puntarik gabe (lerro beltza). Behean ezkerrean: molekula bakar baten aztarna bibrazional baten irudi optikoa. Beherago ezkerrean: irudiaren kalkulua, tunel-efektuko mikroskopio baten argiztapen-baldintzen arabera. Beheko eskuineko irudi handia: nanoantena batek argiztatutako molekularen eskema. Txinako Zientzia eta Teknologia Unibertsitateko baimenarekin erabilitako irudia (Hefei).

#### 4.1.3. *Termoterapia onkologikoa*

Nanopartikulek edo antena optikoek, argia harrapatzean, nanomun-  
dua argizatzen dute. Baina, horrekin batera, energia kontzentratzean in-  
guruko tenperatura igotzen dute. Nanopartikula batek argia harrapatzen  
duenean, haren gertuko inguruneke tenperatura gradu batzuk altxatzen da.  
Efektu hori terapia termiko gisa erabili ahal izango litzateke, adibidez tu-  
more zelulak suntsitzeko, baldin eta nanopartikula horiek tumore-zelule-  
tara eraginkortasunez hurbildu ahalko balira. Hain zuen ere, nanopartikulak  
hain txikiak direnez, erraz garraiatzen dira odol-fluxuaren bidez organismo  
bizietan zehar, mintzek 100 nm-tik beherako objektuen sarbidea ahalbi-  
detzen baitute. Duela zenbait urtetatik hona, Estatu Batuetako puntako  
taldeek (Houston-eko Rice University) biobateragarriak diren urrezko na-  
nopartikulak diseinatzea lortu dute [18]. Inokulazio sistemiko bidez behin  
gorputzean sartuta, nanopartikula horiek berezko iragazkortasunez itsas-  
ten zaizkie zelula onkologikoei —harrotasun handiagoa baitute— inoku-  
lazioetik ordu gutxira. Nanopartikula horiek infragorriari dagokion uhin-lu-  
zeran (1.000 nanometro inguruko uhin-luzera) erresonatzeko diseinatzen  
dira; uhin-luzera horretan, giza gorputzak gardentasun-leiho bat baitu; hau  
da, tarte espektral infragorri horretan uhin elektromagnetikoek gorputza-  
ren ehunak gehiago zeharkatzen dituzte, eta, horrela, era eraginkorragoan  
tumore-zeluletara iristen dira. Tarte espektral horretatik kanpo, gorputzek  
uhin elektromagnetikoak xurgatzen dituzte, argiaren eragin terapeutikoa  
oztopatuz. Tumorearen eremu horri argi infragorri sorta batekin erasotzean,  
tumore ondoan dauden nanopartikulek argi hori jaso, eta beren gainazalean  
lokalizatzen dute, gertuko inguru guztia berotuz. Nanopartikuletatik gertu  
dauden tumore-zelulak tenperaturaren igoera lokalaren eraginez hiltzen  
dira, modu ez-inbaditzailean [19]. Nahiz eta ehunen tenperatura pixka bat  
igo, terapia hau oso kaltegabea da, beste terapia arruntekin alderatuz: hain  
zuzen ere, energi handiko erradiazioekin (erradioterapia) edota substantzia  
kimikoekin (kimioterapia). Urte luzez nanopartikulen toxikotasuna moni-  
torizatzen jardun ondoren, etorkizun handiko emaitza klinikoak lortu dira,  
besteak beste, prostatako minbiziaren ezabaketan, nanopartikulak tumore-  
eremuan behar bezala lokalizatzen direnean [20]. Beste minbizi lokalizatu  
mota batzuekin ere —esate baterako, bularreko edo garuneko minbizie-  
kin—, gauza bera egiten ari dira. Termoterapiaz gain, minbiziaren aurkako  
terapien nanopartikulek eragindako efektu desberdin asko ikertu eta apli-  
katu dira medikuntzan. Horietako batzuek ere argi infragorria erabiltzen  
dute, baina plasmoien tenperaturaren igoeraz baliatu beharrean, harrapatu-  
tako argi infragorriaren inguruan sortzen diren oxigeno singleteak erabil-  
tzen dira. Horiek, tumore-zelulak suntsitzen dituzte terapia fotodinamikoa  
delakoan [21]. Azkenik, terapia bezala erabilgarri izateaz gain, nanoparti-  
kulek, askotan, diagnostia egiteko gaitasuna ere azaltzen dute. Horrela, bai  
diagnostia, baita terapia ere batera egiteko aukera ematen duten teknikek  
Theragnostics delako arloa garatzea suposatzen dute.



**6. irudia.** Minbiziaren aurkako terapia plasmonikoa. Tumore-eremu batean kokatutako urrezko nanopartikulei (horiz, irudi handituan) argi infragorri sorta batekin (laser) erasotzen zaie; hala, eremua berotu egiten da, eta ondoan dauden tumore-zelulak ekintza termiko bidez desagerrarazten dira. Prozesu osoa erabat kaltegabea da. Irudia *Scientific Americako* 2007ko apirilaren aletik egokitua izan da.

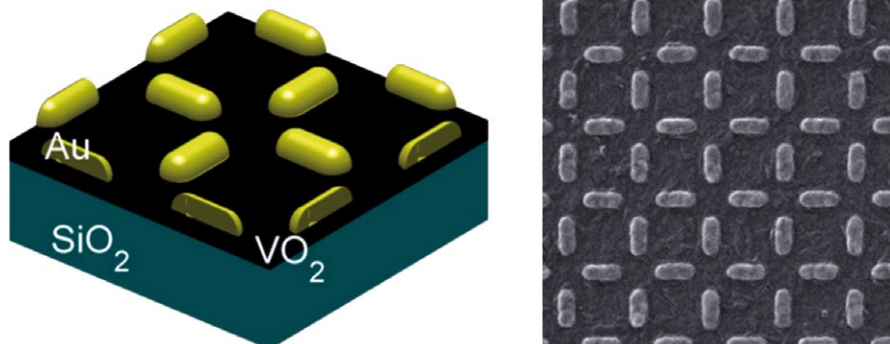
#### 4.1.4. Energiaren metaketa

Nanoantena metalikoeak eragin oso positiboa izan lezakete, halaber, eguzki-energiaren metaketaren arloan. Prozesu fotovoltaiako batean, material erdieroale batek edo eroale organiko batek argia jasotzen du, eta argi hori energia elektriko bihurtzen da erdieroalearen barruan karga positiboak eta negatiboak elkarrengandik bereizten direnean. Prozesu hori ez da oso eraginkorra izaten, eta industria fotovoltaikoa eta mundu osoko ikerketa-taldeak lanean ari dira eguzki-energiaren eraldatze-prozesuaren eraginkortasuna handitzeko [22]. Nanoantena optikoeak argia lokalizatzeko duten ahalmenari esker, hurbileko eroale bateko kargak azkarrago eta eraginkortasun handiagoz bereiz daitezke. Nanoantena plasmonikoeak materialaren argia xurgatzeko duten gaitasun handiagoa erabiliz, adibidez, metilamonio berun iodatozko perovskitazko zelula fotovoltaikoen lodiera txikiagotu daiteke [23]. Horrela, berunaren kantitatea murriztu eta perovskitan sortutako kargak migratzea errazago egiten dute nanoantenek. Fotobihurtzea lortzeko metal erdieroaleen heteroegituretan, argia harrapatzeaz gain, nanopartikulek eragin handia eduki dezakete beste

karga- eta energia-transferentziako mekanismoetan: besteak beste, elektroi/hutsune beroen transferentzian, edota energi transferentzia erresonantean. Prozesu horiek guztiak indartzeko, erdieroalearen ondoan kokatzen diren nanoantenen geometria, metal mota eta gainazaleko detaileak kontu handiz diseinatu behar dira [24]. Hori dela eta, ikerketa-ildo hori zientzia, teknologia eta berrikuntzako programa askoren jomugan dago, helburu estrategikotzat jotzen baita jasangarritasunaren erronka sozialari erantzuna emateko eta garapen ekonomikoaren motor izango diren ordezkio energiak garatzeko.

#### 4.1.5. *Material artifizialak*

Material naturalak atomoz osatuta daude, eta atomo horien sare erako antolaketa espazialak ematen dizkio material horri bere ezaugarri guztiak, baita ezaugarri optikoak ere. Bada, modu berean, nanopartikula metalikoekin sare nanometrikoak eratu daitezke, eta material artifizialak edo nanomaterialak sortu, 7. irudiko adibidean urrezko nanopartikulen metamaterial baten adibide bat azaltzen da [25]. Nanomaterial horien osagaiak hainbat forma eta tamainatako nanoantena izan daitezke. Aukeraturako nanoantena optikoak elkartuta, eta haiek sare espazial batean antolatuta, ezaugarri berriak dituzten material artifizialak edo «metamaterialak» sor daitezke [26]. Ezaugarri horiek ezingo lirateke lortu material naturaletan. Diseinu egoki baten bidez, errefrakzio-indize negatiboa duten material artifizialak lor daitezke adibidez. Material horiek material naturalek egingo luketenaren aurkako noranzkoan desbideratzen dute argia; efektu optiko harrigarriak sortzen dira hala [27]. Baina, agian, metamaterial-geruzez osatutako ikusezintasun-mantua da ezohiko material horien ezaugarriek ahalbidetutako lorpenik efektibo eta ikusgarriena. Objektu bat metamaterial horietako batez estaltzean, material horren diseinu bereziak argia deforma eta bidera dezake, eta, hala, objektua ikusgai izateko beharrezkoak diren itzalak eta izpi-desbideraketak eragotzi. Ondorioz, estalitako objektua benetan ikusezin bilakatzen da [28]. Harry Potter-en erabateko ikusezintasun-kaparen ametsa oraindik ez da egia bilakatu objektu makroskopikoetarako eta kolore guztietarako; alabaina, nanoobjektu batzuk ikusezin bihurtu dira jada, kolore jakin baterako metamaterial-mantu horietako batez estalita. Material baten ezaugarri optikoak nahierara diseinatu ahal izateak kamuflajearen eta operazio militarren mundua gainditzen du, eta etxeko erosotasunera, eraikuntzara eta artera iristen da.



**7. irudia.** Ezkerrean: Metamaterial baten diseinua. Urrezko nanopartikulen banaketa zehatzak material artifizial bat osatzen du. Argiak, horrelako material baten kontra jotzean, erantzun ikusgai berezia azal dezake. Eskuinean: mikroskopio elektronikoarekin ateratako metamaterialaren irudia, Southamptoneko Otto Muskensen laborategikoa.

#### 4.1.6. *Komunikazio-teknologiak*

Azkenik, aipamen berezia egin behar zaio nanooptikak komunikazioen munduan duen inpaktuari. Gaur egun, mundu osoan lokalki edo distantzia handietara transmititzen den informazio kantitate ikaragarriak pultsu optikoen forma du. Pultsu horiek zeroz eta batez (bitak) osatutako informazioa daramate, eta zuntz optikoen bidez transmititzen dira. Transmisio modu hori oso eraginkorra eta azkarra da; alabaina, informazio hori sortzeko eta prozesatzeko, formatu optikoa formatu elektriko bihurtu behar da, azken hori baita datu-prozesamenduaren formatu naturala. Elektroiek prozesatutako informazioa askoz makalagoa da, eta prozesamendu horri eusten dioten egiturak (transistoreak eta txipak) berotu egiten dira. Nanoantena optikoei aukera ematen dute izaera desberdineko informazio optikoen artean ordeztu interfaze azkar eta zuzen gisa jarduteko [29]. Xedea elektroien prozesamendu motela ekiditea izango litzateke, eta erabat optikoa den konputazioa garatzea. Konputazio horretan, nanoegiturek zuzenean sortu, manipulatu, prozesatu, igorri eta jasoko litzukete egoera fotonikoak, eta, horrela, abiadura handitu, tamaina murriztu, eta energia-galerak saihestuko lirateke. Fotoien bidezko konputazio kuantikoak, garatze-bidean denak, amets hori errealitate bihurtuko luke. Nanoantena optikoei paper garrantzitsua izango lukete transduktore eta interfaze gisa.



## 5. ONDORIOA

Egungo egoera teknologikoan, nanooptikak sekulako aukerak dakarza. Nanooptika funtsezko teknologia da informazioaren, komunikazioaren, material aurreratuaren, osasunaren edo segurtasunaren eremuak garatzen laguntzeko. Lehen filosofoak argiaren izaerari buruzko galderak egiten hasi zirenetik argi hori nanoeskalan lokalizatu arte — nanoteknologiaren garapenari esker —, gizateriak bide zirrargarria egin du, eta geroz eta indar handiagoz eta modu txundigarriagoan argitzen gaitu. Argia txiki egiten denean garapen teknologikoa handi egiten da, eta itsasargi berri bat sortzen da gizakiaren ongizatea eta bizi-kalitatea hobetzeko.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] AL-AMRI, M., EL-GOMATI, M., ZUBAIRY, M. (eds.) 2016. *Optics in Our Time*. Chapter 1: *A brief History of light*. DOI 10.1007/978-3-319-31903-2\_1, Texas.
- [2] HUYGENS, C., 1690. *Traité de la Lumière*, Leiden: Pieter van der Aa.
- [3] NEWTON, I., 1704. *Opticks, or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections, and Colours of Light*.
- [4] MAXWELL, J.C., 1865. «A dynamical theory of the electromagnetic field». *Phil. Trans. R. Soc.* **155**.
- [5] ABBE, E. 1873. «Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung». *Archiv für Mikroskopische Anatomie*, **9**, 413-418.
- [6] AIZPURUA, J., HANARP, P., SUTHERLAND, D.S., KÄLL, M., BRYANT, G.W., GARCÍA DE ABAJO, F.J. 2003. «Optical properties of gold nanorings». *Physical Review Letters*, **90**, 057401.
- [7] PELTON, M., AIZPURUA, J., BRYANT, G.W. 2008. «Metal-nanoparticle plasmonics». *Laser & Photonics Reviews*, **2**, 136-159.
- [8] HELL, W.H., WICHMANN, J. 1994. «Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy». *Optics Letters*, **19**, 780-782.
- [9] BETZIG, E., PATTERSON, G.H., SOUGRAT, R., LINDWASSER, O.W., OLENYCH, S., BONIFACINO, J.S., DAVIDSON, M.W., LIPPINCOTT-SCHWARTZ, J., HESS, H.F. 2006. «Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution». *Science*, **313**, 1642-1645.
- [10] RUST, M.J., BATES, M., ZHUANG, X. 2006. «Sub-diffraction-limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (STORM)». *Nat. Methods*, **3**, 793-795.
- [11] HUBER, A., KEIMANN, F., WITTBORN, J., AIZPURUA, J., HILLENBRAND, R. 2008. «Terahertz near-field nanoscopy of mobile carriers in single semiconductor nanodevices». *Nano Letters* **8**, 3766-3770.

- [12] OCELIC, N., HILLENBRAND, R. 2004. «Subwavelength-scale tailoring of surface phonon polaritons by focused ion-beam implantation». *Nature Materials*, **3**, 606-609.
- [13] HUBER, A., KEILMANN, F., WITTBORN, J., AIZPURUA, J., HILLENBRAND, R. 2008. «Terahertz near-field nanoscopy of mobile carriers in single semiconductor nanodevices». *Nano Letters*, **8**, 3766-3770.
- [14] JOKISAARI, J.R., HACHTEL, J.A., HU, X., MUKHERJEE, A., WANG, C., KONECNA, A., LOVEJOY, T.C., DELBY, N., AIZPURUA, J. KRIVANEK, L., IDROBO, J.C., KLIE, R.F. 2018. «Vibrational Spectroscopy of Water with High Spatial Resolution». *Adv. Mater*, 1802702.
- [15] ARBE, A., NILSEN, G.J., STEWART, J.R., ALVAREZ, F., GARCIA-SAKAI, V., COLMENERO, J. 2020. «Coherent Structural Relaxation of Water from Meso- to Inter-molecular Scales Measured Using Neutron Spectroscopy with Polarization Analysis». *Physical Review Research*, **2**, 022015(R).
- [16] XU, H.X., AIZPURUA, J., KÄLL, M., APELL, P. 2000. «Electromagnetic contributions to single-molecule sensitivity in surface-enhanced Raman scattering». *Physical Review E*, **62**, 4318-4324.
- [17] ZHANG, R., ZHANG, Y., DONG, Z.C., JIANG, S., ZHANG, C., CHEN, L.G., ZHANG, L., LIAO, Y., AIZPURUA, J., LUO, Y. YANG, J.L., JOU, J.G. 2013. «Chemical mapping of a single molecule by plasmon-enhanced Raman scattering». *Nature*, **498**, 82-86.
- [18] OLDENBURG, S.J., JACKSON, J.B., WESTCOTT, S.L., HALAS, N.J. 1999. «Infrared extinction properties of gold nanoshells». *Applied Physics Letters*, **75**, 2897-2899.
- [19] BARDHAN, R., LAL, S., JOSHI, A., HALAS, N.J. 2011. «Theranostic Nanoshells: From Probe Design to Imaging and Treatment of Cancer». *Accounts of Chemical Research*, **44**, 936-946.
- [20] RASTINEHAD, A.R., ANASTOS, H., WAJSWOL, E., WINOKER, J.S., SFAKIANOS, J.P., DOPPALAPUDI, S.K., CARRICK, M.R., KNAUER, C.J., TAOULI, B., LEWIS, S.C., TEWARI, A.K., SCHWARTZ, J.A., CANFIELD, S.E., GEORGE, A.K., WEST, J.L., HALAS, N.J. 2019. «Gold nanoshell-localized photothermal ablation of prostate tumors in a clinical pilot device study». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**, 18590-18596.
- [21] DOANEA, T.L., BURDA, C. 2012. «The unique role of nanoparticles in nanomedicine: imaging, drug delivery and therapy». *Chem. Soc. Rev.*, **41**, 2885-2911.
- [22] POLMAN, H., ATWATER, H.A. 2012. «Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics». *Nature Materials*, **11**, 174-177.
- [23] CARRETERO-PALACIOS, S., JIMÉNEZ-SOLANO, A., MÍGUEZ, H. 2016. «Plasmonic Nanoparticles as Light-Harvesting Enhancers in Perovskite Solar Cells: A User's Guide». *ACS Energy Lett.*, **1**, 323-331.

- [24] CUSHING, S.K., WU, N. 2016. «Progress and Perspectives of Plasmon-Enhanced Solar Energy Conversion». *J. Phys. Chem. Lett.*, **7**, 666-675.
- [25] MUSKENS, O.L., BERGAMINI, L., WANG, Y., GASKELL, J.M., ZABALA, N., DE GROOT, C.H., SHEEL, D.W., AIZPURUA, J. 2016. «Antenna-assisted picosecond control of nanoscale phase-transition in vanadium dioxide». *Light Sci. & Appl.* **5**, e16173.
- [26] LIU, N., GUO, H., FU, L., KAISER, S., SCHWEIZER, H., GIESSEN, H. 2007. «Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies». *Nature Materials*, **7**, 31-37.
- [27] SMITH, D.R., PENDRY, J.B., WILTSHIRE, M.C.K. 2004. «Metamaterials and negative refractive index». *Science*, **305**, 788-792.
- [28] NI, X., WONG, Z.J., MREJEN, M., WANG, Y., ZHANG, X. 2015. «An ultrathin invisibility skin cloak for visible light». *Science*, **349**, 1310-1314.
- [29] MARQUIER, F., SAUVAN, C., GREFFET, J.J. 2017. «Revisiting Quantum Optics with Surface Plasmons and Plasmonic Resonators». *ACS Photonics*, **4**, 2091-2101.