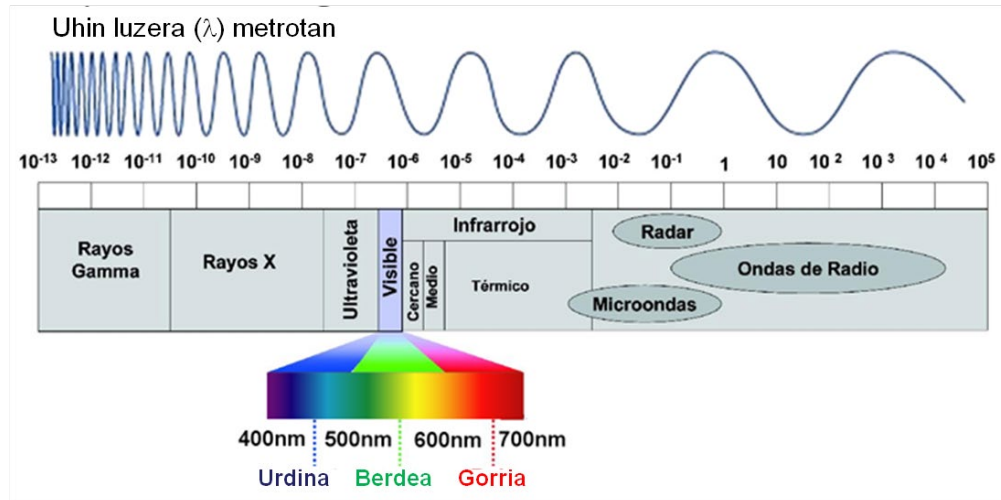


Argiaren izaera

1865ean, James Clerk Maxwell-ek argiaren oinarritzko teoria argitaratu zuen “Eremu elektromagnetikoaren teoria dinamiko bat” izeneko lanean. 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** 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, ingeniartzat aplikatua 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. mendearen hasieran informazio-transmisioaren oinarri direnak.



1. irudia: Espektro elektromagnetikoa. Uhin elektromagnetikoek hainbat uhin-luzera izaten dituzte. Hala, irrati-uhinek zenbait metroko edo kilometroko uhin-luzera izaten dute, eta X izpiek, berriz, nanometro hamarreneko luzerak. Argiak edo erradiazio ikusgaiak 400 nm-tik (urdina) 750 nm-ra (gorria) arteko uhin-luzerak izaten ditu.

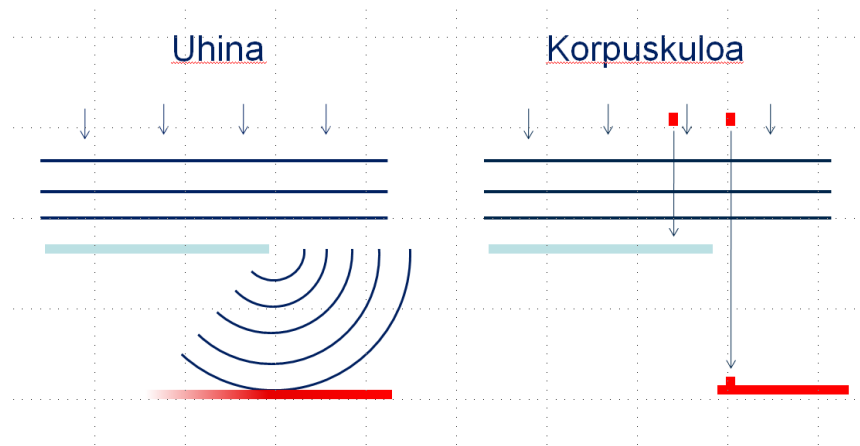
Maxwellen ekuazioen aplikazioak arrakasta handia izan du. Izan ere, aplikazio horretan bat egiten dute ekuazio funtsezko, harmoniatsu eta nahiko sinple batzuen berezko edertasunak eta industriako gailu

sofistikatueneen indarrak eta konplexutasunak (zentral elektrikoak, gailu elektronikoak ekoizteko plantak...).

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 bat argi sorta batez erasotzean, gainazal horretako elektroiak erauzi egiten ziren, baina erauzitako elektroien 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 elektroien arteko elkarrekintza azaldu dezakete. Efektu fotoelektrikoa esperimentalki 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 korpuskulua—, eta izaera hori abiaduraren arabera zela. Izan ere, argiak uhin gisa jotzen du askotan, baina, beste egoera batzuetan, argiaren osagai diren energia-kuantu edo “fotoi” horiek gailentzen dira argiaren jokoan, eta haiek baldintzatzen dute argiak beste elementuekin eta ingurunearekin egiten duen energia- eta abiadura-trukea. Dualtasun zoragarri horrek trinkotasunez azaltzen ditu argia eta materiaren arteko elkarrekintza horretan gertatzen diren fenomeno ia guztiak.

Difrakzio-muga

Elektromagnetismoak zorroztasunez eta zehaztasunez deskribatzen du, Maxwellen ekuazioen bidez, argiak ingurune batean duen hedapena, eta askotariko tamainako eta osaketako objektuekin duen elkarrekintza. Lehen aipatu dugun difrakzioaren fenomenoak, uhin batek eta objektu batek elkarri eragiten diotenean gertatua, uhinen berezko fenomeno berezi bat eragiten du: uhin-fronte bat ezin da mugarik gabe lokalizatu edo harrapatu. Uhin batek —dagokion uhin-luzerarekin (kolorea)— eta materiak elkarri eragiten diotenean, uhin hori “hedatu” egiten da, eta ezin da lokalizatu bere uhin-luzera baino distantzia txikiagoan, 2. irudian eskematikoki azaltzen den bezala. Hizkera arruntean, uhina ezin da harrapatu bere uhin-luzera baino txikiagoa den tarte batean. Uhin bat lokalizatzeko muga horri difrakzio-muga deitzen zaio Fisikan. Uhin guztiek berezkoa duten muga horrek atalase bat ezartzen du, eta handik behera uhin bat ezin da lokalizatu; horrenbestez, uhin batek ez du balio D luzera baino tamaina txikiagoa duten objektuak bereizteko. D hori uhin-luzeraren mende dago (honako ekuazio honen arabera: $D=\lambda/2NA$, non NA mikroskopia baten irekiera numerikoa den), 1873an Ernst Abbe-k ezarri zuen bezala. Bereizmen optikoaren balio-muga da, eta muga hori difrakzio-mugak ezartzen du.



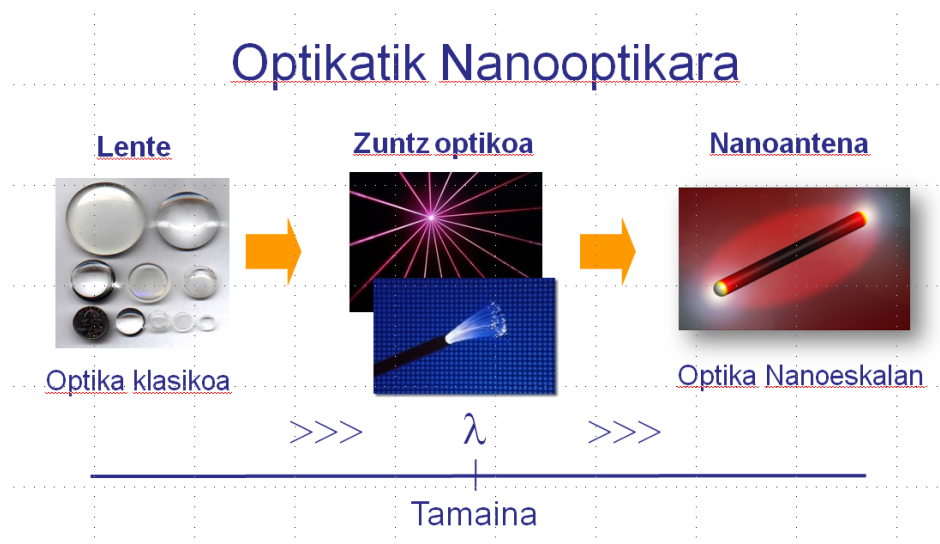
2. irudia: Uhin eta objektu korpuskularren arteko jokaera-desberdintasunak. Ezkerreko irudia: uhin bat “difraktatu” egiten da oztopo bat topatzen duenean; hala, uhin horren uhin-frontea barreiatu egiten da. Eskuineko irudia: korpuskulu batek, oztopo batekin talka egitean, zeharkatu egingo du edo ez du zeharkatuko.

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 sofistikatuenean zelula-osagaietako elementuak identifikatu eta bereiz ditzakete, elementu horien tamaina zenbait mikrometrotakoa baita; alabaina, mikroskopia optiko bat ez da gai mikra-erditik beherako tamaina duten objektuak argiztatzeko. Beraz, nano mundua, optika konbentzionalaren testuinguruan, argiaren helmenetik kanpo gelditzen da.

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-nolako eragina duen nanoteknologiak gure bizitza gobernatzen duten gailu elektroniko ia guztietan. 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 teknologien eskueran 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 elektroiplastaren edo “gainazal-plasmoien” 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. Fenomeno hori elektroikitzikapen 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 nanoeskan jaso eta igortzen baitute, eta, horrenbestez, nanomundua argizatzen duten nanolinterna gisa jokatzen dute (ikus 3. irudia). Nanopartikulen plasmoei esker argia difrakzio-mugaren azpitik harrapatzeko aukera berri horrek bidea ematen du hainbat aplikazio teknologiko garatzeko. Jarraian, aplikazio horietako batzuk zehazten dira.



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 (λ) murriztea.

Nanooptikaren aplikazioak

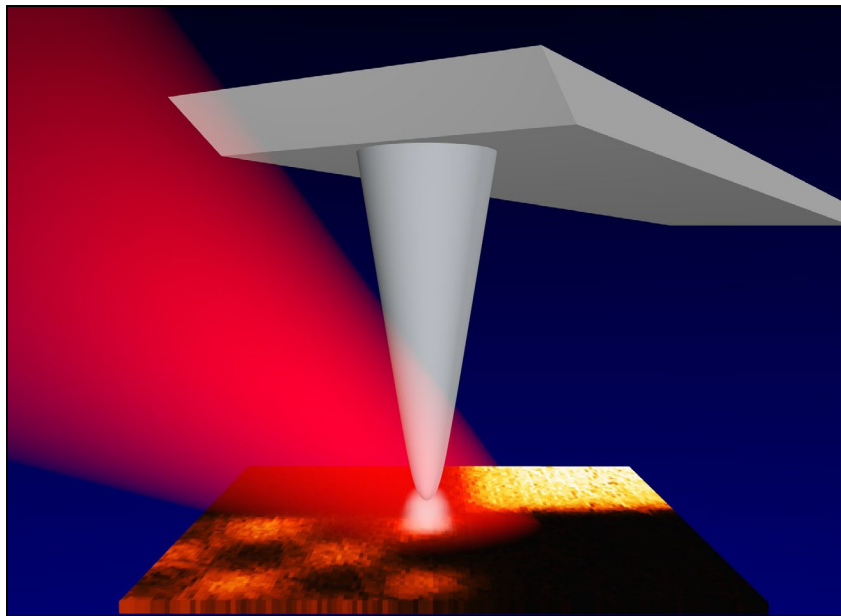
Gehiegi sakondu gabe, eta modu argigarri batean, nanooptikak eragin teknologiko handia izan dezakeen eremu batzuk aipatuko ditugu. Eremu horiek oinarritzko erronka sozialei erantzuteko promesa sendoak dira. Nanooptikaren egungo errealitatea ahalbidetu duten mugarri teknologikoen azken erdiespenak dituzte oinarri. Nanooptikak eremu hauetan izan ditu jarduera eta lorpen nabarmenenak:

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

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

Nanoskopia optikoa

Sarreran esan den bezala, difrakzio-mugak eragotzi egiten du argi ikusgaiarekin mikra-ereditik beherako objektuak eta egiturak bereiztea; alabaina, nanoantena optikoak erabilita, nanoegitura metaliko bat eraiki daiteke argia nanoeskalan lokalizatzeko. Nanoegitura hori nanomundua argiztatzeko eta bereizteko nanolinterna gisa erabil dezakegu. Egitura hori kono formako punta metaliko bat izan daiteke. Argiak punta horri erasoko dio. Nanopunta horretako elektroiak gai dira argia punta horretan harrapatzeko; hala, punta horrek 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 inguruneen ezaugarriak. Ahalmen horren adibide bat 4. irudian erakusten da. 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 lokalizatzear 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 optikoek ez baitute difrakzio-mugarik. Ahalmen horri esker, fabrikazio industrialeko prozesuetan kalitate-kontrolak egiteko metodo optikoak gara daitezke, besteak beste.

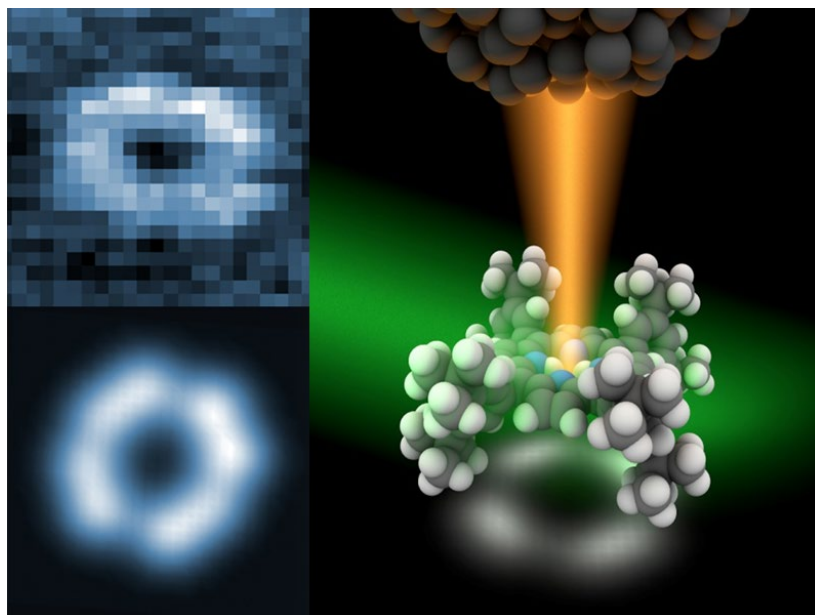


4. irudia: Gainazal baten nanoskopia optikoa. Nanopunta metaliko batek argia harrapa dezake bere muturrean, punta hori argi sorta batekin erasotzen denean. Nanopunta horrek nanolinterna gisa funtzionatzen du; hala, punta horrekin material bat ekortzean, lagin horren irudi optiko bat lortuko dugu, eta irudi horrek bereizmen nanometrikoa izango du.

Espektroskopia molekularra

Objektu bati buruzko informazio optikoa nanoeskalan lortzeko aukera material organikoetan ere aplikatu da; molekula organikoetan, zehazki. Kasu honetan, irudi optikoaren informazioa eta informazio espektroskopikoa konbinatu dira. Molekula edo material baten espektroskopia material horrek uhin-

luzera (kolore) desberdinen aurrean ematen duen erantzun optikoa da (materialak itzultzen duen argia). Hala, material horrek igorritako uhin-luzera jakin batzuk (piko espektroskopikoak) atzeman daitezke, eta, haien bidez, molekula edo material hori unibokoki identifikatzen da. Nanoeskalan egiten den espektroskopia optikoari esker, molekula bat ikustez gain, molekula hori anbiguotasunik gabe identifika daiteke, molekula horren hatz-marka espektroskopikoei esker. Halako teknologiei esker, substantzia baten kantitate oso txikiak detektatzen dituzten sentsoareak gara daitezke; horrek eragin handia du hainbat erronkatan, besteak beste, segurtasunean (lehergailuak, substantzia toxikoak) eta osasunean (antigenoen eta substantzia kaltegarrien detekzioa).

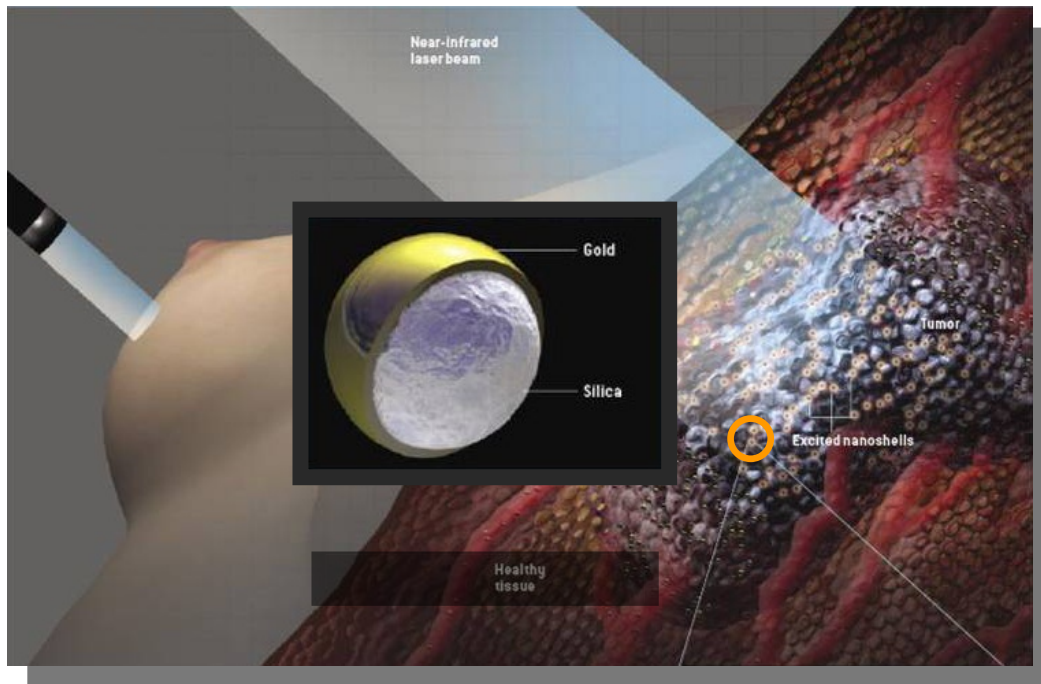


5. irudia: Goian ezkerraldean: molekula bakar baten irudi optikoa. Behean eskuinean: irudiaren kalkulua, tunel-efektuko mikroskopia baten argiztapen-baldintzen arabera. Irudi handia: nanoantena batek argiztatutako molekularen eskema.

Termoterapia onkologikoa

Nanopartikulek edo antena optikoek, argia harrapatzean, nanomundua argiztatzen dute. Baina, horrez gain, inguruko tenperatura igotzen dute, energia kontzentratuz. Nanopartikula batek argia harrapatzen duenean, haren gertuko inguruneke tenperatura gradu batzuk altxatzen da. Efektu hori terapia termiko gisa erabili ahal izango litzateke, baldin eta nanopartikula horiek tumore-zeluletara 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 ahalbidetzen baitute. Duela zenbait urtetatik hona, Estatu Batuetako puntako taldeek (Houston-eko Rice University) biobateragarriak diren urrezko nanopartikulak diseinatzea lortu dute. Nanopartikula horiek berezko iragazkortasunez itsasten zaizkie zelula onkologikoei —harrotasun handiagoa baitute— inokulazio sistemikotik ordu gutxira. Nanopartikula horiek infragorriari dagokion uhin-luzeran (gorria) erresonatzeko diseinatzen dira; uhin-luzera horretan, giza gorputzak gardentasun-leiho bat du. Tumorearen eremu hori argi sorta kaltegabe batekin erasotzean, nanopartikulek argi hori jaso, eta beren

gainazalean lokalizatzen dute, eta gertuko inguru guztia berotzen. Nanopartikuletatik gertu dauden tumore-zelulak tenperaturaren igoera lokalaren eraginez hiltzen dira, modu ez-inbaditzailean. Urte luzez nanopartikulen toxikotasuna monitorizatzen jardun ondoren, etorkizun handiko emaitza klinikoak lortu dira, besteak beste, prostatako minbiziaren ezabaketan, nanopartikulak tumore-eremuan behar bezala lokalizatzen direnean. Beste minbizi lokalizatu mota batzuekin ere —esate baterako, bularreko edo garuneko minbiziekin—, gauza bera egiten ari dira.



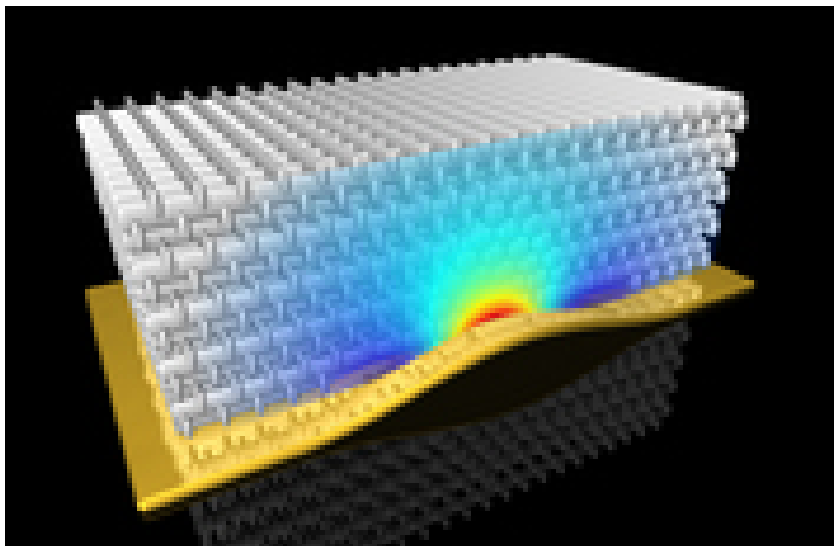
6. irudia: Tumore-eremu batean kokatutako urrezko nanopartikulak. Nanopartikula horiek argi sorta kaltegabe batekin erasotzen dira; hala, eremua berotu egiten da, eta tumore-zelulak ekintza termiko bidez desagerrarazten dira.

Energiaren metaketa

Nanoantena metalikoek 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. Nanoantena optikoek argia lokalizatzeko duten ahalmenari esker, hurbileko eroale bateko kargak azkarrago eta eraginkortasun handiagoz bereiz daitezke. 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 energia alternatiboak garatzeko.

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 metalikoein sare nanometrikoak eratu daitezke, eta material artifizialak edo nanomaterialak sortu. Nanomaterial horien osagaiak hainbat forma eta tamainako nanoantena izango dira. Aukeratutako nanoantena optikoak elkartuta, eta haiek sare espazial batean antolatuta, ezaugarri berriak dituzten material artifizialak edo “metamaterialak” sor daitezke. Ezaugarri horiek ezingo lirateke lortu material naturaletan. Diseinu egoki baten bidez, errefrakzio-indize negatiboa duten material artifizialak lor daitezke. Material horiek material naturalek egingo luketenaren aurkako noranzkoan desbideratzen dute argia; efektu optiko harrigarriak sortzen dira hala. Baina, agian, metamaterial-geruzez osatutako ikusezintasun-mantua da ezohiko material horien ezaugarriek ahalbidetutako lorpenik efektista 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 (ikus 7. irudia). 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: Metamaterial-geruza bat. Geruza horrekin ikusezintasun-mantu bat sortzen da, eta azpiko objektua ez da ikusten, nanoantenez osatutako material artifizialezko geruza horrek dituen ezohiko ezaugarri optikoei esker.

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 optikotik formatu elektrikorako bihurketa egin 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 optikoek aukera ematen dute izaera desberdineko informazio optikoen artean interfaz alternatibo azkar eta zuzen gisa jarduteko. Xedea elektroien prozesamendu motela ekiditea izango litzateke, eta erabat optikoa den konputazioa garatzea. Konputazio horretan, nanoegiturek zuzenean sortu, manipulatu, prozesatu, igorri eta jasoko lituzkete 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 optikoek paper garrantzitsua izango lukete transduktore eta interfaze gisa.

Ondorioa

Egungo egoera teknologikoan, nanooptikak sekulako aukerak dakartza. Nanooptika funtsezko teknologia da informazio, komunikazio, material aurreratu, osasun 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 txikia egiten denean garapen teknologikoa handi egiten da, eta itsasargi berri bat sortzen da gizakiaren ongizatea eta bizi-kalitatea hobetzeko.