

La llum

Enigmes, mites i tecnologia

Sergi Gallego Rico (ed.)



La llum

Enigmes, mites i tecnologia

Sergi Gallego (ed.)

La llum

Enigmes, mites i tecnologia

PUBLICACIONS DE LA UNIVERSITAT D'ALACANT

Comité editorial:

Amparo Navarro
Juan Mora
Josep Forcadell
Vicente Navarro

Publicacions de la Universitat d'Alacant
03690 Sant Vicent del Raspeig
publicacions@ua.es
<https://publicacions.ua.es>
Telèfon: 965 903 480

© els autors, 2021
© d'aquesta edició: Universitat d'Alacant
© de les imatges: els autors

ISBN: 978-84-9717-748-1
Dipòsit legal: A 167-2021

Foto de coberta: A. Fahmy (Unsplash)
Disseny de coberta: candela ink
Editor: Vicente Navarro Bertomeu
Edició de textos i correcció de proves: Xavier Casero Belda
Traduccions: Xavier Casero Belda
Composició: Marten Kwinkelenberg
Impressió i enquadernació:
Quinta Impresión

Reservats tots els drets. Qualsevol forma de reproducció, distribució, comunicació pública o transformació d'aquesta obra només pot ser realitzada amb l'autorització dels seus titulars, tret de les excepcions previstes per la llei. Adreceu-vos a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necessiteu fotocopiar o escanejar cap fragment d'aquesta obra.

Índex

	Introducció: conviure amb la llum	9
	<i>Sergi Gallego Rico</i>	
	La llum en els espais de culte de l'antiguitat	13
	<i>Daniel Iborra i Pellín</i>	
	L'observació del nostre cel	27
	<i>Guillermo Bernabeu Pastor, Rubén García Lozano, José Joaquín Rodes Roca, José Miguel Torrejón Vázquez i María Martínez Chicharro</i>	
	La llum en l'origen de la vida	47
	<i>Carles Martín Cantarino</i>	
	La visió humana	59
	<i>Valentín Viqueira Pérez</i>	
	Un món de colors	67
	<i>Dolores de Fez Saiz</i>	
	Alguns efectes òptics de la vida quotidiana	73
	<i>Sergi Gallego Rico</i>	
	Instruments òptics	83
	<i>Marta Morales Vidal i Inmaculada Pascual Villalobos</i>	
	L'aprofitament energètic de la radiació solar	91
	<i>Jorge Francés Monllor i Sergi Gallego Rico</i>	
	La llum artificial	103
	<i>Cristian Neipp López</i>	
	El làser i les seues múltiples aplicacions	111
	<i>Marta Morales Vidal i Eva M. Calzado</i>	

	La difracció: quan les ones troben obstacles	121
	<i>Andrés Márquez Ruiz</i>	
	L'holografia: molt més que imatges tridimensionals	127
	<i>Augusto Beléndez Vázquez</i>	
	La fibra òptica	139
	<i>Daniel Puerto García</i>	
	La visió artificial	147
	<i>José García Rodríguez i Miguel Ángel Cazorla</i>	
	Més informació	157

Introducció: conviure amb la llum

Sergi Gallego Rico

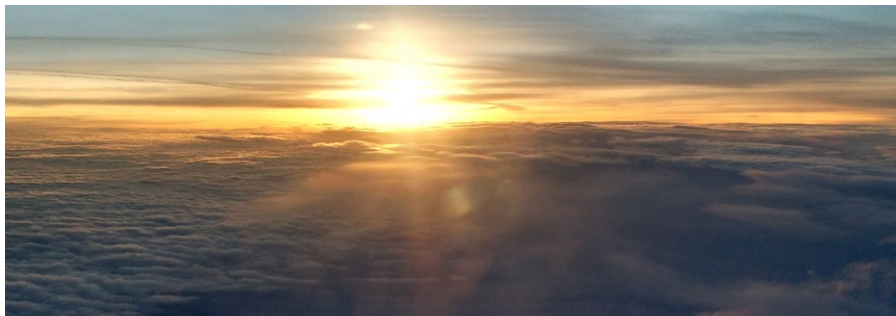
Dept. Física, Enginyeria de Sistemes i Teoria del Senyal

Si haguérem d'explicar què és la llum, potser una de les primeres coses que ens vindrien a la ment seria el Sol, amb la seua llum groga potent, engegadora. Probablement perquè la del Sol és la llum amb què estem més habituats a tractar. Hem evolucionat durant centenars de milers d'anys convivint amb aquesta font de llum, que tant ens ha fascinat des de l'antiguitat.

Els éssers humans podem percebre la llum a través de dos òrgans: els ulls i la pell, és a dir, amb els sentits de la vista i el tacte. Podria ser que a algú li resulte sorprenent que puguem detectar la llum amb la pell, però la veritat és que a través del tacte podem percebre fins i tot llum no visible. De fet, la llum infraroja no la podem veure, però sí que podem sentir-ne l'escalfor a la pell.

La vista és el sentit predominant entre els diferents pobles i cultures de la Terra, tal com posen de manifest els estudis actuals. Podríem dir que és el sentit universal: més del 60 % del lèxic relacionat amb els sentits correspon a la vista. A més a més, la meitat del nostre cervell està dedicada al processament d'informació visual. Amb això compten actualment les grans companyies, que en els seus productes donen prioritat a la imatge sobre moltes altres qualitats. Amb tot, centrar-nos en la imatge seria tancar molt el camp de visió, per més important que siga i haja sigut.

Els humans sentim una atàvica fascinació davant de diferents fenòmens òptics com l'arc de Sant Martí, el parheli o una posta de sol, però la importància de la llum va molt més enllà



Vista del sol naixent per damunt dels núvols.

de l'estètica. De fet, té una importància vital. La llum, que no és altra cosa que energia en forma d'ones electromagnètiques que ens arriben majoritàriament del Sol –tot i que, en menor quantia, també ens n'arriben d'altres estels més llunyans–, és la responsable que haja pogut aparéixer la vida a la Terra, i en l'actualitat tenim la capacitat d'entendre-la i manipular-la per a utilitzar-la en multitud d'aplicacions que milloren la nostra qualitat de vida. A més, ens ajudarà a fer front a alguns dels reptes que tenim com a societat.

L'ONU va declarar el 2015 l'Any Internacional de la Llum i de les Tecnologies Òptiques, amb l'objectiu de promoure la conscienciació sobre la seua importància en les activitats humanes. La llum és a l'origen de la vida, ha inspirat artistes, arquitectes, escriptors, etc., i és fonamental no ja sols en fotografia, sinó també en cinema o teatre, perquè no hi ha dubte que condiciona la resposta emocional de l'audiència. I és que la llum és un espectacle per si mateixa, com per exemple en els castells de focs



Castell de focs artificials. Foto: F. Miró.

artificials. Que ens ho diguen als valencians, que som un poble fascinat pel foc!

Si mirem al nostre voltant podrem detectar la presència de nombroses aplicacions de la llum que han revolucionat la nostra societat a través de la ciència, l'enginyeria, les comunicacions, la medicina, l'art, l'arquitectura i l'oci. Des de la invenció del làser, un dels instruments científics més versàtils, l'òptica i la fotònica satisfan les necessitats de la societat en molts vessants: donen accés a la informació, faciliten les comunicacions, ajuden a preservar el patrimoni, promouen el desenvolupament sostenible i contribueixen a la salut i al benestar social. Aquestes tecnologies aporten solucions en camps com l'energia, l'educació, l'agricultura, el medi ambient i la sanitat. Tanmateix, de vegades l'absència de llum també és important: la contaminació lumínica és un problema, perquè impedeix observar l'espai, té conseqüències en la vida dels animals... a més de ser un malbaratament d'energia.

És indubtable que l'estudi de la llum i les seues tecnologies s'ha convertit en una disciplina transversal clau de la ciència i la tecnologia del segle XXI. Així com el segle XX s'ha denominat de vegades el segle de l'electrònica, tal vegada el segle XXI serà conegut com el segle de la llum, gràcies als avanços de la fotònica i l'òptica dels darrers cinquanta anys. Per això, l'objectiu d'aquest llibre és ajudar que el lector prenga consciència de la importància de la llum en la nostra existència.

L'estudi de la llum i la recerca sobre la seua naturalesa va ser el desencadenant, al començament del segle XX, d'una revolució en la física anomenada física quàntica. De fet, l'any 1917 Albert Einstein va assegurar que reflexionaria

sobre la llum durant la resta de la seua vida. Hui en dia encara no podem definir d'una manera simple i clara què és la llum, però sí que disposem de models que ens ajuden a entendre i predir el seu comportament en quasi tots els casos. Ara bé, aquest llibre no pretén explorar sinuosos viarany metafísics. El plantejament és molt més senzill. La llum i les seues tecnologies formen part, d'una manera transversal, de l'àmbit de recerca de nombrosos grups de la Universitat d'Alacant. Aquest llibre té dos objectius principals. El primer és mostrar la importància que ha tingut i té la llum per als humans, centrant la perspectiva, quan cal, en el nostre entorn geogràfic més immediat, el de les comarques meridionals valencianes. El segon, exposar que la llum vertebrava nombroses recerques i aplicacions d'aquesta Universitat. Així, al llarg dels capítols que conformen el llibre intentarem apropar el lector a la importància de la llum i explicar algunes de les aplicacions en què treballem.

Començarem explicant la importància que tenia la llum per als primers assentaments establits en aquesta part del territori i com interpretaven aquells individus el cel que veien cada dia. Immediatament, la pregunta que sorgeix és: com és el cel que veiem des de l'Alacantí i comarques veïnes? Aquesta qüestió ens durà a fer un recorregut pel nostre cel, en el qual parlarem de la contaminació lumínica, però també de com la llum ajudava a mesurar el temps a través dels rellotges de sol, uns instruments que actualment són objecte d'espectacular



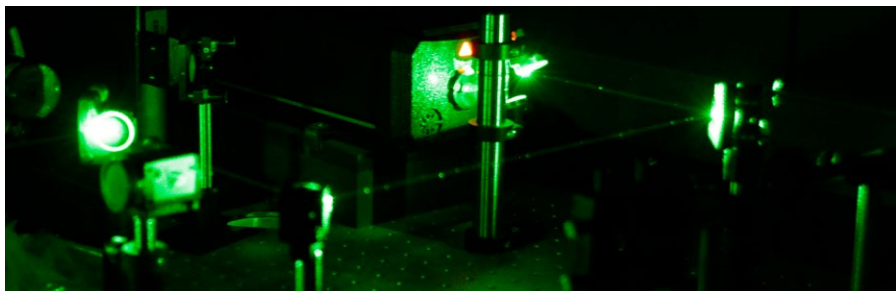
Interior de la casa Batlló (Barcelona). Foto: Laureà.

homenatge a la població d'Otos, a la Vall d'Albaida.

D'altra banda, la llum és vida. Sense llum les plantes no creixerien i els animals no tindrien què menjar. De fet, sense llum no s'hauria pogut desenvolupar vida a la Terra. Si de sobte tot es fera fosc, la vida no hi podria continuar gaire temps. D'aquesta manera, l'aparició i el desenvolupament de la vida estan estretament lligats a la llum; en altres paraules, en depenem directament.

A continuació intentarem explicar de quina manera el nostre sentit de la vista s'ha adaptat a conviure amb la llum. Gràcies a aquest sentit, els matisos d'aquesta llum es reproduïxen al nostre cervell en forma de colors, i resulta interessant com es poden entendre els colors dins del nostre sistema visual. Quan ja coneguem de quins detectors disposem, explicarem per què ens meravellen alguns fenòmens quotidians com l'arc de Sant Martí o la fata morgana, encara que moltes vegades no tinguem clar per què es produeixen.

Mostrarem també el funcionament d'alguns instruments òptics clàssics que potser mai ens hem preguntat com



Experiment amb làser. Foto: E. M. Calzado.

funcionen. Tot seguit tractarem un fet fonamental, que és la relació entre la llum i l'energia. Tenim ben present que la qüestió energètica reclama l'atenció de tots, a causa del canvi climàtic. Per fortuna, els avanços tecnològics ens proporcionen noves formes d'aprofitament de l'energia que resulten més sostenibles. És per això que dediquem dos capítols a aquesta temàtica: en un expliquem com podem transformar la llum del sol en energia elèctrica i en l'altre analitzem la manera en què ens il·luminem i veiem per què la nova tecnologia led ens permet fer-ho amb més eficiència.

D'altra banda, el làser és una tecnologia que va revolucionar l'ús de la llum, i per això dedicarem un capítol a aquesta eina i a algunes de les seues aplicacions. Amb el làser ha augmentat molt el control de la llum, i uns dels aspectes relacionats amb aquestes fonts de llum i que mostra el seu comportament ondulatori és la difracció, a la qual també dedicarem un capítol, atés que la majoria d'aplicacions tecnològiques utilitzen la teoria ondulatoria. Ja ficats en la difracció de la llum i la interferència, ens endinsarem en l'holografia, perquè aquesta tècnica de reconstrucció del tridimensional combina ciència, tecnologia i art. A més a més, resulta que el primer holograma

que es va crear a Espanya va ser a la Universitat d'Alacant, que fins i tot va arribar a tindre un Centre d'Holografia.

Sense deixar les aplicacions tecnològiques que més impacte tenen al nostre món quotidià, exposarem com podem guiar la llum. Aquest fet ens permet transmetre informació de la manera més ràpida possible, com també va predir Albert Einstein. En aquest sentit podem dir que, sense cap mena de dubte, les comunicacions òptiques han canviat el concepte d'immediatesa en les comunicacions a milers de quilòmetres de distància.

Per últim, mirarem cap al futur, un món poblat de robots i d'intel·ligència artificial. La Universitat d'Alacant va ser pionera en aquest aspecte, amb el desenvolupament d'un grau en Robòtica, i un dels aspectes més importants en aquest àmbit és la visió per computador: com els aparells dissenyats per les persones són capaços de veure el seu entorn i prendre les decisions adients.

Inevitablement, hi ha temes o perspectives que, per espai i temps, han quedat fora d'aquest llibre, però, com apuntàvem, hem procurat seguir com a eix vertebrador la investigació que actualment es du a terme a la Universitat d'Alacant.

La llum en els espais de culte de l'antiguitat

Daniel Iborra i Pellín

Mestre

Des de temps immemorial, i fins que la humanitat comprengué el moviment dels astres, aquests van ser sovint venerats (del llatí *Veneris*, nom del planeta Venus) com a divinitats. La fascinació pels principals astres del cel ha perviscut fins al present, i, com veurem, també al sud del País Valencià trobem exemples d'astronomia cultural que

comprenen des de la prehistòria fins l'edat moderna.

Per a aquest article hem seleccionat les alineacions solars més rellevants pel que fa a astronomia cultural; per motius d'espai, hem deixat fora els possibles cultes a la Lluna, Venus o altres astres. Partirem de les més recents i anirem avançant cap al passat, allà on



El Sol alineat amb l'Arc de Santa Llúcia, durant el solstici d'hivern. Foto: D. Iborra.

és més difícil determinar la intencionalitat de les alineacions o si es deuen a la casualitat.

Al mateix temps, presentem diverses efemèrides astronòmiques inèdites de les coves santuari ibèriques de la Moneda (Ibi), dels Pilars (Agres) i de les Dones (Busot), així com les insolacions de les coves sepulcral prehistòriques del Cantal (Biar) i la Pastora (Alcoi).

Alineació solar de Santa Llúcia (Penàguila)

Es tracta d'una alineació solar espectacular, de la qual ja es podia llegir una descripció en la Crònica de Martí de Viciana de 1563:

Junto a la villa ay una peña naturalmente hecha a manera de puente o arco, a la qual los de la tierra la nombran la puente de Sancta Lucía, y la causa es que el día de Sancta Lucía y dos días antes, que son tres días, y no en ningunos otros, los rayos del sol pasan por baxo de la puente y dan en un rincón de la plaça de Penàguila, y es infalible en cada un año de memoria de los hombre que oy biven.

Aquesta alineació pot datar-se, segons va demostrar l'astrònom José Lull, en les dècades immediatament posteriors a la conquesta cristiana de Penàguila, és a dir, a finals del segle XIII. Lull va observar que l'alineació s'esdevenia durant el solstici d'hivern (21 de desembre, encara que és visible pràcticament tot el mes), i, en canvi, la tradició mantenia que l'observació es produïa el 13 de desembre, dia de Santa Llúcia. Per causa d'un xicotet error en el calendari julià, hi havia un desfasament acumulat tan gran en l'època de Martí de Viciana que el 1582 s'hagueren d'eliminar deu

dies per tal de fer coincidir el calendari amb els solsticis i equinoccis reals. El refrany «Per Santa Llúcia, un pas de puça» –que representa que el 13 de desembre ja allarga el dia– per força ha de ser anterior a la reforma de 1582, ja que en l'actualitat per Santa Llúcia els dies encara van reduint-se. Mitjançant un estudi paremiològic i creuant-lo amb dades astronòmiques, Lull pogué determinar l'antiguitat d'aquesta espectacular efemèride solar.

Gràcies al seu estudi s'ha recuperat la tradició d'observar l'alineació des d'un carrer dels afores de Penàguila, ja que el canvi de les antigues muralles per cases més altes ja no permet admirar l'esdeveniment astronòmic des de la plaça de l'Església, lloc on acudien els penaguilencs en el segle XVI, segons Martí de Viciana.

Aquesta tradició estava associada a un ritu pagà de la fertilitat, ja que les dones que volien quedar-se prenyades havien de ser il·luminades pel Sol durant l'alineació, segons s'explica al poble, fet que resultaria indiciari que la celebració d'aquesta efemèride solsticial podria ser molt més antiga que la carta pobla cristiana, atorgada per Pere III l'any 1278.

Sant Francesc i el Sol de la Foradada (vall de Gallinera)

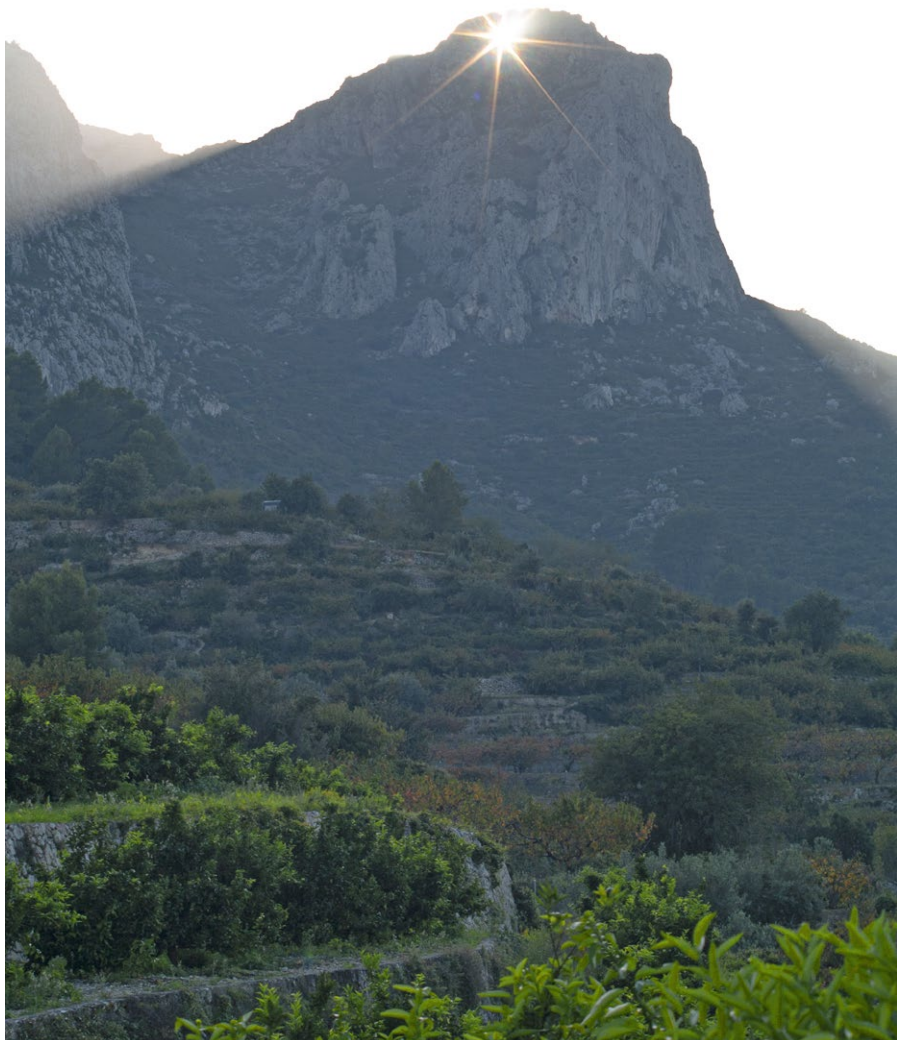
Una altra alineació solar de cronologia i característiques similars és la de la serra Foradada, a la vall de Gallinera. Gràcies també als treballs de Lull s'ha recuperat aquesta tradició, que es remunta com a mínim a l'any 1611.

Aquell any, just després de l'expulsió dels moriscos que habitaven la

zona, es repoblà amb 150 famílies que venien de Mallorca. Com menciona el frare franciscà Antonio Panes, en aquell mateix moment es construeix un convent a Benitaia, «porque con la asistencia de los religiosos se cultivasse

espiritualmente aquel valle, rudo entonces en la disciplina christiana y recién poblada de gente forastera».

En aquella crònica, de 1620, es pot trobar la referència a aquesta efemèride astronòmica:



Alineació solar de la Foradada des del lloc exacte on es trobava el convent. Foto: D. Iborra.



El raig de sol penetra en l'ermita i il·lumina la cara de sant Antoni, a Bocairent, el dia de la seua onomàstica. Fotos: J. Olivares.

El sitio donde está el convento es en la ladera y falda de un monte el qual en invierno, interpuesta su mucha altura, le impide el sol, que apenas debe de gozar tres horas, pero es de notar una cosa que no parece carezer de motivo piadoso, y es que el día quatro de octubre (que es el de la fiesta de N. P. San Francisco), entrando el sol por una peña que está horadada, hiere directamente en nuestro convento, y con su luz y resplandor le alegra, como que no han podido sufrir sus rayos que en tan festivo día se le oponga el monte, y assí le penetran y le taladran.

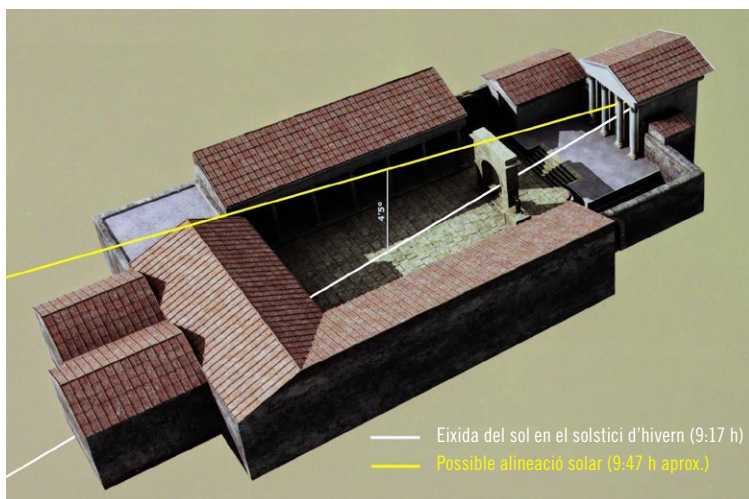
En l'actualitat, l'observació d'aquesta alineació solar continua sent el 4 d'octubre, dia de Sant Francesc, a les 18.20 h, i només dura un parell de minuts. Per la simetria del calendari respecte als solsticis, també es pot gaudir del fenomen el 9 de març a les 17.42 h.

És molt probable, encara que impossible de saber per la destrucció del convent, que l'efecte produït pels raigs de sol fora similar al que s'esdevé en l'ermita de Sant Antoni de Bocairent, on en el dia de la seua onomàstica (17 de gener) la llum penetra per una obertura

circular i il·lumina durant uns minuts la cara del sant.

El solstici d'hivern a Lucentum (Alacant)

La ciutat romana de Lucentum, ubicada als afores de l'actual Alacant, tingué la seua època d'esplendor durant els segles I a. C. i I d. C. Segons indiquen les evidències, el temple, ubicat a la part alta del fòrum, estava orientat a l'eixida del Sol durant el solstici d'hivern. Ara bé, convé indicar que la graduació no és exacta per a aquella època concreta: l'espai sacre apunta a uns $124^{\circ} \pm 1^{\circ}$, quan el Sol eixia sobre els 120° . Però era precisament aquesta diferència el que permetria que l'alineació solar fora observable uns minuts després de l'eixida del Sol en el dia més curt de l'any, quan l'elevació de l'astre salvava l'alçada de les muralles de la ciutat romana i dels edificis del fòrum. Malauradament, les urbanitzacions modernes n'impedeixen l'observació en l'actualitat, de manera que només podem reproduir aquesta escena amb ordinador.



Simulació de la incidència dels raigs de sol durant el solstici d'hivern en el temple romà de Lucentum. Infografia: J. Molina, modificada per l'autor.

En època romana, entre el 17 i el 24 de desembre se celebraven les Saturnals, uns dies de festa dedicats al déu de l'agricultura, que concloïen el 25 amb el conegut com a *dies natali Solis invicti* (dia del naixement del Sol invicte). La nit del 24 de desembre s'encenien ciris i s'intercanviaven regals, i un dels dolços de les Saturnals era el tortell, que encara hui es continua menjant. És evident, per tant, que es tracta de l'origen de les actuals festes de Nadal.

L'escriptor Lluçà de Samòsata (segle II) va descriure com era aquesta celebració:

Puc estar begut, cridar, jugar a daus, fer un banquet per als servents, cantar despullat. (...) S'ha d'enviar els regals als amics abans de la posta de sol. (...) Tots, rics i pobres, deuen ser tractats amb igualtat.

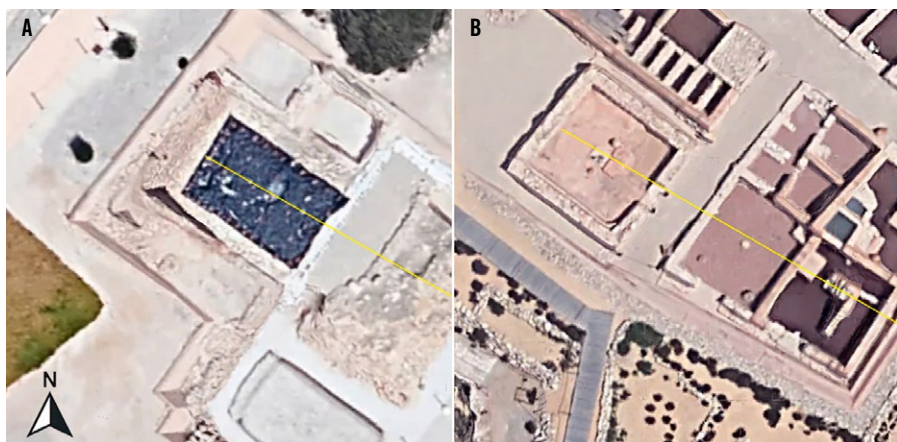
L'orientació cap el solstici d'hivern és comuna en un 25 % de les ciutats

romanes de la Península (la tercera preferència romana quant a orientació) i, igual que el temple, el conjunt del fòrum de Lucentum s'orienta a uns 125° 15'. Per tant, sembla evident que els habitants de la ciutat coneixien i celebraven la nit més llarga de l'any, molt probablement en associació amb la festa romana de les Saturnals.

El temple B de la Illeta dels Banyets (el Campello)

Prop d'aquest santuari (a només nou quilòmetres en línia recta) es troba el conegut com a temple B de la Illeta dels Banyets, al Campello.

La cronologia del temple és ibèrica i, per tant, anterior a l'edifici cultural de Lucentum, però tots dos presenten una idèntica orientació, cosa que fa pensar en una absorció en època romana de cultes autòctons pretèrits. A més, cal



Temples de Lucentum (A) i Illa dels Banyets (B). Les línies grogues indiquen el primer raig de sol en el solstici d'hivern. Imatges: Google Earth.

tindre en compte que al tossal de Manises hi havia un assentament previ d'època púnica, de manera que l'espai sagrat podria haver-se construït en el mateix lloc que l'anterior.

El temple B també està alineat amb el Sol uns minuts després de l'eixida el dia més curt de l'any. Es pot intuir que l'efecte que es pretenia era il·luminar algun punt dins el santuari. Per tant, no serien alineacions simbòliques amb els astres, sinó que es buscava la teofania, és a dir, la manifestació de la divinitat en forma de raig de sol.

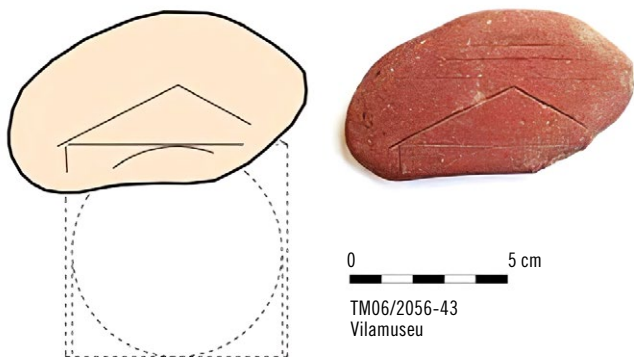
L'equinocci a la Malladeta (la Vila Joiosa)

A les comarques alacantines, la cultura més estudiada pel que fa a l'arqueoastronomia és la ibèrica, sobretot pels treballs de l'astrofísic César Esteban. D'un total de 19 jaciments analitzats per aquest autor a la zona d'Alacant i províncies limítrofes, un 80 % presenten dades astronòmiques rellevants.

Segons Esteban, l'orientació preferida pels ibers (més de la meitat dels casos) és cap a l'eixida del Sol en els dies d'equinocci, és a dir cap a l'est. La resta de jaciments estan orientats a parts iguals cap a l'eixida del Sol en el solstici d'hivern o un dels extrems del planeta Venus en el seu cicle de huit anys.

Un exemple prou clar de la relació entre els equinoccis i la religió ibèrica és el santuari de la Malladeta (la Vila Joiosa). L'assentament, ocupat des del segle IV a. C. i abandonat l'any 25 d. C. aproximadament, conservarà durant una cinquantena d'anys, al cim del turó, únicament l'espai sagrat. Gràcies a una ceràmica apareguda recentment, podem imaginar l'estructura de l'edifici.

Per a deixar lloc als exvots nous, era habitual traure els vells del santuari. Així, la ceràmica acabà en la platja de la Malladeta, on les ones li van donar aparença de cudol. En el mateix segle I, algú va tornar a dur la peça al santuari, i de nou fou llençada pel vessant del turó, on va quedar dipositada durant



Grafit del santuari de la Malladeta. Imatge: Vilamuseu.

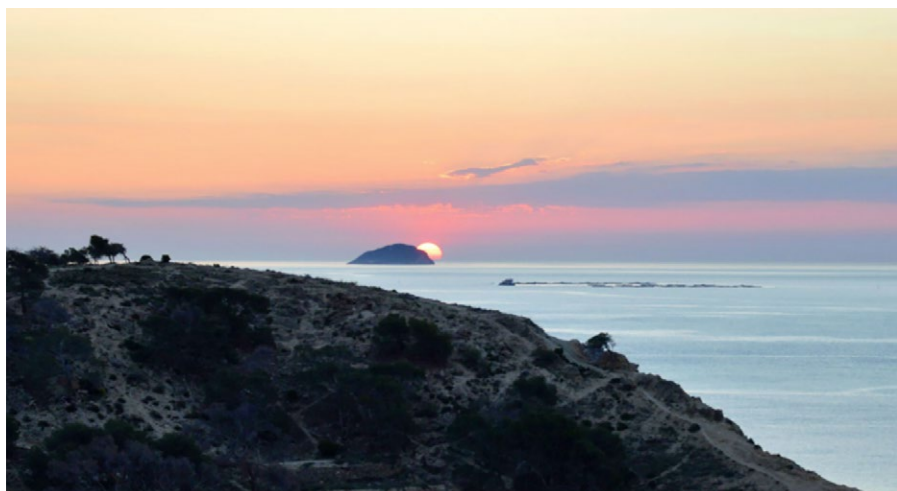
dos mil anys fins que va ser recuperada pels arqueòlegs.

Segons comprovaren César Esteban i Antonio Espinosa, des del santuari de la Malladeta es veu eixir el Sol alineat amb l'illa de Benidorm en el dia intermedi entre els solsticis. L'efecte visual és espectacular i suposa un altre indici a favor de la hipòtesi que els ibers no solament coneixien els dies especials de

l'any, sinó que, d'alguna manera que encara desconexim, també els celebraven.

El marcador solsticial de la cova de la Moneda (Ibi)

De les vora 900 cavitats i coves catalogades a les comarques d'Alacant, només unes poques (menys d'una desena) van



El Sol ix alineat amb l'illa de Benidorm en els equinoccis. Foto: Vilamuseu.



Efecte del sol sobre la roca d'entrada a la cova de la Moneda a les 12.00 h, hora solar, del solstici d'hivern. Foto: D. Iborra.

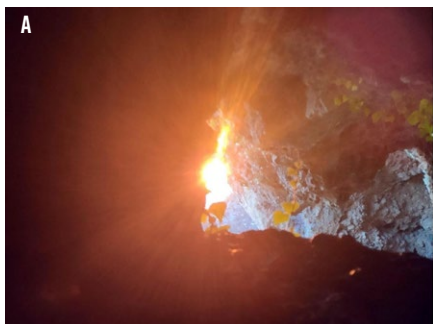
ser utilitzades en època ibèrica com a espais sagrats de forma intensa i prolongada. És evident que l'orientació natural d'una cavitat és fruit de l'evolució geològica, però llavors per què algunes coves són elegides com a santuari i altres no? Actualment ens trobem immersos en un procés de medicació i registre de les efemèrides astronòmiques visibles en aquests espais sacres amb l'objectiu de verificar si l'estadística és favorable a la relació dels santuaris amb l'astronomia.

La cova de la Moneda (Ibi), a l'alt de Bischoi, va ser usada com a santuari en època ibèrica, durant el segle V i IV a. C., tot i que també s'hi han trobat materials anteriors. A més de la sala principal, hi ha dues cavitats contigües en què no s'ha recuperat cap material. Aquest fet podria indicar que l'elecció d'aquell espai no hauria sigut casual.

L'accés a la cova es veu presidit per una roca d'uns 68 cm d'alçada i

108 cm d'ample que sembla donar la benvinguda al recinte. En paraules de l'historiador Julio Alcalde, «la boca está interrumpida por una curiosa formación pétrea que, a modo de impassible guardián rocoso, parece vigilar el santuario ibérico». Aquesta formació pètria apareix perfectament alineada amb els raigs del Sol en el dia del solstici d'hivern, a les 12.00 h, hora solar. Si bé la roca es veu il·luminada des de mitjan novembre fins al mes de febrer, serà el dia més curt de l'any quan rebrà la insolació més llarga i a la màxima altura.

La nostra conclusió és que l'astronomia va tindre un paper fonamental per a l'elecció d'aquest espai com a santuari. El fet que aquesta siga l'única cavitat de les tres que formen el conjunt de la Moneda on s'aprecia un culte com a lloc sagrat reforça fermament la hipòtesi.



El Sol vist des de l'interior de la cova dels Pilars en l'eixida de l'astre en el solstici d'estiu (A) i efecte lumínic que provoca en una de les parets (B). Fotos: D. Iborra.

L'inici de l'estiu a la cova dels Pilars (Agres)

Al cor de la serra de Mariola, a Agres, es troba la cova dels Pilars, on aparegueren materials de gran qualitat, com per exemple una àmfora àtica i diverses peces d'orfebreria que indiquen que es tractava d'un santuari d'època ibèrica (segles V-II a. C.).

La seua orientació cap al nord impossibilita que la llum solar entre en la cavitat pràcticament en cap moment de l'any, però en el solstici d'estiu, just a l'eixida del Sol i durant uns deu minuts, els raigs penetren en l'estança principal i il·luminen un fragment de la paret.

L'efecte visual només es produeix durant pocs dies al voltant del solstici d'estiu, de manera que esdevé una mena de marcadore calendàric que bé podria haver justificat l'elecció de la cova dels Pilars pels ibèrics com a espai cerimonial, a més dels evidents motius territorials i viaris.

Un possible ritual equinoccial a la cova de les Dones (Busot)

En un barranc meridional de la serra del Cabeçó d'Or, al terme de Busot,

es troba la cova de les Dones, un altre santuari ibèric. En les galeries interiors aparegueren dipòsits d'ofrenes rituals (segles IV-I a. C.), i en la boca d'entrada s'havia excavat una séquia artificial que probablement servia per a canalitzar l'aigua que brollava de l'interior de la cavitat amb l'objectiu de poder utilitzar-la en algun tipus de ritual.

Poc abans de pondre's el Sol els dies d'equinocci, els seus raigs travessen un orifici natural en la paret oest de la cova i provoquen una insolació sobre



Els raigs de sol passen a través d'una obertura natural a la boca d'entrada de la cova de les Dones abans de la posta els dies d'equinocci.

Foto: D. Iborra.



Efecte de la insolació provocada per l'obertura natural de la cova de les Dones el 12 d'abril de 2019 i recorregut de la séquia artificial cap a l'exterior. Foto: D. Iborra.

el mur de l'entrada que dura menys de deu minuts. Tot i això, el fenomen també és observable durant els mesos anterior i posterior a l'equinocci, aproximadament; per tant, cal ser cautes amb aquesta efemèride astronòmica, perquè, a més, no illumina l'interior de la cavitat. És cert que es produeix a la vora de la cascada on desemboca la séquia artificial, de manera que podria haver tingut relació amb una possible cerimònia al voltant de l'aigua.



Terracota de l'Albufereta (Alacant) en què es veu representada una cova santuari ibèrica.

Foto: MARQ.

L'aparició d'una terracota en la necròpolis de l'Albufereta en la qual es representa una cova santuari sembla un indicador que els habitants de la costa visitaven la cova de les Dones per a celebrar els seus rituals. De totes les coves santuari de les comarques meridionals valencianes en què hem pogut fer mesuraments, aquesta és l'única amb una possible relació equinoccial. En la nostra opinió, l'orografia de la zona podria haver provocat aquest *unicum* pel que fa a orientació entre les coves santuari ibèriques de la zona, ja que en les muntanyes de l'interior seria possible triar entre diversos espais, però en la costa hauria sigut molt més difícil, per l'escassetat d'aquestes cavitats.

Un culte solar prehistòric a la cova del Cantal (Biar)?

Anteriors al període ibèric tenim diverses cavitats sepulcrales que, per la seua relació astronòmica, mereixen ser mencionades. És el cas, per exemple, de la

cova del Cantal, a Biar. Julio Asunción ja va apreciar que el Sol hi podria tindre alguna connotació simbòlica en relació amb aquesta cavitat, utilitzada com a lloc de soterrament durant el III i el II mil·lenni a. C. La cova està dividida en dos estances, i és en la més xicoteta on aparegueren els nou individus que s'hi localitzaren.

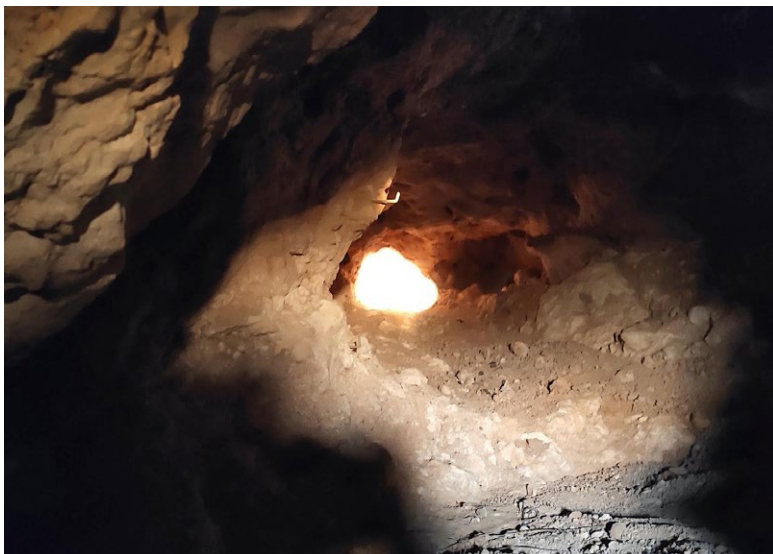
Asunción refereix que «el Sol alcanza su cenit frente a la cueva, inundándola de luz (...). Metáfora de la vida dada por el dios Sol (...), más allá tras la muerte». Aquesta afirmació és certa per a la més gran de les estances, però no per a la xicoteta, ja que allí la llum del Sol pràcticament no hi entra durant tot l'any. A més, cal remarcar que els soterraments no aparegueren sinó en la cavitat menuda. Per tant, si hi havia un espai simbòlic probablement era aquesta i no la gran.



Boca secundària de la cova del Cantal.
Foto: D. Iborra.



La llum del sol penetra per una xicoteta obertura en la cova sepulcral del Cantal durant el capvespre del solstici d'hivern. Foto: D. Iborra.



Moments finals de l'alineació solar del Cantal. Foto: D. Iborra.

De la boca d'accés secundària a la paret final de la galeria hi ha 5,8 m de llargària. Aquesta distància s'amplia a 8 m si comptem des del mur exterior de la cova, que impedeix la visibilitat de la meitat est de l'horitzó. Per tant, que els raigs de sol s'endinsin en la cavitat és d'una dificultat extrema.

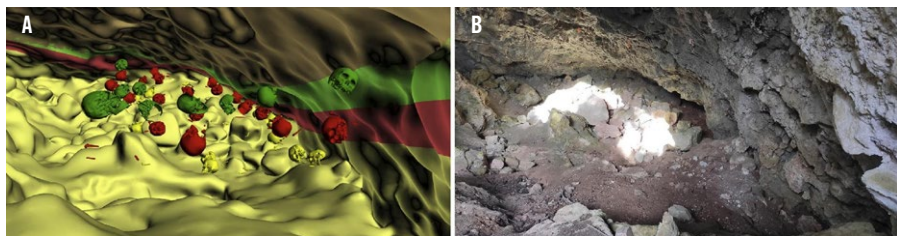
Tot i això, en el solstici d'hivern es produeix una alineació solar perfecta que il·lumina la galeria i arriba a la paret del final. El primer raig de sol entra a les 16.49 h (hora local) i incideix en el terra de l'estança. El feix de llum va desplaçant-se cap a la paret nord-est, i a les 17.39 h només incideix en aquest espai, efecte que dura únicament quatre minuts, fins que el Sol desapareix per l'horitzó i la cavitat queda en penombra.

La possibilitat que l'alineació solar de la cova del Cantal fora coneguda per les persones que van escollir aquest espai per al seu descans etern és ben

gran, tenint en compte que es tracta d'un esdeveniment extraordinari que només ocorre durant uns dies a l'any.

El Sol a la cova sepulcral de la Pastora (Alcoi)

Una altra cova sepulcral d'importància pel que fa als aixovars funeraris que s'hi han localitzat és la cova de la Pastora, a Alcoi, freqüentada des del IV mil·lenni a. C. Allí la zona de soterraments coincideix quasi a la perfecció amb la que il·luminen els raigs de sol poc després de l'alba en el solstici d'estiu. Cert és que la llum solar penetra dins la cova durant uns quants mesos, però no és sinó en la parada solsticial d'estiu que aquesta arriba al punt més meridional possible del mur oest (el més profund), i des d'allí comença un recorregut que travessa tota la zona d'inhumació.



Localització dels soterraments en la Pastora (A; en groc, període neolític; en roig, del calcolític al campaniforme, i en verd, edat del bronze) i insolació en la zona idèntica durant el solstici d'estiu (B).
Imatges: M. O. García Puchol i al. (A) i D. Iborra (B).

En els aixovars funeraris aparegueren 25 ídols oculats, la simbologia dels quals està relacionada amb les representacions soliformes i asterifformes tant d'art rupestre com d'art moble. L'associació d'aquesta simbologia amb els astres del cel és evident. Tot i que el relleu de la cavitat podria haver condicionat la zona de soterraments, la possibilitat d'un culte solar en la Pastora existeix.

Un possible calendari solar paleolític al Parpalló (Gandia)

La cova del Parpalló, a Gandia, va estar habitada del 25.000 al 12.000 a. C. i és el millor exponent de l'art del paleolític superior de tota la meitat est peninsular. Allí han aparegut més de 5.000 plaquetes amb pintura o gravats que la caracteritzen, més que com a lloc



El Sol penetra en la sala més profunda de la cova del Parpalló en els equinoccis. Foto: J. Lull.

d'hàbitat, «com una sort de santuari», en paraules de Lull.

L'astrofísic César Esteban i l'arqueòleg J. Emili Aura mostraren que la llum del Sol entrava en les primeres dues sales de la cova al voltant del solstici d'hivern. En un estudi posterior, més acurat, Lull demostra que els raigs de sol només penetren en la tercera sala de la cova durant uns pocs dies al voltant dels equinoccis. En concret, el dia de l'equinocci de primavera és l'últim en què la llum arriba a la sala més profunda de totes, per a tornar a aparèixer en aquest espai exactament el dia de l'equinocci de tardor.

Si es confirmara la hipòtesi que els pobladors del Parpalló coneixien aquesta efemèride i usaven la llum del Sol per a determinar el calendari, ens trobaríem, en paraules de Lull, davant de «l'observatori equinoccial i marcador estacional més antic mai conegut» no únicament de la nostra regió sinó de tot el planeta.

Reflexions finals

Als territoris del sud valencià, el Sol –però també altres astres com la Lluna o Venus– ha sigut venerat des de temps immemorial. És difícil determinar quan comencen aquests cultes en aquest territori, però almenys es pot afirmar amb molta seguretat que en la segona meitat del I mil·lenni a. C. ja es coneixien i se celebraven les principals efemèrides astronòmiques. A més de les mencionades en aquest article, dins el nostre estudi de les coves santuari ibèriques de la regió hem trobat que

en el solstici d'hivern es produeixen alineacions solars a la cova de l'Agüela (Alcalà de la Jovada), la cova del Moro (Muro d'Alcoi), la cova Pinta (Callosa d'en Sarrià) i la cova Fosca (Ondara). L'estadística, per tant, és ben clara: el 71 % presenten insolacions rellevants en el solstici d'hivern, llevat de la cova dels Pilars d'Agres, on es produeix en el d'estiu, i la cova de les Dones de Busot, en què la relació podria ser equinoccial.

També es pot intuir que en algunes coves utilitzades com a sepulcres en el III mil·lenni a. C. el Sol podria haver tingut una funció simbòlica en relació amb els cicles de naixement i mort que representen els solsticis. Cal entendre que la manifestació de la llum del Sol sobre un soterrament era una intervenció física i directa de la mateixa divinitat, fet que s'allunya bastant del nostre concepte actual de simbolització religiosa, i això ens dificulta la comprensió d'aquesta teofania.

A escala global, sabem que el primer calendari de la humanitat té uns 25.000 anys d'antiguitat (la placa Blanchard, a França), la construcció més antiga orientada astronòmicament, uns 7.000 anys (cercle de Goseck, a Alemanya) i el primer registre del moviment aparent de Venus, uns 3.600 anys (tauleta d'Ammissaduqa, a l'Iraq). Per tant, la cronologia que proposem entra dins de les cotes acceptades per la comunitat científica. A parer nostre, com hem dit, hi ha indicis per a afirmar que en el període calcolític ja hi ha un simbolisme religiós associat al Sol al nostre territori, tot i que resulta molt més manifest i observable en l'època ibèrica.

L'observació del nostre cel

*Guillermo Bernabeu Pastor, Rubén García Lozano, José Joaquín Rodes Roca,
José Miguel Torrejón Vázquez i María Martínez Chicharro*

Dept. Física, Enginyeria de Sistemes i Teoria del Senyal

Són nombroses les evidències que demostren que els nostres avantpassats més llunyans miraven al cel, probablement atrets per la bellesa de les nits estrelades, potser per la presència de la canviant Lluna, o alçaven la mirada esperant respostes a les seues inquietuds més profundes. Prompte van descobrir el moviment i la periodicitat de molts fenòmens vinculats a l'observació del cel, i així van aprendre a orientar-se, a mesurar el temps i a elaborar calendaris.

L'astronomia va sorgir i es va desenvolupar en diferents pobles i civilitzacions del nostre planeta, i en cadascun va obtindre diferents nivells de progrés. Mirant l'horitzó podien observar que el Sol, aquell disc lluminós, emergia per l'horitzó est i, després de descriure una trajectòria, s'ocultava per l'oest.

L'observació del cel, tant durant el dia com a la nit, també forma part de la cultura popular de les ciutats i pobles valencians. Moltes són les referències que la tradició oral ens ha transmés de generació en generació en forma de refranys i dites populars lligades a les activitats agrícoles, a festivitats, a l'adveniment de les estacions, als moments més adequats per a fer un altre tipus d'activitats: «A l'estiu tot lo món viu», «Per Sant Joan, bacores; verdes

o madures, bacores segures», «Si la Candelera plora, l'hivern és fora; si la Candelera riu, l'hivern és viu», «Qui a l'hivern sembra gra, a l'estiu bé menjarà», «Al gener, tanca la porta i encén el braser», etc.

Durant segles l'astronomia i l'astrologia formaven part d'un mateix camp del saber. Amb la revolució científica, però, l'astrologia quedà relegada a un conjunt de creences i tradicions que manquen de fonament científic. Una de les manifestacions més populars que han arribat als nostres dies és l'horòscop, que molts periòdics encara hui continuen publicant. Ara bé, com veurem més endavant, aquells que, per exemple, per haver nascut el 15 de març acudeixen a la lectura de Peixos, veges per on, estan molt equivocats. Una mala passada que els juga el moviment de precessió de l'eix de rotació de la Terra. La ciència posa les coses al seu lloc.

Un recorregut pels pobles de les nostres comarques revela encara la presència d'una les principals eines no mecàniques que ens permeten, en la majoria dels casos, determinar l'hora i, en casos més sofisticats, establir les estacions, equinoccis i solsticis... Ens referim als rellotges solars, elaborats amb diferents formes artístiques i diferents dissenys

supeditats a l'orientació de les edificacions on se situaven. En la majoria dels casos revelen un profund coneixement de la geometria i del moviment aparent del Sol al llarg de l'any. Desgraciadament, com ocorre en altres aspectes del nostre patrimoni, molts rellotges de sol, autèntiques obres d'art, han desaparegut o a penes en queda el quadrant o el gnòmon. Per fortuna, alguns s'han conservat i és possible contemplar-los a les esglésies, a les cases tradicionals o en alguns masos.

És de justícia fer referència a l'excel·lent treball realitzat per Joan Olivares i Alfonso, cristallitzat en el llibre *Rellotges i calendaris solars*. En aquesta obra podem trobar un profund estudi sobre els rellotges solars i calendaris que és el resultat d'un intens treball de camp cercant per pobles i masos rellotges solars –o el que en queda– i conversant amb les persones, que van aportar relats, anècdotes, etc., fonamentalment a la Vall d'Albaida. Al poble on habita, Otos, ha impulsat la construcció i conservació de rellotges solars dissenyats per reconeguts artistes, fins a constituir un autèntic parc temàtic. Otos bé mereix una visita, amb la possibilitat de conversar amb Joan Olivares i de gaudir d'una varietat de plats tradicionals en una de les cases pairals més importants del poble: Ca les Senyoretetes.

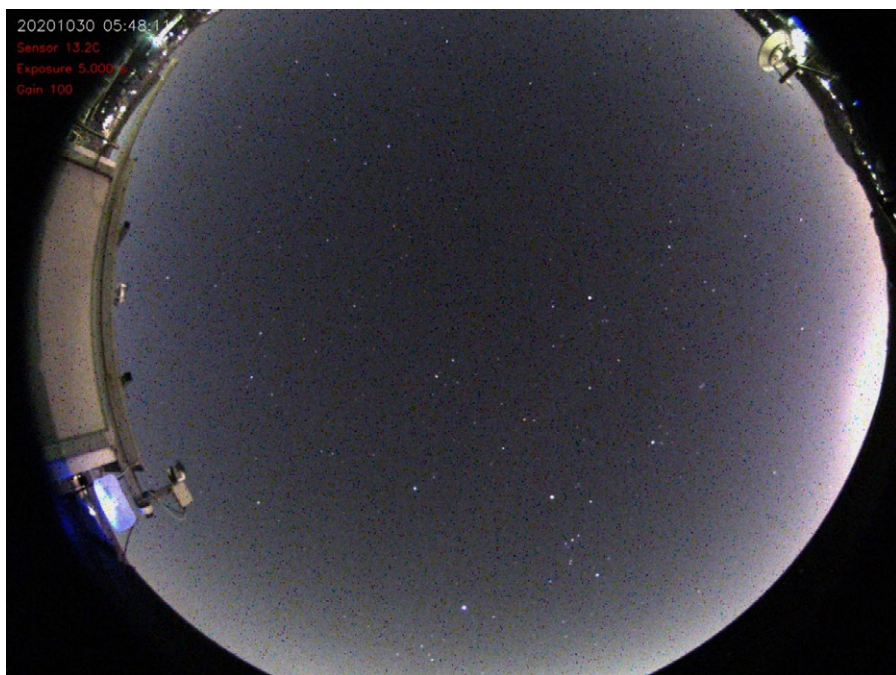
La situació geogràfica

La nostra latitud i longitud ens donen accés a una àmplia finestra al cel que ens permet observar tot l'hemisferi nord i gran part de l'hemisferi sud, si bé és cert que no tenim accés a algunes meravelles que ofereix el cel del sud.

Aquesta situació geogràfica va acompanyada d'un clima que propicia en moltes de les nostres comarques l'observació del cel estrelat, encara que, lògicament, els llocs més idonis es troben apartats dels nuclis de població, lluny de la contaminació lumínica. Són molts els llocs que ens ofereixen l'oportunitat de gaudir d'una bona observació. Només a manera indicativa, en el nostre entorn més immediat podem esmentar la serra d'Aitana, la Carrasqueta, la serra de Callosa, la serra de Crevillent, la Serrella, la Mariola, el Benicadell, el Cabeçó d'Or, el Montcabrer, etc. Podem imaginar el visir al-Azraq assegut a la terrassa de la torre principal del castell d'Alcalà (Benissili) contemplant a l'alba l'eixida del Sol, amb les esplèndides vistes al bell paisatge de la vall de Gallinera, i en caure el Sol, veure aparèixer les primeres estrelles més brillants, fins a poder contemplar, a mesura que avança la nit, l'esfera celeste en tota la seua esplendor. Segur que no massa lluny del nostre lloc de residència podem trobar un espai que ens permetga gaudir del cel nocturn.

Els espais protegits que s'estenen al llarg de les nostres comarques ens ofereixen una oportunitat excepcional per a obtindre una visió integral de la natura, terra i cel com un tot al nostre abast. Aquests espais protegits ens sensibilitzen en el respecte al medi ambient. Per què no considerar el cel una part del medi ambient que mereix també ser protegida? Al final del capítol dediquem un apartat a aquest assumpte.

Podem preguntar-nos si no és possible gaudir del cel nocturn sense necessitat d'allunyar-nos tant del nostre lloc de residència. La resposta és afirmativa. Tant a ull nu com amb uns prismàtics



El cel nocturn vist des de l'observatori astronòmic de Busot. Foto: R. García.

o un telescopi, el cel continua proporcionant-nos l'oportunitat d'accedir als objectes més brillants: per descomptat la Lluna, els planetes en l'època que si-guen visibles i moltes de les constel·lacions. Com una primera aproximació, resulta un bon inici.

Preparant l'observació

Una vegada elegit el nostre lloc d'observació, preparem el material en funció de les expectatives. Si el que volem és simplement gaudir de la contemplació del cel nocturn o si es tracta de les nostres primeres observacions, ens centrarem a identificar les constel·lacions més característiques. Per a això, ens basta

l'ajuda d'un simple planisferi adequat per a la nostra latitud. És molt probable que no en trobem a la venda un de latitud 38° , però un planisferi en la franja entre 35° i 42° ens encaixarà perfectament. Sempre tenim l'alternativa de fer-nos-en un seguint les instruccions disponibles en l'abundant bibliografia sobre el tema. Si disposem d'una guia de camp o de qualsevol de les nombroses aplicacions gratuïtes que podem instal·lar en el mòbil, ja podem planificar l'observació i preparar la seqüència de constel·lacions que observarem durant la nit. No hem d'oblidar que al llarg de la nit la rotació de la Terra fa que la posició de les constel·lacions vagi canviant: unes estaran emergint per l'horitzó est a una hora determinada i, amb el pas

del temps, s'elevaran en la volta celeste fins arribar a la màxima altura en el seu pas pel nostre meridià; en canvi, unes altres estaran baixant fins a ocultar-se per l'horitzó oest, i unes altres, en canvi –sorpresa!–, no s'ocultaran en tota la nit: les denominades circumpolars. Ara bé, si torne al mateix lloc un o dos mesos després a la mateixa hora, el panorama nocturn haurà canviat: aquella constel·lació que a penes estava emergint per l'est ara la trobaré molt més amunt sobre l'horitzó, i la que estava descendant... ara ja no la veig!, s'ha ocultat. És que tot es mou! La Terra gira sobre si mateixa i, al mateix temps, al voltant del Sol, i aquests moviments tenen el seu reflex en la volta celeste.

Com ja hem apuntat, algunes de les constel·lacions les podrem contemplar durant tota la nit. Es tracta de les circumpolars, que identificarem mirant cap al nord, cap a la Polar. Unes altres les veurem emergir per l'horitzó est, elevar-se i arribar a la seua altura màxima sobre l'horitzó (culminen en el nostre meridià del lloc), i començar a davallar cap a l'horitzó oest.

Un detall important que hem de tindre en compte és que, mentre que les nits d'estiu són curtes i agradables, les d'hivern són més llargues i fredes, de manera que haurem de preparar-nos amb roba d'abric perquè l'observació resulte més confortable, sobretot si ens desplace a llocs situats a certa altitud. Utilitzem un llum amb filtre roig (per exemple, una llanterna que cobrim amb cel·lofan d'aquest color) per a moure'ns amb seguretat sense alterar massa la foscor existent.

No hem de renunciar a observar també altres objectes si estan presents: la Lluna, els planetes, meteorits,

satèl·lits artificials, l'Estació Espacial Internacional i una multitud d'objectes que circulen pel nostre cel i que amb una bona informació prèvia i una mica de perícia podrem localitzar. A vegades serà a penes un instant fugaç de visibilitat, però ens proporcionarà una enorme satisfacció.

La Lluna per si mateixa té un especial atractiu per a l'observació, però la seua presència en fase pròxima a plena provocarà una il·luminació que dificultarà l'observació dels objectes més dèbils. Per contra, per als observadors més novells, la presència de la lluna plena elimina els objectes més febles i facilita la identificació, de forma més clara, de les constel·lacions. En realitat, el concepte de constel·lació s'associa a una llarga tradició d'observació a ull nu en diferents cultures i llocs del món. En aquest sentit, hi ha una gran quantitat de treballs d'astronomia comparada. Hui dia són molt més nombroses les estrelles que es troben adscrites al concepte «clàssic» de constel·lació, moltes d'elles visibles amb prismàtics o telescopis, però no a ull nu. Recordem que un ull normal, en condicions òptimes d'observació, no podria veure més enllà d'estrelles de magnitud 5.

Convé en aquest punt aclarir que el concepte de magnitud estellar reflecteix una «mesura» de la brillantor d'una estrella. A simple vista observem que hi ha estrelles que brillen més que altres, i que algunes són molt dèbils. Hiparc de Nicea (segle II a. C.) va dividir les estrelles en sis classes de magnitud, d'1 a 6 (magnitud *m*), sent les de magnitud 1 les més brillants, mentre que les de magnitud 6 a penes són perceptibles a simple vista. Aquesta escala es va ampliar a mesura que es van utilitzar



Vista de la superfície de la Lluna. Foto: R. García.

prismàtics i telescopis i es podien observar objectes més dèbils. En el segle XIX, Norman Pogson va introduir modificacions que van millorar notablement la classificació primitiva. L'escala es va ampliar, de manera que en el nostre hemisferi l'estrela més brillant és Sírius, amb una magnitud $-1,5$. La Lluna plena té una magnitud -12 , el Sol, -26 , i els objectes més dèbils detectats tenen magnitud 30. Observeu que, a major magnitud, més dèbil és l'objecte. L'escala és logarítmica, de manera que entre una estrela de magnitud 1 i una de magnitud 6 (una diferència de cinc magnituds) la de magnitud 1 és cent vegades més brillant que la de magnitud 6. Evidentment parlem de brillantor aparent, sense prendre en consideració la distància a què es troba l'astre. Per a considerar la brillantor intrínseca

s'introdueix l'escala de magnituds absolutes, M . La fotometria constitueix una part important de l'astronomia.

La visibilitat de les constel·lacions al llarg de l'any

A causa del moviment de translació de la Terra al voltant del Sol, cada dia podem veure el mateix aspecte del cel quatre minuts abans que el dia anterior. Al llarg d'un any unes constel·lacions predominen en el cel nocturn i unes altres no les veurem per més que ens esforcem a buscar-les-hi. Aquest panorama s'anirà modificant a mesura que el nostre planeta fa el seu periple anual. On es troben durant aquests períodes d'invisibilitat? La resposta la té el Sol. Per descomptat, n'hi ha unes quantes

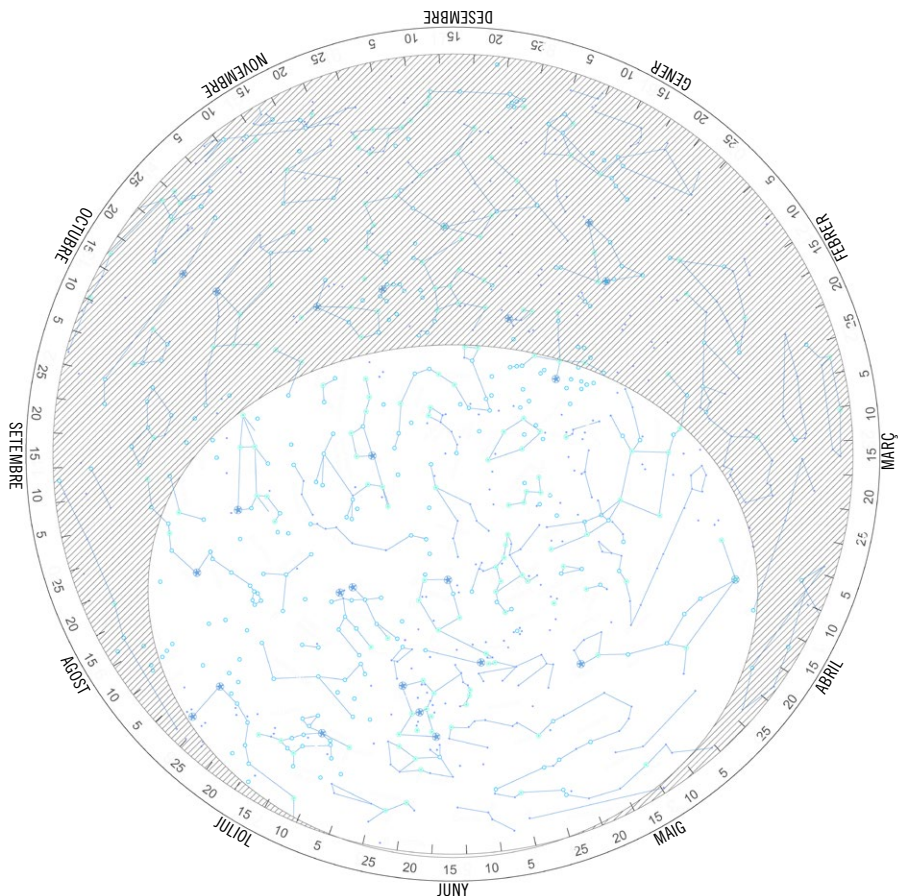
que escapen d'aquest diagnòstic: les circumpolars. Ací estaran nit rere nit, amb millor o pitjor visibilitat en funció de la seua altura sobre l'horitzó.

No pretenem fer ací un recorregut exhaustiu dels objectes observables en el cel nocturn. Hi ha molta informació en forma de guies, llibres, recursos en la xarxa, etc., en els quals trobarem una descripció més àmplia i completa. La nostra intenció és simplement fer una

passejada pel cel estrelat citant algunes fites que ens serveixen de referència. És més que probable que, en opinió del lector, hàgem obviat alguns objectes que mereixen major consideració.

El cel a l'hivern

Sens dubte, l'hivern ofereix el millor espectacle per a l'observació del cel



El cel de l'hivern.

nocturn. Les nits llargues, fredes i transparents, a vegades sense núvols, lluny de la contaminació lumínica, ens permeten veure i identificar objectes més dèbils.

En el cel hivernal, una constel·lació es mostra amb tota la seua esplendor. Es tracta d'Orió, referida pràcticament per tots els pobles de l'antiguitat. La veiem emergir per l'horitzó est (sud-est), culminant i omplint una gran part del cel, convidant-nos a la seua contemplació, amb la seua forma de gran caçador, per davall de la constel·lació de Taure, a l'ull de la qual –l'estrela Aldebaran– sembla voler apuntar amb el seu arc. Orió ens mostra estrelles molt brillants: Betelgeuse, Rigel i les tres estrelles centrals que constitueixen el cinturó del gran caçador. I per davall d'aquest, la bellesa de la nebulosa d'Orió, ben visible amb uns simples prismàtics. Quantes estrelles tenen el seu bressol en aquesta nebulosa!

Prop d'Orió, la constel·lació del Ca Major alberga l'estrela més brillant del cel nocturn, Sírius, tan transcendent en la vida quotidiana de l'antic Egipte. No molt lluny, Bessons, Erídan, Lepus (la Llebre, producte de la cacera d'Orió, segons els antics grecs) i moltes altres.

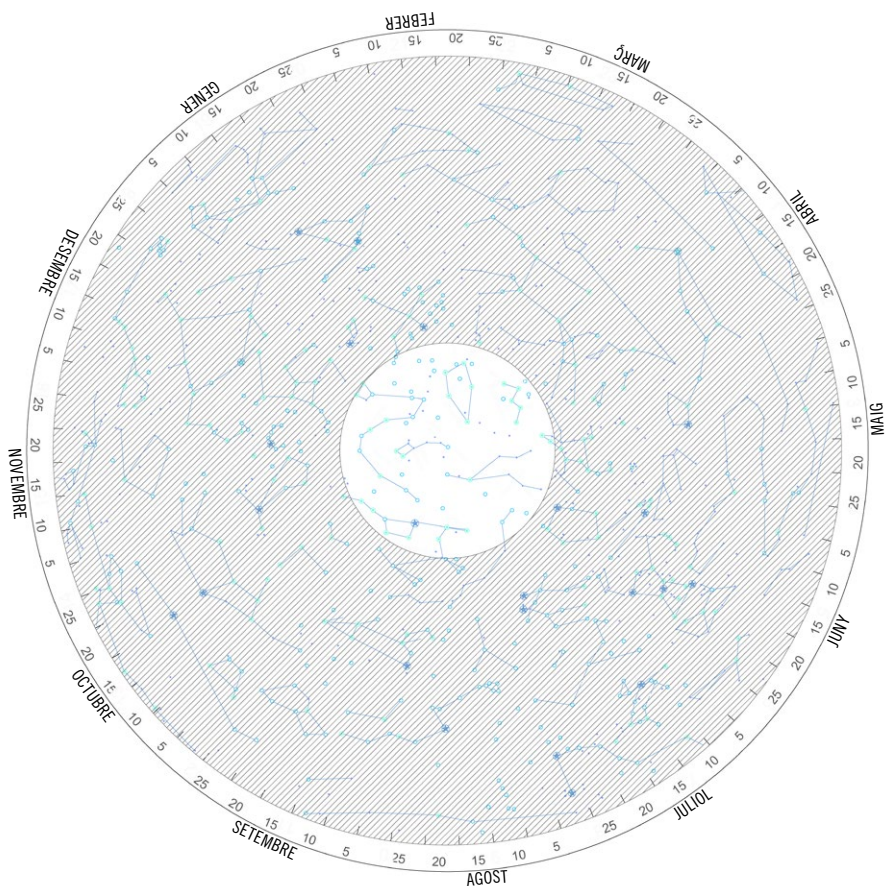
Així doncs, el Nadal ens porta el regal d'Orió i els seus gossos, de Taure, les Plèiades, el Ca Major i huit estrelles molt brillants: Aldebaran, Capella, Pòlux, Càstor, Betelgeuse, Rigel, Proció i Sírius, la més brillant del firmament.

La regió circumpolar

Per a l'observació de la regió circumpolar ens situarem mirant cap al nord i identificarem fàcilment l'Óssa Major (el Carro, la Tetera...) i Cassiopea, amb

les seues llegendes mitològiques associades. Entre aquestes dues constel·lacions, l'Óssa Menor i, per tant, l'estrela Polar. Algunes estrelles de l'Óssa Menor són molt dèbils, i per aquest motiu veure la constel·lació completa és cosa de nits fosques i amb bona transparència. En l'Óssa Major trobem dues estrelles, una que es pot veure molt bé a simple vista, Mizar, i una altra molt pròxima, Alcor, que a penes es pot distingir. Aquest sistema s'utilitzava antigament com a prova d'agudesia visual per als arquers, però també és una prova per a nosaltres. Al llarg de la nit veurem com ascendeix Cassiopea i davalla l'Óssa Major, sense arribar a ocultar-se, amb la Polar en l'eix de rotació, aparentment immòbil. A prop, les constel·lacions de la Girafa, el Drac i Cefeu. Per davall de Cassiopea, una altra constel·lació important, Perseu, tot i que no és circumpolar.

Mentre la Terra prossegueix el seu viatge al voltant del Sol, el paisatge nocturn va canviant. El dia de l'equinocci de primavera, el Sol, en el seu moviment aparent en la volta celeste, se situa en l'equador i ix exactament per l'est. Comença la primavera a l'hemisferi nord, desplaçant-se de dia en dia cap al nord, com podem comprovar fàcilment observant la seua eixida amb referència a altres objectes que visualitzem en el nostre horitzó (arbres, edificis, muntanyes, etc.). Així succeirà fins al solstici d'estiu, dia en què s'assolirà la màxima distància des de l'est cap al nord per a tornar, a poc a poc, dia a dia, a l'equador celeste en el solstici de tardor, començant la seua marxa per davall de l'equador i emergint cada vegada més cap al sud fins arribar al màxim desplaçament en el solstici d'hivern. A



La regió circumpolar.

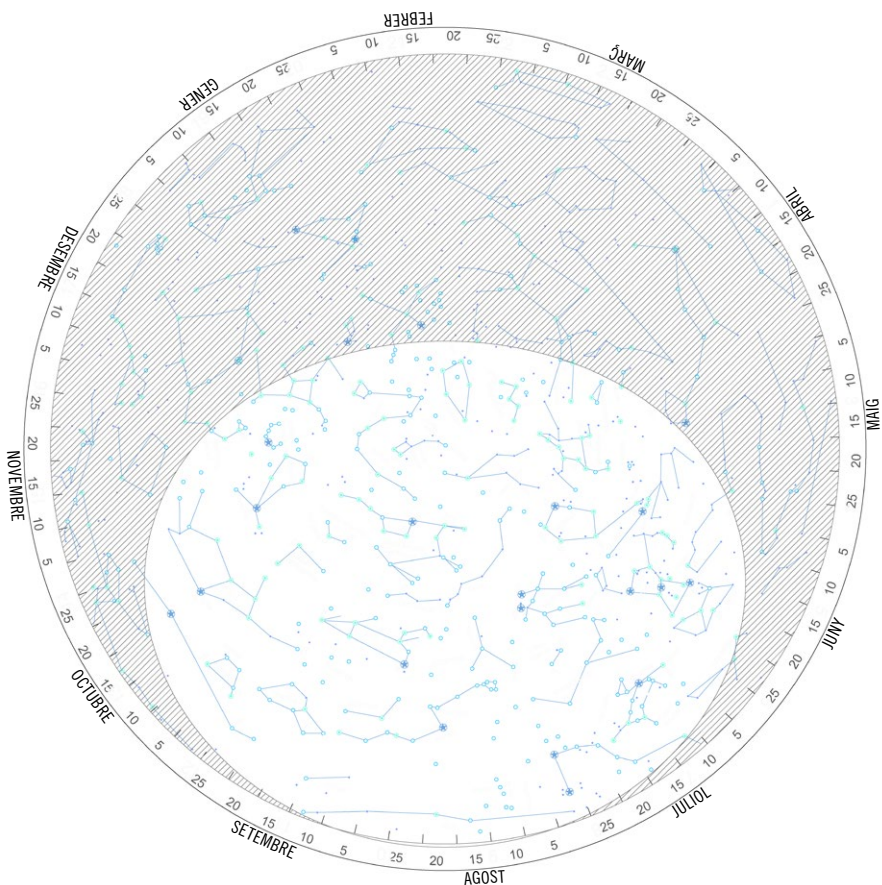
partir d'ací, l'eixida del Sol s'anirà desplaçant cap a l'est, punt al qual arribarà en l'equinocci de primavera, i torna a començar. Aquests moviments produeixen canvis en la duració dels dies i les nits i, per descomptat, en el clima.

El cel primaveral

Certament, en les nostres latituds la primavera porta nits més agradables, la

natura es renova i ens ofereix un bell paisatge. L'observació es converteix en una experiència més confortable, però també el clima és més inestable, amb aiguats inesperats.

Noves constel·lacions que no havíem tingut l'oportunitat d'observar durant l'hivern se'ns ofereixen en l'horitzó. On estaven ocultes? Estaven en el seu lloc, per descomptat, només que la presència del Sol, amb la seua llum intensa, impedeix que siguin visibles.



El cel de la primavera.

Mirant al nord, fàcilment identificarem l'Óssa Major; a prop, les constel·lacions circumpolars ja esmentades. Seguint la cua de l'Óssa Major trobarem l'estrella Artur, de la constel·lació del Bover, el guardià de l'Óssa, una de les estrelles més brillants (magnitud 0). Molt a prop, una esplèndida diadema, la Corona Boreal. Continuant en direcció sud, Leo i Verge, i descendint per a ocultar-se per l'oest, Càncer i Bessons. Anticiplem ací que Leo, Verge, Bessons

i Càncer són constel·lacions del Zodíac, és a dir, situades en l'eclíptica (camí que aparentment recorre el Sol en el cel al llarg d'un any). En els primers dies de març, a primeres hores de la nit, encara podem observar l'ocàs de les constel·lacions que han regnat amb esplendor durant l'hivern: Orió, Bessons i Auriga. A mesura que avança la primavera deixaran de ser visibles.

El cel de primavera és menys esplendorós que el de l'hivern, però ens

permet identificar tres estrelles molt brillants: Regulus (en Leo), l'Espiga (en Verge) i Artur (en el Bover). Verge, l'eixida del qual anuncia època de collites –per això era la deessa de les collites en l'antiga Grècia–, alberga un dels cúmuls galàctics més rics de tot el cel.

El cel a l'estiu

Podríem pensar que a les nostres comarques l'estiu és el temps més propici per a observar el cel nocturn: la benevolència del clima, la facilitat per a allunyar-nos dels llocs més contaminats lumínicament, la tendència a ficar-nos al llit més tard, el fet de ser en molts casos període de vacances..., totes aquestes circumstàncies inciten a l'observació del cel a l'estiu. Tanmateix, les nits són molt curtes, es fa fosc tard i el dia comença ben enjorn. Ara bé, per al nostre propòsit és el període més agradable.

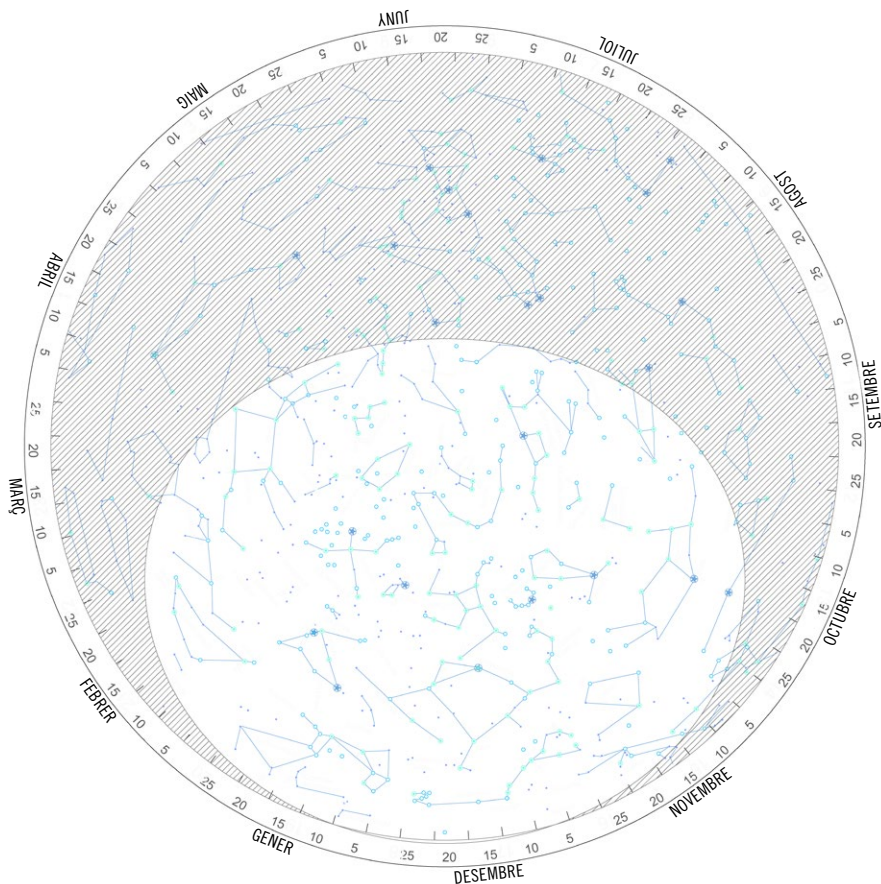
Mirant cap al sud, si alcem la mirada quasi en la vertical, ens trobem amb l'esplèndid triangle d'estiu, constituït per tres estrelles brillants: Deneb en la constel·lació del Cigne, Vega en la de la Lira i Altair en la de l'Àguila.

Si el cel no està molt il·luminat, descobrirem que aquestes tres constel·lacions estan al si d'una banda platejada que s'estén d'extrem a extrem en la volta celeste. Sí, estem contemplant la Via Làctia, la nostra galàxia, amb més d'un centenar de milers de milions d'estrelles, una de les quals és el nostre Sol. No ens hem de perdre aquest espectacle, sentir el vertigen de contemplar la galàxia a què pertanyem. Podrem preguntar-nos com és que, estant dins seu, podem contemplar-la... tota?, en part? Si disposem d'uns prismàtics i una

mica de paciència, el recorregut al llarg de la Via Làctia ens revelarà un espectacle inoblidable, amb la possibilitat de contemplar cúmuls i nebuloses.

Si seguim la Via Làctia en direcció sud, ens trobarem amb dues constel·lacions zodiacals ben conegudes, Escorpió i Sagitari. En aquesta zona de la Via Làctia, especialment densa, hi ha una gran quantitat de nebuloses i cúmuls oberts i globulars, molts observables simplement amb uns prismàtics. Segons la mitologia grega, Escorpió va clavar el seu fibló verinós a Orió, i com a càstig va ser situat en un lloc del cel que per a alguns països de Centreeuropa és a penes visible. Nosaltres el podem observar a poca altura sobre l'horitzó, cosa que afegeix certa dificultat. Però un objecte molt brillant ens crida l'atenció. Es tracta d'Antares, una estrella rogenca (amb una temperatura superficial de 3.300 graus Kelvin). Per l'horitzó est apunten dues constel·lacions zodiacals més, Capricorn i Aquari, i per l'oest, baixant cap a l'ocultació, Verge, que ho farà primer, i després Lliura (Balança). Encara és possible veure el Bover i, a la dreta, la Corona Boreal i la constel·lació d'Hèrcules, i per davall Ofiuc i la Serp. Per l'horitzó est emergeix el gran quadrat de Pegàs, i al seu costat Andròmeda, constel·lació a la qual ens referirem amb més detall en el cel de tardor. En l'horitzó nord, Cassiopea, i per davall, apareixent per l'horitzó, Perseu. L'Óssa Menor arriba a la seua situació més alta, mentre que l'Óssa Major està molt baixa i resulta més difícil de veure, sobretot si tenim obstacles en l'horitzó (muntanyes, edificis, etc.).

Només hem esmentat unes quantes constel·lacions. Amb l'ajuda d'un simple



El cel de l'estiu.

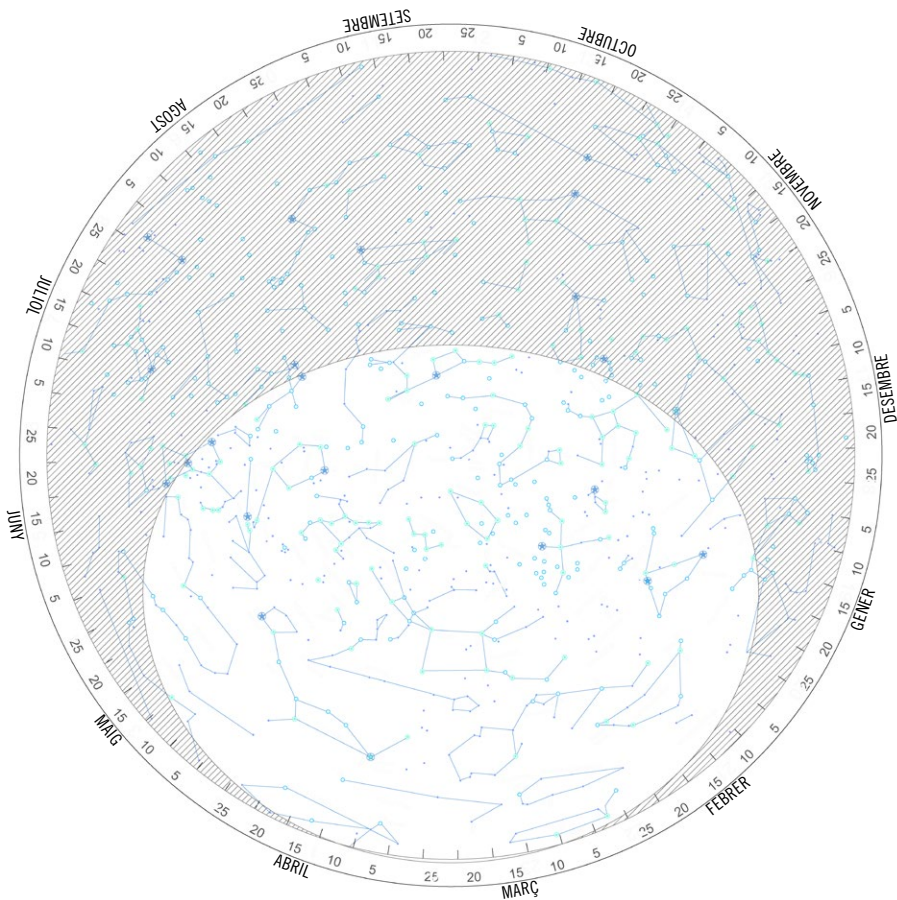
planisferi podrem identificar-ne algunes més en les agradables nits d'estiu.

Les estrelles a la tardor

L'estiu avança i l'altura del Sol a migdia va disminuint fins arribar a l'equinocci de tardor. Els dies continuen acurtant-se, es fa fosc abans i podem iniciar les nostres observacions a poqueta nit. Per contra, el clima es torna més

inestable i els dies plujosos, i els cels ennuvolats són més freqüents, fet que dificulta les nostres observacions. En el cel de tardor continuem contemplant el ja esmentat triangle d'estiu, que va davallant per a ocultar-se per l'horitzó oest.

Si alcem la mirada, el quadrat de Pegàs se'ns mostra amb tota la seua esplendor, i molt a prop, la constel·lació d'Andròmeda, que alberga l'objecte més distant que podem observar a



El cel de la tardor.

simple vista: la galàxia d'Andròmeda, M31. Es tracta d'un objecte conegut des de fa segles: les primeres referències es remunten al segle x. Té una magnitud aparent pròxima a 5, és a dir, no molt fàcil de veure a ull nu, de manera que caldrà cercar llocs sense contaminació lumínica i nits sense lluna per a una millor observació, que serà més senzilla si ens ajudem amb uns prismàtics (els de 7×50 són els més idonis).

M31 se'ns presenta com un xicotet objecte difús il·luminat, un nuvot en cès; per això se la identificava com a nebulosa, i així va ser catalogada fins que, al voltant de la segona dècada del segle XX, les observacions amb grans telescopis (reflectors d'uns 2 m de diàmetre) van permetre identificar estrelles cefeides en la nebulosa i es va poder calcular una estimació de la distància a Andròmeda d'un milió d'anys llum aproximadament, cosa que demostrava

clarament que no es tractava d'una nebulosa sinó d'una galàxia. Hui sabem que aquest nuvot és una galàxia espiral situada a uns 2,5 milions d'anys llum que conté diversos centenars de milers de milions d'estrelles (unes 200.000.000.000), moltes més que les que conté la nostra pròpia galàxia.

La història d'aquest xicotet núvol il·luminat constitueix un apassionant relat de discussions i controvèrsies sobre la seua naturalesa. Si la nostra perícia ens permet identificar aquest nuvot, estarem contemplant l'objecte més llunyà que els nostres ulls poden veure a simple vista, tot i que molt millor amb uns prismàtics o, millor encara, amb telescopi. Però aquest relat l'iniciem amb la identificació de la constel·lació d'Andròmeda, que segons la mitologia grega era filla d'un rei etiop que va ser encadenada a una roca i exposada a la voracitat del monstre marí Balena. Perseu la va salvar i Balena va quedar petrificada en contemplar el cap de Medusa.

En l'horitzó nord, una gran W domina el cel. Es tracta de la constel·lació de Cassiopea. A partir d'ella és fàcil localitzar la Polar, i per davall, prop de l'horitzó, l'Óssa Major, que no està en la màxima esplendor. Prop de Cassiopea es troba Perseu.

Les constel·lacions del Zodíac

Entre les constel·lacions que hem visitat al llarg de l'any n'hem citat algunes amb una característica molt especial: es tracta de les constel·lacions zodiacals. Com ja hem esmentat anteriorment, a causa del moviment de la Terra al voltant del Sol, cada dia podem veure el mateix aspecte del cel nocturn amb

quatre minuts d'anticipació respecte al dia anterior. Sembla que la volta celeste es mou en bloc d'est a oest, de manera que les constel·lacions recorren tot el cel al llarg d'un any. I el Sol? Precisament per la presència del Sol no podem veure les constel·lacions durant el dia. Si poguérem bloquejar la llum del Sol, observariem que està situat sobre una constel·lació i que al llarg de l'any sembla desfilar per les dotze constel·lacions del Zodíac: Àries, Taure, Bessons, Càncer, Leo, Verge, Lliura, Escorpió, Sagitari, Capricorn, Aquari i Peixos.

Zodíac és el nom que apliquem a la franja al voltant de l'eclíptica (camí aparent del Sol al llarg de l'any) per la qual transiten el Sol, la Lluna i els planetes. El nom ve del grec (*zodiakos* 'cercle d'animals'), però el seu origen es remunta als babilonis, que al voltant de l'any 2000 a. C. van confeccionar un calendari de dotze mesos, dividint el Zodíac en dotze parts iguals, amb el nom de la constel·lació que contenien.

En aquests pobles antics es van desenvolupar creences basades en les posicions d'alguns cossos celestes, que determinaven, per exemple, el caràcter d'una persona, el seu futur, etc., en funció de la posició d'aquests astres el dia del seu naixement, o la possibilitat de predir l'èxit o el fracàs d'una batalla en funció d'aquesta posició. En els nostres dies es continua fent ús d'aquestes pseudociències. Per exemple, encara es publiquen horòscops basats en la data de naixement d'una persona, de manera que si un ha nascut el 10 de març se suposa que pertany al signe de Peixos, perquè el Sol estava situat en la constel·lació de Peixos el dia del seu naixement. Resulta, però, que l'eix de rotació de la Terra té un moviment denominat

de precessió: al mateix temps que gira sobre si mateixa, l'eix de rotació de la Terra es desplaça com si fora una trompa, i executa una oscil·lació completa cada 27.500 anys. Aquest moviment té com a conseqüència que la posició dels pols celestes canvia: el pol nord hui dia està situat molt prop de l'estrela Polar, a 0,9 graus d'aquesta, però l'any 2800 a. C. era l'estrela més brillant de la constel·lació del Drac la que es trobava més prop del pol nord. A conseqüència d'aquest moviment de precessió també es desplacen els equinoccis: el punt vernal avança una constel·lació del zodíac cada 2.140 anys. En temps dels grecs es trobava entre Peixos i Àries, però actualment està entre Aquari i Peixos. L'efecte és que el signe Àries coincideix en l'actualitat amb la constel·lació de Peixos, Taure amb la d'Àries, i així successivament. D'aquesta manera, lamentem comunicar que aquells que pensaven que eren peixos en realitat són aquari, perquè quan van nàixer el Sol en realitat es trobava situat en la constel·lació d'Aquari.

L'astrologia i l'astronomia van caminar juntes durant molts segles, però amb la revolució científica es va fer evident que l'astrologia consisteix en una sèrie de creences que manquen de fonament científic; es tracta d'una pseudociència, en definitiva.

Hem dit que si poguérem bloquejar la llum del Sol veuríem la constel·lació en la qual està situat. Doncs resulta que hi ha fenòmens naturals que bloquegen la llum solar. Els eclipsis solars totals constitueixen un dels fenòmens més bells que la naturalesa ens ofereix. És cert que no amb la freqüència ni en els llocs que ens agradaria. Si tenim l'oportunitat de contemplar un eclipsi

total veurem com la foscor guanya terreny i podrem observar el disc solar enfosquit situat en la constel·lació zodiacal corresponent a l'època de l'any corresponent.

Sobre les constel·lacions

En aquesta passejada pel cel nocturn, les nostres protagonistes han sigut les constel·lacions. Però, quina decepció!, en realitat les constel·lacions no són més que el resultat de la perspectiva sobre l'esfera celeste. La veritat és que les estrelles d'una constel·lació no tenen cap vincle físic entre elles, poden estar a enormes distàncies unes d'altres sense cap relació entre si. La perspectiva ens dona una visió aparent sobre l'esfera celeste. No obstant això, al llarg de la història de la humanitat el seu concepte ha sigut una bona guia per a orientar-nos en el cel. I encara ho és.

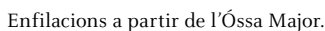
En aquest article hem utilitzat una nomenclatura de les constel·lacions que no sempre coincideix amb la denominació oficial. De fet, la Unió Astronòmica Internacional (IAU, segons les seues sigles en anglès) ens diu que el nom de les constel·lacions ha de formular-se en llatí –l'Óssa Menor, per exemple, es coneix com Ursa Minor–, i les estrelles, amb l'alfabet grec, de més a menys brillant: α , β , γ , δ ... –de manera que l'estrela Polar, la més brillant de l'Ursa Minor, es denominarà α UMi–.

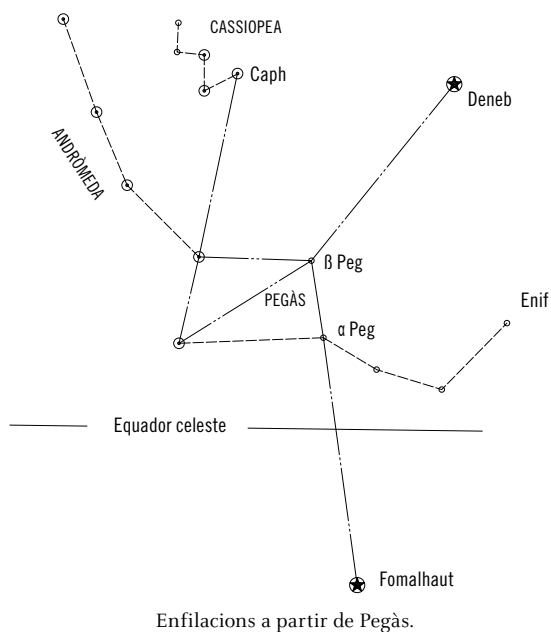
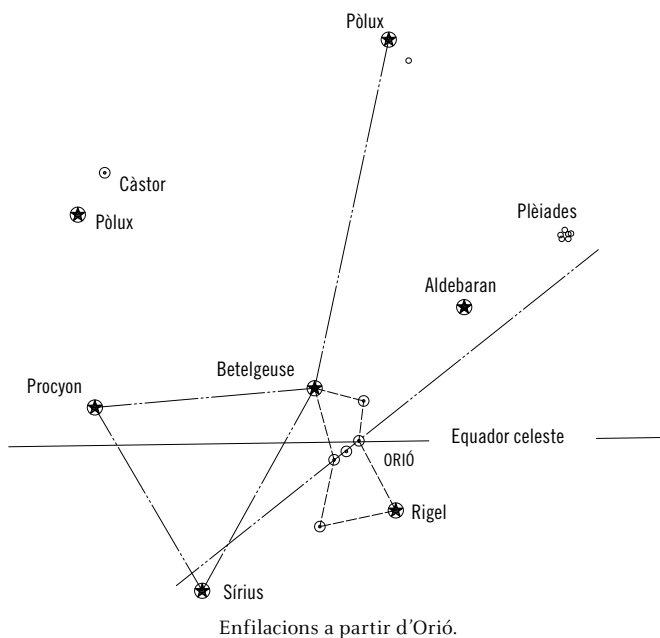
En l'actualitat, els astres estan catalogats d'acord amb les seues característiques, amb les seues coordenades, ascensió recta i declinació, cosa que en facilita la localització en el cel. Però per al plaer d'observar el cel a ull nu, les constel·lacions ens mostren el camí, tal

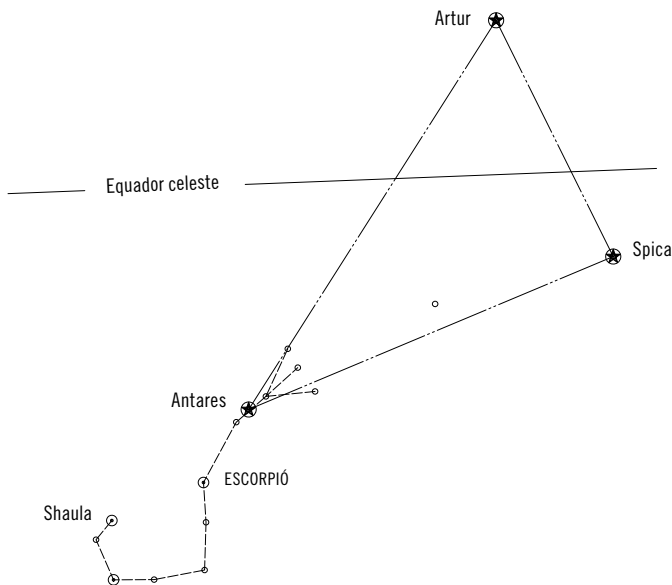
Enfilacions i orientacions

almanac astronòmic és relativament alta, ja que pot arribar a determinar la seua posició en el globus terrestre amb un error inferior als 500 metres.

Com ja hem dit, en l'actualitat s'utilitzen sistemes de navegació molt sofisticats, basats en un sistema de posicionament global amb l'ajuda de constel·lacions de satèl·lits (GPS, Galileu, Glonass...), que en alguns casos poden arribar a aconseguir precisions de posicionament subcentimètriques. Aquests sistemes de posicionament els tenim implementats en pràcticament tots els telèfons cel·lulars intel·ligents, que a través de diferents aplicacions poden ser de gran ajuda per a conèixer tant la nostra ubicació com la posició dels objectes celestes.







Enfilacions a partir d'Escorpió.

Quan comencem amb l'observació del cel nocturn, normalment partim d'un coneixement escàs de les constel·lacions i les seues posicions relatives en la volta celeste. Però la veritat és que ens pot ser de gran ajuda, per a orientar-nos a conèixer el cel, utilitzar enfilacions celestes partint de constel·lacions destacades per la seua clara visibilitat. Quatre d'aquestes, utilitzades a més per mariners, són les enfilacions a partir de l'Óssa Major, Orió, Pegàs i Escorpió.

Qui ens roba les estrelles?

Des de les primeres civilitzacions, el cel nocturn ras ha brindat un impressionant espectacle que ha meravellat i il·lustrat l'ésser humà.

En aquest capítol hem descrit una apassionat passejada per aquest cel

nocturn, identificant les constel·lacions, estrelles i altres objectes rellevants que ens brinda la seua contemplació. Però com ens arriba la informació d'aquests objectes tan llunyans?, qui és el missatger? La resposta és la llum. La llum de les estrelles, l'observació de les quals ha acompanyat la humanitat al llarg de la història en totes les cultures i civilitzacions. Observant el firmament i tractant d'interpretar-lo s'han construït els avanços científics més rellevants per a comprendre el nostre Univers.

Quasi tota la informació que rebem de l'Univers arriba a nosaltres a través de l'espectre electromagnètic, des de les altes energies (raigs gamma) a les baixes (ones de ràdio). Una part d'aquest espectre és el denominat espectre visible, que és la radiació que l'ull humà és capaç de percebre. Les principals fonts de radiació visible que ens arriben de

l'exterior procedeixen del Sol, la Lluna, els planetes, les estrelles i les galàxies. En uns casos la llum és emesa, en uns altres es tracta de llum reflectida, com en el cas de la Lluna, els planetes i els seus satèl·lits.

Llevat de rares excepcions, els únics objectes celestes que podem veure de dia, a més del Sol, són la Lluna i, en algunes ocasions, Venus. La resta d'objectes celestes no són visibles durant el dia. Això no significa que les estrelles no estiguen ací –les que corresponguen segons l'època de l'any–, simplement no les veiem. En el seu lloc veiem el cel blau. Això és perquè hi ha l'atmosfera, composta de diversos gasos, que dispersen la llum. Aquest fenomen s'accentua en les longituds d'ona curta

(blava), mentre que les longituds d'ona més llarga (roig, groc, taronja) passen sense ser quasi afectades, cosa que provoca a vegades bells capvespres. Si no tinguérem atmosfera, el cel seria negre o estrelat.

Però l'atmosfera no sols dispersa la llum que prové dels objectes celestes. També es dispersen en ella els raigs de llum que provenen de fonts d'illuminació artificials, i això és el que provoca la denominada contaminació lumínica.

La contaminació lumínica ens està robant les estrelles i la possibilitat d'aprendre d'elles. En temps passats, les constel·lacions que formen les estrelles en el cel podien ser vistes des de qualsevol part de la Terra, incloent-hi la impressionant Via Làctia, formada



La península Ibèrica vista des de l'Estació Espacial Internacional. Foto: NASA.



Vista de la Lluna en quart minvant. Foto: R. García.

per milions i milions d'estreles. Això ha canviat. En l'actualitat, des de les nostres ciutats a penes podem distingir un grapat d'estreles que a penes s'entreveuen tímidament a través del vel de la contaminació lumínica.

La major part de la contaminació lumínica és provocada per sistemes d'illuminació deficients, tant en tipus com en intensitat, direcció o horari. Des que l'ésser humà va conquerir la nit i llumina-la amb llums artificials, l'observació de la nit estrellada

s'esvaeix, especialment prop de les grans urbs.

Les úniques llums de la part nocturna de la Terra que haurien de ser visibles des de l'espai són principalment les produïdes per incendis, llamps o el llampurneig de meteors. Tanmateix, la visió és completament diferent: podem distingir clarament les principals ciutats i carreteres.

En la Conferència de Rio de 1992 es va establir la defensa d'una visió integral i interdependent de la Terra,



Contaminació lumínica sobre els nuclis urbans de l'Alacantí vista des de l'observatori de Busot.
Foto: R. García.

incloent els cels nocturns i la qualitat de l'atmosfera. La irracional il·luminació artificial en la majoria de les nostres àrees urbanes ens priva del plaer de l'observació del cel nocturn i provoca canvis que alteren els ecosistemes i la nostra pròpia salut. La contaminació lumínica, és a dir, l'excés d'il·luminació nocturna o la il·luminació incorrecta produeixen un enorme malbaratament d'energia, amb la consegüent conseqüència econòmica. Aquesta irracional i ineficient il·luminació és responsable d'una notable contribució al canvi climàtic, ja que per a la seua producció s'han utilitzat combustibles fòssils.

Per a fer front a aquests problemes es plantegen iniciatives per a la

protecció del cel nocturn, com la declaració de reserves Starlight, a l'empara del Comitè de Patrimoni Mundial de la UNESCO (<https://www.fundacions-tarlight.org>). Es tracta d'una proposta sorgida de la Conferència Internacional en defensa de la qualitat del cel nocturn i el dret a observar les estrelles que va tindre lloc a La Palma a l'abril de 2007, i que es defineix com un espai en el qual s'estableix un compromís per la defensa de la qualitat del cel nocturn i l'accés a la llum de les estrelles a fi de preservar la qualitat d'aquell i dels diferents valors associats. Des de llavors s'han dut a terme nombroses iniciatives Starlight, entre elles el denominat astroturisme. Tot això ve a posar en valor la visió integral dels espais naturals.

La llum en l'origen de la vida

Carles Martín Cantarino

Dept. Ecologia

L'associació que es produeix en la nostra ment entre llum i vida és pràcticament inevitable. El mateix relat mitològic de la Bíblia sobre la creació del món, per posar-ne un exemple, s'expressa així: «Al principi, Déu va crear el cel i la terra. La terra era caòtica i desolada, les tenebres cobrien la superfície de l'oceà. Déu digué: “Que existisca la llum!”. I la llum va existir. Déu veié que la llum era

bona». Altres obres clau de la cultura universal, religioses o literàries, atorguen a la llum una importància similar en l'origen del món. Evidentment, aquesta interpretació es deu al fet que som animals diürns i la nostra psicologia vincula de manera innata els dos conceptes. Però ben mirat no es tracta d'una visió antropocèntrica; hauríem de reconèixer aquesta vinculació fins i



Bosc de roures i avets al Parc Natural de les Serres del Cadí-Moixeró. Foto: Montilac (CC BY-SA 4.0).

tot si fórem éssers nocturns: si la radiació del Sol, incloent-hi la llum, no ens arribara, o no ho fera en la mesura en què ho fa, seria difícil concebre el fenomen de la vida en el nostre planeta.

Sabem que les plantes s'«autoconstrueixen» gràcies a la llum, i és a partir d'aquesta mateixa energia lumínica, feta matèria viva en les plantes, que els animals obtenim el nodriment. Es pot dir, per tant, que quasi tota la vida és energia lumínica capturada en els enllaços de les nostres biomolècules, i que el nostre cos, el nostre metabolisme, fins i tot el nostre pensament, les idees, la civilització (les nostres societats es mantenen per l'energia dels combustibles fòssils: petroli, carbó, gas..., matèries que retenen llum fixada fa milions d'anys), són llum, energia lumínica, llum feta matèria viva i processos vius. Més encara: que les característiques fisicoquímiques del nostre planeta, el seu funcionament com a ecosfera, com a escenari i espai de la vida, són les que són gràcies a la llum, que hi actua a través del fenomen vital.

De fet, és fascinant considerar l'evolució de la vida, el desenvolupament de la biosfera, des del punt de vista de la seua relació amb la llum. Perquè, a més, els mecanismes implicats en aquesta relació, tot i la seua diversitat i complexitat d'aspectes, són bastant conservadors: ací i allà veurem els mateixos tipus de biomolècules fotosensibles adoptant una o altra funció, però sempre es troben en la base dels grans canvis evolutius de la vida al nostre planeta.

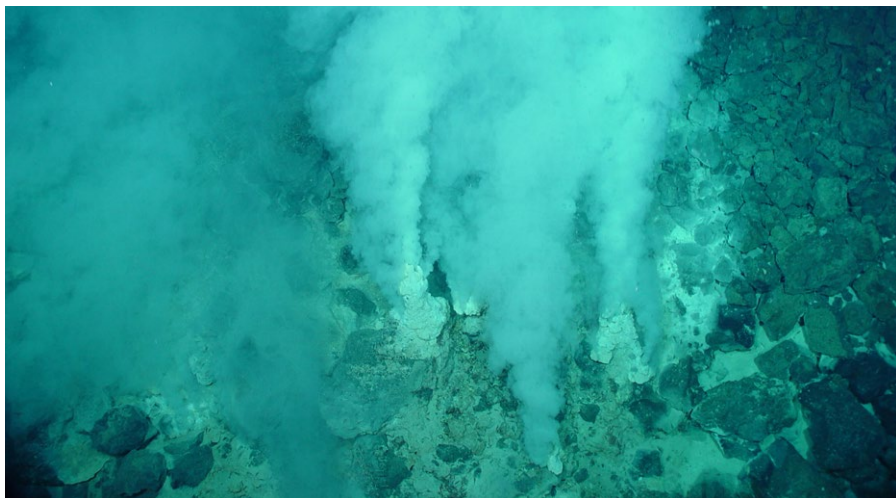
És curiós, però un altre element que associem de manera quasi inevitable amb la vida, l'oxigen (aire, respiració, alé), també està estretament vinculat amb la llum, perquè, com veurem,

sense llum no hi hauria oxigen que respirar al nostre món.

Tanmateix, la vida com a tal no implica necessàriament una relació amb la llum. No és fàcil definir què és la vida, però qualsevol intent plausible ha d'incorporar dues perspectives: com a processament d'energia (metabolisme) i com a processament d'informació. Cap d'aquests aspectes no implica necessàriament una interacció amb la llum, i de fet podem imaginar formes de vida en un medi completament fosc. D'una banda, el processament d'energia significa manipular electrons posseïdors d'alta energia per a construir biomolècules, energia que pot ser aportada pels fotons de la llum. D'una altra, el processament d'informació implica detectar partícules o ones del medi que provenen d'una determinada direcció o d'un cos determinat, interpretar la informació que aporten i que l'organisme trobe una resposta que li resulte avantatjosa (la vida és sempre interacció amb l'entorn físic). La llum pot aportar aquesta informació a un ésser viu. La major part dels éssers vius directament o indirectament usen els fotons de la llum en els dos sentits, i serien inconcebibles sense la llum. Quasi podem considerar la vida actual, almenys la immensa majoria, com un conjunt de biomolècules els enllaços de les quals estan fets d'energia lumínica i que interactuen amb el medi en bona part gràcies a la informació continguda en la llum que reben.

La llum (o la seua absència) en l'origen de la vida

Simplificant molt, podem dir que actualment hi ha dues hipòtesis bàsiques



Fumeroles blanques en les proximitats de les illes Marianes.

sobre l'origen de la vida. Una considera que la vida va aparèixer en la foscor de les profunditats dels oceans, en unes estranyes estructures hidrotermals anomenades *fumeroles blanques*: unes reaccions redox en condicions de falta d'oxigen (és important que retinguem aquesta idea), una transferència d'electrons, un gradient de protons, una síntesi de compostos orgànics... i apareix la primera cèl·lula.

Segons l'altra hipòtesi, la vida sorgeix en un món més superficial, exposat a la radiació solar, però també desproveït d'oxigen. En aquest escenari «de superfície», es considera que la llum ultraviolada d'alta energia va ser important en la generació dels compostos orgànics primordials. Però fins i tot en aquest cas no es tracta del tipus de llum que actualment manté el món viu, sinó, al contrari, d'un tipus de llum perillosa, que ara exterminaria la vida tal com la coneixem (i que afortunadament ja no hi arriba, com veurem).

El cas és que la vida, segons aquestes teories més esteses, no necessitava la llum visible per a viure (tot i que hi ha algun autor que pensa que el primer organisme va ser fotosintetitzador). D'aquesta manera, LUCA (de l'anglès *last universal common ancestor*, l'antecessor comú hipotètic de tots els éssers vius actuals) segurament no sabia què era la llum. Però atenció: la vida, com ja hem dit, no és tan sols una estructura que transfereix electrons i genera energia per a mantindre un metabolisme, sinó que és també, i ho va ser des del principi, una estructura amb capacitat de processar informació i aprendre'n. Aprendre, en termes biològics, vol dir fixar (per exemple, genèticament) els mecanismes que permeten captar circumstàncies interessants del medi i canviar el comportament per a traure'n un major profit, és a dir, que representen un avantatge evolutiu, un augment de la capacitat de supervivència. L'evolució és, per tant, una successió

d'aprenentatges. I entre els aprenentatges més decisius de la història de l'evolució hi ha els relatius a les potencialitats de la llum per als éssers vius.

La vida descobreix la llum... i el món canvia: la fotosíntesi i l'oxigen

Els primers éssers vius, com hem dit, possiblement no *sabien* què era la llum. De fet, molts microorganismes actuals poden sintetitzar els seus compostos orgànics i mantindre el seu metabolisme utilitzant reaccions químiques sense cap intervenció de la llum, en un món completament a fosques. Però la vida va *descobrir* molt prompte que la llum, ones electromagnètiques procedents del Sol, vibren en el seu entorn. I va *aprendre* de seguida a utilitzar aquesta energia que l'envoltava gràcies a la producció de pigments amb electrons excitables pels fotons solars. Aquest procés de fabricar matèria pròpia i mantindre el metabolisme gràcies a l'aportació energètica de la llum l'anomenem fotosíntesi.



Grup d'arqueobacteris, organismes unicel·lulars que també reben el nom d'arqueus.

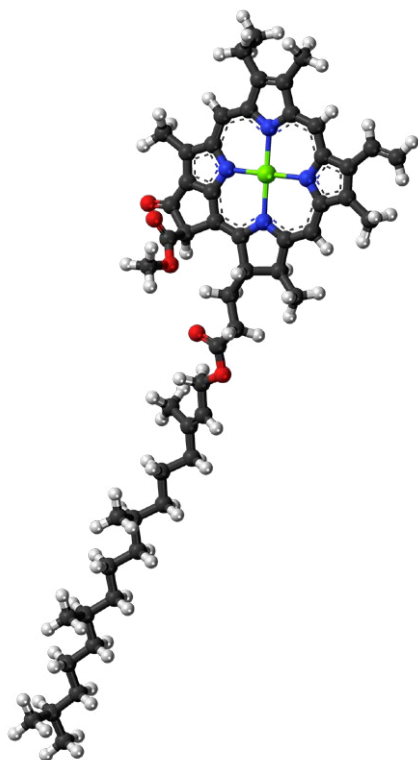
Hi ha moltes fotosíntesis en el món microbià, que utilitzen diferents materials (hidrogen, matèria orgànica, compostos de sofre o ferro) com a origen dels electrons, que augmenten la seua energia amb l'acció de la llum i generen, per tant, diferents productes residuals. Entre aquestes n'hi ha una de ben curiosa, possiblement molt primitiva, pròpia dels arqueus i alguns bacteris, que es basa en els pigments que denominem bacteriorodopsines, molt pròxims als pigments visuals dels nostres ulls (els que ens permeten veure), proteïnes la part clau de les quals és un grup retinal (la coneguda vitamina A) derivat dels compostos que anomenem carotenoides, que són coneguts antioxidants. D'altres es basen en diversos tipus de clorofil·les, la part clau –fotosensible– de les quals són compostos d'un altre grup químic: el de les porfirines.

Però la fotosíntesi que resultarà revolucionària i canviarà el món serà la que anomenem oxigènica, és a dir, generadora d'oxigen, un invent exclusiu dels cianobacteris basat en la captació de llum per part d'una clorofilla especial, la clorofilla *a*, del grup de les porfirines, com acabem de dir, o, més ben dit, un fotosistema basat en dos molècules de clorofilla *a* lleugerament diferents. El sistema és complex, i hi col·laboren, segons grups d'organismes, altres formes de clorofilla (*b*, *c*, *d*, etc.) i diversos pigments, com els carotenoides –els que hem dit que participaven, com a vitamina A, en la nostra visió i en la fotosíntesi dels arqueus– o la ficoeritrina –en les algues roges–, però en essència podem dir que l'energia de la llum s'utilitza per a extraure electrons de l'aigua –alliberant oxigen, cosa que serà ben important!– i transferir-los, a través del fotosistema, al diòxid de carboni.

D'aquesta manera, l'energia de la llum és transformada, gràcies a aquest procés d'extracció d'electrons de l'aigua, en l'energia dels enllaços químics dels compostos bioquímics sintetitzats, és a dir, en matèria orgànica.

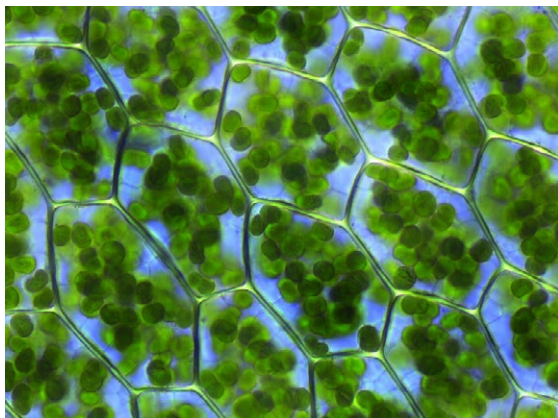
La fotosíntesi oxigènica va assolir un enorme èxit evolutiu, fins al punt que s'acabà convertint en el procés majoritari de producció de matèria viva en el nostre planeta, després d'arraconar les altres fotosíntesis i els processos químics de síntesi orgànica, que van quedar pràcticament residuals. De la clorofil·la *a*, per tant, depén la biosfera tal com la coneixem, la immensa majoria del flux de la vida, la biodiversitat existent i fins i tot la composició de la nostra atmosfera i el nostre clima. I nosaltres, els humans, i les nostres circumstàncies, com hem dit.

I un aspecte ben important és que la fotosíntesi oxigènica genera un residu que estava destinat a canviar el nostre planeta: l'oxigen. Aquest, després de milions d'anys de fotosíntesi oxigènica, va anar acumulant-se en l'atmosfera i els oceans: el nostre planeta esdevingué oxigenat, una raresa absoluta en el sistema solar. Però el més important és que la vida molt prompte va aprendre les potencialitats metabòliques d'aquest residu com a receptor d'electrons, i començà el metabolisme aerobi, que permet extraure de l'aliment (és a dir, dels donants d'electrons) quasi vint voltes més energia que el metabolisme anaerobi, el metabolisme que no es basa en l'oxigen com a acceptor d'electrons. Lògicament, el metabolisme aerobi es va convertir en poc temps en el predominant al planeta: la immensa majoria dels éssers vius actuals es basen en aquest metabolisme.



La molècula de la clorofil·la *a*, la clau de la relació entre la biosfera i la llum.

Amb aquest plus d'energia, les cèl·lules podien ja ser més grans i d'estructura més complexa. Naix la cèl·lula eucariota (la de la immensa majoria dels éssers vius actuals, també nosaltres), i després, per agrupació i organització de cèl·lules eucariotes, els éssers vius multicel·lulars (fongs, plantes, animals...). L'evolució de la vida complexa, la de la gran biodiversitat existent ara, només és possible en un ambient oxigenat; gràcies, per tant, a la llum que mou la fotosíntesi productora d'oxigen. I un fet especialment important, perquè incrementarà enormement la taxa de



La concentració de clorofil·la en els cloroplastos de les cèl·lules de les plantes tiny de verd el nostre món. Foto: K. Peter (CC BY-SA 3.0).

producció fotosintètica, serà l'aparició de les plantes, organismes eucariòtics pluricel·lulars que incorporen cianobacteris en forma de cloroplastos, i a partir d'aleshores dominaran la producció de matèria orgànica (i despreniment d'oxigen) a la Terra.

Una altra conseqüència vital de la fotosíntesi oxigènica és que l'acumulació d'oxigen en l'estratosfera va permetre l'aparició d'una capa d'ozó que impedí l'arribada a la superfície terrestre de les damnosos radiacions ultraviolades d'alta freqüència. Aquestes radiacions no únicament són perjudicials per a la vida, sinó que a més fotodissocien l'aigua en oxigen i hidrogen, el qual escapa a l'espai exterior. Sense aquesta capa d'ozó probablement ja no hi hauria aigua líquida a la Terra.

És a dir, la vida va sorgir probablement sense llum, però si no haguera après a utilitzar-la, hauria desaparegut molt prompte o seria un fenomen d'escassa importància, marginal. Potser això és el que va ocórrer a Mart.

És curiosa, doncs, la conseqüència del descobriment dels cianobacteris: a causa de la fotosíntesi oxigènica, derivada de l'acumulació d'oxigen a la Terra –o siga, gràcies a una certa manera de saber aprofitar l'energia de la llum–, ja no podrà sorgir nova vida en el planeta –és a dir, *ex novo*, no derivada d'altres formes de vida–, perquè les condicions ambientals ja no són anòxiques (d'escassetat o manca d'oxigen) i perquè ja no hi arriba la radiació UV d'alta freqüència. A canvi, però,

la vida que ja ha havia sorgit disposa a partir d'aleshores d'unes condicions òptimes per a evolucionar i diversificar-se.

Ara bé, paradoxalment l'oxigen –o, més ben dit, un grup de radicals lliures produït en el metabolisme aerobi– és tòxic per a la vida (tothom ja ha sentit parlar dels oxidants), de manera que sense la presència de compostos antioxidants els organismes aeròbics no podrien sobreviure als danys ocasionats pel metabolisme basat en l'oxigen. El més curiós és que molts d'aquests compostos antioxidants estan vinculats també al processament de la llum, d'una manera o altra. Per exemple, els carotenoides, col·laboradors de la clorofil·la *a* en la fotosíntesi, segons hem vist, o que, en forma de retinal, són la part activa dels pigments visuals i de la bacteriorodopsina de la fotosíntesi dels arqueus. O els fitocroms, que permeten a les plantes «veure» i que intervenen en la producció d'enzims que les defensen davant dels danys oxidatius i altres formes d'estrès ambiental. O els pigments

vegetals del tipus betalaïnes o del grup dels flavonoides, com els antocians. O la melatonina, molècula que apareix en quasi tots els organismes i que sembla bàsica per a la coordinació dels cicles biològics, el manteniment del sistema immunitari, etc., segons veurem.

Sembla, per tant, que hi ha una estreta relació entre molècules capaces d'interaccionar amb la llum i les funcions bàsiques de defensa de l'organisme davant les agressions internes i ambientals. No és curiós?

Un segon descobriment: la visió

El segon gran descobriment o aprenentatge de la vida sobre la llum no té a veure amb la seua capacitat energètica, sinó amb la seua capacitat de proporcionar informació. En efecte, els cossos –vius o no– tenen la propietat de reflectir una part característica de la llum que els arriba. I com que aquest patró és distint del medi que els envolta, podem saber també quina forma tenen. Així, si som capaços de saber quin és l'espectre de llum reflectit per un cos i d'on prové, podem endevinar de quin cos es tracta

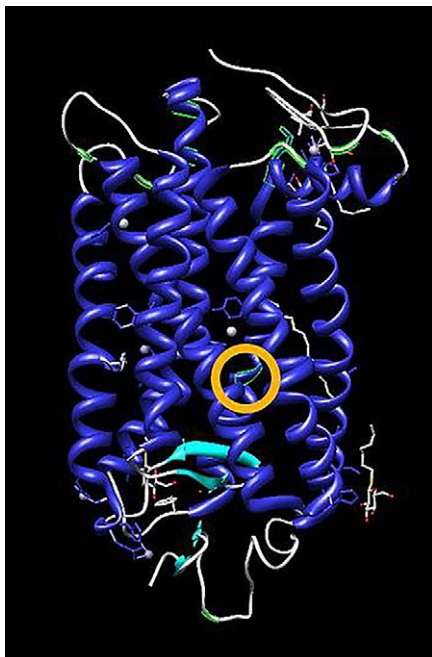
i on es troba. I això ho va *aprendre* la vida en un moment donat amb l'aparició de la visió a través d'uns òrgans cada volta més perfeccionats: els ulls.

Un ull, en essència, no és més que una estructura que capta la llum (i que distingeix quin tipus de llum) dotada, en general, d'una lent. Els animals podem veure gràcies a les rodopsines de la retina, similars a les bacteriorodopsines que permeten la fotosíntesi dels arqueus i en les quals, igualment, la part fotosensible és el retinal, un derivat dels carotenoides. Evidentment, entre els ulls dels microorganismes i l'ull complexíssim dels vertebrats o els polps hi ha tota una gradació, però el mecanisme bàsic és semblant.

Va ser un descobriment transcendent, no únicament perquè possibilita als organismes explorar millor el medi i reaccionar-hi, sinó perquè els organismes prompte van *aprendre* que, a més de veure, poden ser vistos per altres organismes, i amb això la pròpia imatge, l'aspecte, passa a ser un tret adaptatiu bàsic per als éssers vius. D'aquesta manera, els organismes adopten patrons visuals i cromàtics distingibles, bé mitjançant el desenvolupament de



Les estructures dels ulls poden ser molt variades, però es basen en mecanismes fisiològics i bioquímics similars. Fotos: Sebastianjude (CC BY-SA 3.0), D. L. Green (CC BY-SA 3.0) i T. Shahan (CC BY 2.0).



Imatge d'una rodopsina, el pigment que ens permet veure. Encerclada, la posició del retinal, el component que interacciona de manera directa amb la llum. Foto: Dasalam42 (CC BY-SA 3.0).

pigments, bé a través d'estructures que produeixen coloració estructural, com ara irisació, per a transmetre informació –destinada a atraure companys sexuals o organismes col·laboradors, per exemple– o, al contrari, per a produir patrons indistingibles del fons i així emascarar aquesta informació a possibles predadors o preses. En aquest sentit, s'han trobat proves d'estructures cromàtiques en fòssils del Cambrià (fa uns 540 milions d'anys); és a dir, almenys alguns dels animals més antics ja eren acolorits. De fet, sembla que la visió i el color van estar en la base d'aquella extraordinària radiació evolutiva que a l'inici del Cambrià, i a causa de les noves capacitats exploratòries del medi apreses per la vida –i també per l'aparició de la predació activa i, per tant, la necessitat de detectar i no ser detectat–, produí la gran majoria dels grans grups d'animals actuals.

Un altre episodi clau va ser l'aparició de plantes amb flors en el Cretaci (fa vora 145 milions d'anys),



En el Cambrià, fa més de 500 milions d'anys, apareixen els primers organismes dotats d'ulls desenvolupats. En la imatge, reconstrucció d'un *Anomalocaris*, un gran predador. Imatge: Junnn11 (CC BY-SA 4.0).

l'extraordinària i veloç diversificació de les quals hem de relacionar, sens dubte, amb el *descobriment* per part de les plantes de la visió animal (especialment la dels insectes) i l'interés a atraure'ls amb vius colors per tal d'aconseguir la pol·linització o la dispersió de les llavors. Les plantes no tenen ulls, però «saben» –han «après»– que els animals sí que en tenen. Als compostos del grup del retinal se'ls atorga una nova funció ara, la d'atraure pol·linitzadors o dispersors de llavors. Els carotens, que ens permeten veure, són també informació visual. I a aquests s'afegeixen els antocians (un tipus de flavonoides) i les betalaines. Amb aquests pigments de flors i fruits el món es torna acolorit. I ja hem vist la seua funció com a antioxidants i protectors del metabolisme aerobi.

Un episodi evolutiu que va tindre una enorme transcendència, com veurem, tot i que aparentment ens puga resultar anecdòtic, és l'adaptació dels primats superiors, entre ells l'*Homo sapiens*, a la vida diürna i la readquisició de la visió cromàtica davant la immensa majoria dels mamífers, que són essencialment nocturns i que, per tant, van perdre la capacitat de visió del color, sense utilitat en el món de la nit. Es calcula que els humans podem distingir més de set milions de colors diferents gràcies a l'estructura del nostre ull i les nostres opsines. El món humà és un món de llum, de colors. Una peculiaritat que transformarà el món.



La coloració de les flors implica l'existència d'animals amb ulls capaços de veure'ls. Foto: D. Climent.

Val a dir, de tota manera, que hem d'ampliar el concepte de visió. Les plantes, els fongs i molts altres organismes, incloent-hi els bacteris, tot i que no han desenvolupat ulls, sí que tenen visió, és a dir, obtenen informació sobre l'entorn a partir dels fotons que els arriben, de la seua direcció i del seu tipus (és a dir, de la seua longitud d'ona). En certa manera, podem dir que a les plantes, com que s'«autoconstrueixen» amb l'energia de la llum, els és més vital saber orientar-se cap a ella, dirigir-se cap a les zones on arriba més llum, o fugir-ne si és massa intensa i els pot ser damnosa. Això ho aconsegueixen gràcies a unes proteïnes anomenades fitocroms –amb grups porfirínics, com la clorofilla–, flavines –del grup dels flavonoides, ja esmentats– i fins i tot les opsines, aquelles proteïnes amb retinal (vitamina A) que, com hem dit ja, constitueixen els pigments presents en la retina del nostre ull que ens permeten veure.



Alguns organismes, pertanyents a molts grups, han desenvolupat la capacitat d'emetre llum pròpia: és el que s'anomena bioluminiscència. En les imatges, l'espectacular luminiscència produïda per certs microorganismes marins i el conegut cuc de llum o lluernà. Fotos: Wofl-commonswiki (CC BY-SA 2.0 DE) i B. Anderson (CC BY 2.0).

Fins i tot la vida ha *après* a produir llum *per se*, independentment de la del Sol, per mecanismes químics, com a senyal informatiu: apareix la bioluminiscència en molts grups d'éssers vius (cucs de llum, microorganismes, fongs, etc.), tot i que no en tots els casos en coneixem bé encara les funcions. Un camp d'investigació apassionant.

Els cicles lumínics i la mesura dels temps biològics

La llum proporciona als éssers vius informació no tan sols sobre formes, moviments i colors, sinó també sobre els cicles lluminosos del dia i de les estacions. En efecte, en el nostre planeta, i a causa dels seus moviments respecte del Sol, hi ha una variació de condicions lumíniques al llarg del cicle diari de 24 hores, i també al llarg del cicle anual de 365 dies, amb dies i nits més curtes o més llargues i les diferents intensitats lumíniques de cada moment. I com que aquestes variacions diàries

o anuals estan vinculades també a variacions climàtiques i ambientals de tot tipus, obtenir una bona informació al respecte i saber adaptar-s'hi és bàsic per a la supervivència dels organismes. I els organismes ho han *après*, evidentment, com és propi del fenomen vital.

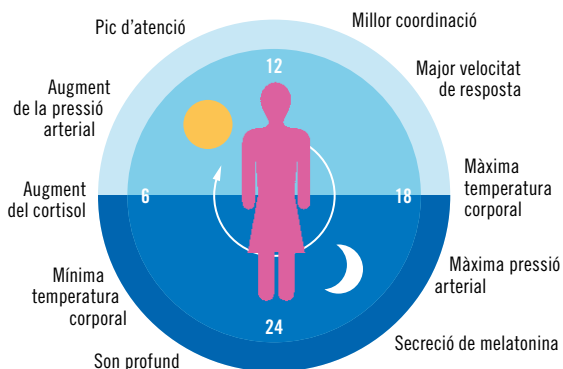
Els ulls –o, més ben dit, les estructures captadores de la llum– també aporten el que denominem visió no formadora d'imatges (NIF, per les inicials en anglès), un tipus de visió que permet ajustar el metabolisme del cos a cicles circadians i estacionals per a regular els períodes de reproducció, creixement, floració, fructificació, moviments migratoris, etc. Així, gràcies a un tipus diferent d'òpsina descoberta recentment, la melanopsina, que està en una capa interna de la retina diferent de la de la visió formadora d'imatges, s'obté informació sobre els cicles lumínics que es transmet al cervell, on, gràcies a les interaccions neuronals, se segrega una neurohormona que és una de les biomolècules bàsiques del món de la vida: la melatonina, el senyal que

permet a l'organisme saber quan és de nit i quan és de dia, diguem-ho així (se segrega en condicions de foscor), i acoblar la fisiologia a aquests ritmes (somni, pressió arterial, ritme cardíac, etc.). La melatonina s'ha trobat pràcticament en qualsevol forma de vida, tot i que acompleteix moltes funcions, inclosa, com ja hem dit, la d'antioxidant (que es pensa que va ser la seua funció inicial, quan va aparèixer el metabolisme aerobi), d'ajustament del sistema immunològic i, per tant, de defensa davant de l'estrès ambiental i intern i de malalties com la diabetis, l'obesitat o el càncer. Curiosament, es produeix especialment en la glàndula pineal, on Descartes pensava que residia l'ànima humana.

La contaminació lumínica i les seues conseqüències en l'ecosfera i la salut humana

L'ésser humà, bé que ho sabem, tendeix a antropitzar el seu medi, és a dir a adaptar-lo a les seues necessitats ecològiques. I una de les seues característiques ecològiques, com hem dit, és el fet de ser diürn, a diferència de la majoria d'espècies del grup dels mamífers.

Inevitablement, l'evolució de l'ésser humà ha estat vinculada a la capacitat de manejar el foc. No és comprensible el procés d'hominització sense tindre en compte el paper del foc. I no tan sols com a productor de calor, com a defensa contra els predadors durant la nit o



El nostre metabolisme està íntimament marcat pels ritmes circadians i estacionals, regulats per les variacions lumíniques al llarg del dia i de l'any.

per a cuinar els aliments, qüestions en què no podem entrar ara i ací, sinó per la possibilitat de prolongar la visió (el dia) durant les hores nocturnes. Així, el foc de fogueres, llars, cressols o ciris va permetre prolongar el dia –el període d'activitat humana–, fins que a finals del segle XIX apareix la llum elèctrica. En les últimes dècades, l'expansió de la il·luminació artificial ha estat tan intensa que podem dir que, especialment en el nostre hàbitat majoritari, l'urbà, però també en les zones d'urbanisme difús i a la vora de carreteres il·luminades, les hores nocturnes són més aïna una «no-nit». Com sabem, la resplendor artificial que cobreix ara bona part del planeta és visible fins i tot des de l'espai.

Però els descendents de LUCA, els éssers vius actuals, han evolucionat, ja ho hem dit, en unes condicions d'alternança de dia i nit i uns patrons lumínics concrets, també estacionals, i han desenvolupat mecanismes precisos per a adaptar-s'hi. La presència de la llum artificial (que, a més, té longituds d'ona diferents de la llum solar) causa alteracions en els



La contaminació lumínica que estem imposant al planeta, amb greus conseqüències per a la nostra salut i per a la biosfera, és visible fins i tot des de l'espai exterior. Foto: F. Tomás (CC BY 2.0).

ritmes fotosintètics de les plantes, en els seus rellotges circadians i anuals. També en els ritmes d'herbívors i pollinitzadors. I afecta, evidentment, els animals, els desorienta i els provoca alteracions fisiològiques. És un altre fenomen de «canvi global», estés per tot el planeta, les conseqüències del qual poden ser (són ja, de fet) ben greus.

Òbviament, el benestar i la salut de l'ésser humà també es veuen afectats, ja que la seua fisiologia, com la de la resta d'organismes, s'ha generat en un ritme lumínic concret, que ara estem modificant. El ritme de producció de la melatonina s'altera, es redueixen els antioxidants, s'afecta el sistema immunològic, augmenten malalties com l'obesitat, les afeccions cardíagues i fins i tot els càncers, com demostren tants estudis actuals, degut a aquesta sobreexposició a la llum, sobretot a la llum amb excés de radiacions blaves (d'alta freqüència)

dels nostres mecanismes actuals d'il·luminació artificial. La foscor, la vertadera nit, ens és necessària, tot i ser organismes diürns.

Paradoxalment, per tant, l'esforç de l'ésser humà per prolongar les condicions que li són propícies (un ambient il·luminat, diürn) està causant greus danys a la biosfera i al seu propi benestar. En realitat, és una mostra més, entre tantes altres, de com la persecució desmesurada del benestar per la nostra espècie està posant-nos en perill, sense adonar-nos que som producte evolutiu d'una ecosfera concreta.

Hem de reflexionar molt sobre la dependència que, com a espècie –igual que qualsevol altre organisme resultat de la interacció evolutiva al llarg de milions d'anys–, tenim de la llum i la biosfera. No com una mera disquisició biològica, sinó com un assumpte vital per a nosaltres, els éssers vius.

La visió humana

Valentín Viqueira Pérez

Dept. Òptica, Farmacologia i Anatomia

La visió és el sentit més desenvolupat en els éssers humans, i podem dir que resulta fonamental en la nostra vida diària. Aquesta no és una característica comuna a tot el regne animal, ja que hi ha altres espècies en què l'olfacte o l'oïda poden ser més determinants que la visió. Amb la visió extraïem molta informació útil del món que ens envolta, fet que ens permet detectar i reconèixer objectes, situar-los en l'espai, calcular-ne els moviments i trajectòries, etc. A partir d'aquesta informació podem prendre decisions. En definitiva, la visió ens facilita una adaptació plena a l'entorn que ens rodeja.

Hui dia sabem que la visió és un procés de percepció a partir de la llum que arriba als nostres ulls, però en l'antiguitat clàssica es pensava que eren els ulls els que d'alguna manera exploraven el món exterior, i aquesta creença es va mantindre durant centenars d'anys. No va ser fins al segle X que el gran científic àrab Alhazen va establir l'evidència que és la llum la que crea imatges a l'interior dels nostres ulls.

Com funciona la visió?

La utilitat de la visió està en el fet que permet determinar de manera precisa

quins objectes ens envolten i on se situen dins del nostre entorn, i encara que sovint pensem que veiem amb els ulls, en realitat veiem amb el cervell: aquells són només una part del nostre sistema visual. Els ulls inclouen un sistema òptic relativament senzill que focalitza la llum sobre les dues retines, de manera que en cadascuna d'aquestes es projecta una imatge del món exterior. La retina presenta una estructura molt complexa que inclou una capa de fotoreceptors – els cons i els bastons – capaços de convertir l'energia lluminosa en impulsos elèctrics que es transmeten neurona a neurona fins al cervell, i més concretament fins al còrtex visual primari, una àrea situada a la part posterior del cervell, en el lòbul occipital.

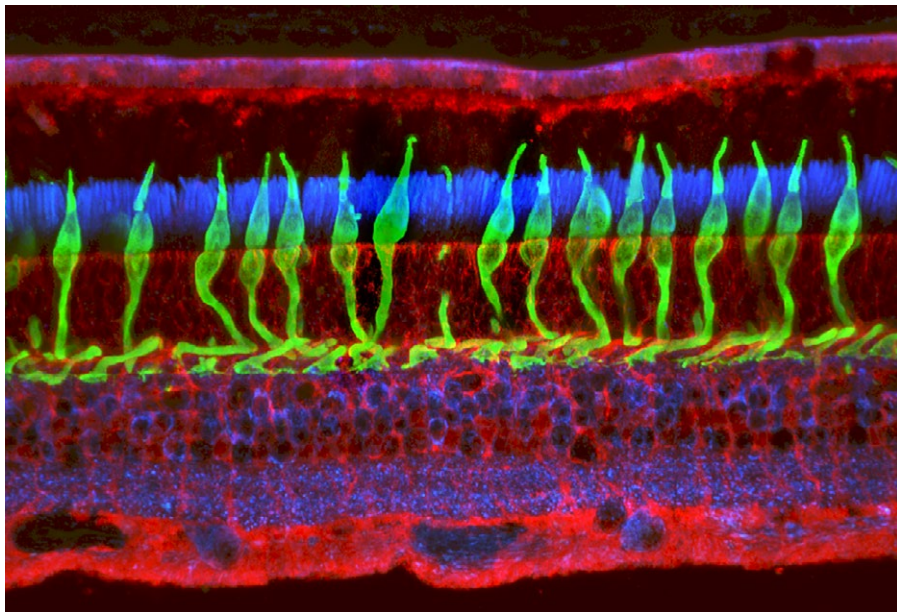
En contra del que podríem pensar, la retina no presenta una distribució homogènia de fotoreceptors, i aquest fet està relacionat amb la manera en què funciona el nostre sistema visual.

La capa de fotoreceptors és un mosaic de cèl·lules format pels cons i els bastons, denominats així per la forma del seu segment extern. Com acabem d'indicar, els uns i els altres no es distribueixen uniformement al llarg de la retina, i es poden diferenciar diverses regions en el fons retinià. En la perifèria abunda els bastons, mentre que la densitat

de cons és molt baixa (4.000 o 5.000 cons/mm²); en canvi, en la zona central de la retina la concentració de cons és màxima (fins a 150.000 cons/mm²). Aquesta regió és la fòvea, encarregada d'analitzar els detalls fins de la imatge i la percepció dels colors. Així, la percepció de color depén d'una xicoteta regió de la retina central. La resta de la retina percep en blanc i negre.

Hi ha, per tant, àrees diferencials en la retina: una petita zona circular central encarregada de processar el color i els detalls fins de la imatge, i una gran àrea perifèrica en la qual la capacitat de distingir detalls és molt menor, i encara que ací la visió de color no existeix, hi ha ràpides respostes a objectes en moviment i una bona percepció amb nivells d'il·luminació molt baixos.

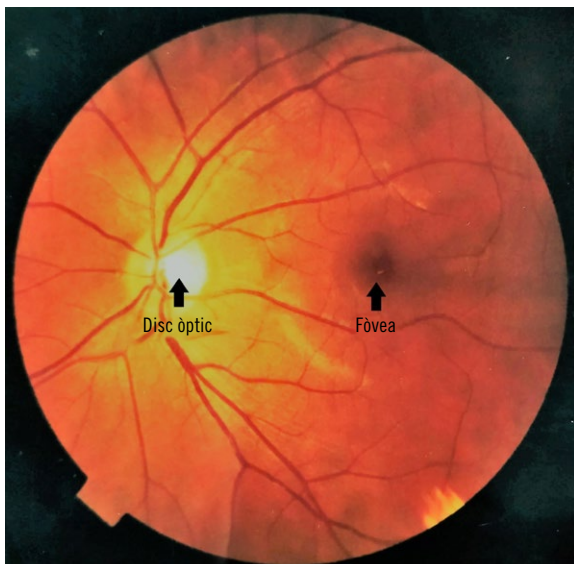
Tots els cons i tots els bastons estableixen connexions amb les cèl·lules bipolars, i aquestes al seu torn es connecten amb les cèl·lules ganglionars. Tant les unes com les altres són neurones: cèl·lules del cervell especialitzades a transmetre i processar la informació extreta del món exterior. Entre aquestes dues capes de neurones també se situen les cèl·lules horitzontals i les cèl·lules amacrines, que estableixen connexions en un pla horitzontal, mentre que les bipolars i les ganglionars es connecten en direcció vertical, que és la direcció principal de transmissió. El resultat final és un alt grau d'interconnexió entre neurones pròximes, de manera que s'estableix una autèntica xarxa que interconnecta àrees pròximes de la retina. No s'avalua la resposta a la llum d'un



Fotografia al microscopi electrònic de la retina humana. En color verd s'hi poden apreciar els cons.
Imatge: N. Cuenca.

fotoreceptor de manera aïllada, sinó que s'avalua la resposta en relació amb punts pròxims de la imatge. Es codifica el contrast, no els valors absoluts de luminància. Aquesta característica de la retina implica que un procés molt important per a la visió com és el reconeixement de vores es produïa ja a aquest nivell i no en àrees superiors del còrtex visual.

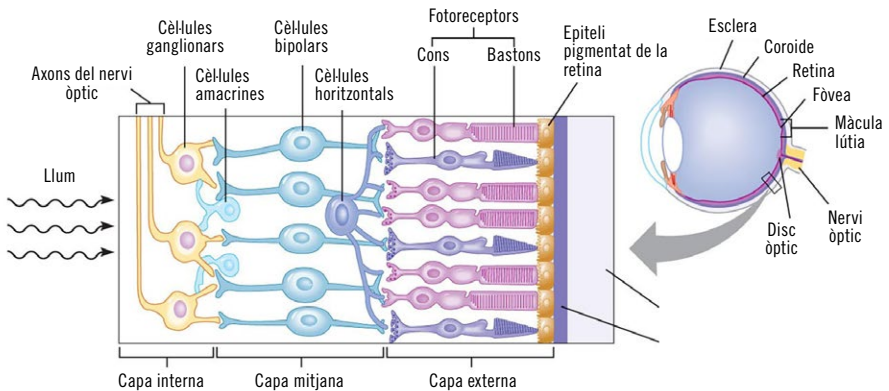
Les neurones ganglionars de la retina prolonguen els seus axons dins del cervell fins al nucli geniculat lateral, i des d'allí s'estableix una nova connexió fins al còrtex visual, on es processa i s'integra la informació. No obstant això, en contra del que podríem pensar, la informació extreta de les imatges retinianes no es transmet punt a punt, sinó que la informació referent a color, forma, moviment, profunditat, etc., es fa separadament. Hi ha diversos sistemes paral·lels que transmeten aquesta informació de manera més o menys independent, però serà finalment en el còrtex visual on s'establisquen mecanismes per a integrar tota aquesta informació. En el còrtex hi ha diferents àrees connectades entre si, i en cadascuna d'aquestes es processa una part específica de la informació. Per exemple, en l'àrea V4 es processa la visió de color, en l'àrea MT es processa la visió de moviment, etc. En cadascuna d'aquestes àrees es manté un mapa retinotòpic o mapa de posicions en la retina.



Aspecte de la retina d'un ull normal. S'indica la posició de la papil·la (punt d'eixida de la informació cap al cervell) i la fòvea (zona de major concentració de cons).

El còrtex visual

La visió serveix per a comprendre el món exterior i relacionar-se amb el medi, de manera que hi ha dues preguntes bàsiques que el sistema visual ha de respondre davant qualsevol situació: «què és?» i «on està?». A partir de les respostes a aquestes preguntes plantejarem les nostres accions. Així, en el còrtex visual es poden identificar dos corrents de processament principals encaminats a respondre a aquestes preguntes i, d'aquesta manera, detectar i identificar objectes dins de l'escena. El corrent *what*, que es prolonga pel lòbul temporal del cervell, i el corrent *where*, que ho fa a través del lòbul parietal. A més, aquests processos estan fortament influïts per la memòria o aprenentatge previ del subjecte. De fet, la memòria



La retina humana inclou els fotoreceptors (cons i bastons) i diverses capes neuronals encarregades de transmetre la informació cap al cervell. La llum travessa tota la retina fins arribar als fotoreceptors, on l'energia lluminosa es transforma en un senyal elèctric que es transmet a les cèl·lules horitzontals, i des d'aquestes a les cèl·lules ganglionars. Totes les cèl·lules ganglionars s'uneixen formant el nervi òptic, que envia tota la informació cap al cervell.

és clau a l'hora d'identificar objectes coneguts. A més, a aquests objectes coneguts els assignem un color i una grandària fixa, d'acord amb les nostres experiències anteriors. Un exemple el trobem en el fenomen de constància de color, pel qual assignem un determinat color a un objecte conegut, i a pesar que hi haja canvis de color en aquest objecte provocats per variacions en la il·luminació, el nostre cervell tendeix a ometre aquests canvis i a mantindre la percepció del color assignada per la memòria i l'aprenentatge.

Compressió de la informació visual

Un altre procés important en la retina està relacionat amb la manera de tractar tota la informació procedent de les imatges en les dues retines. El sistema visual no processa tota la informació punt a punt, sinó que s'estableix un

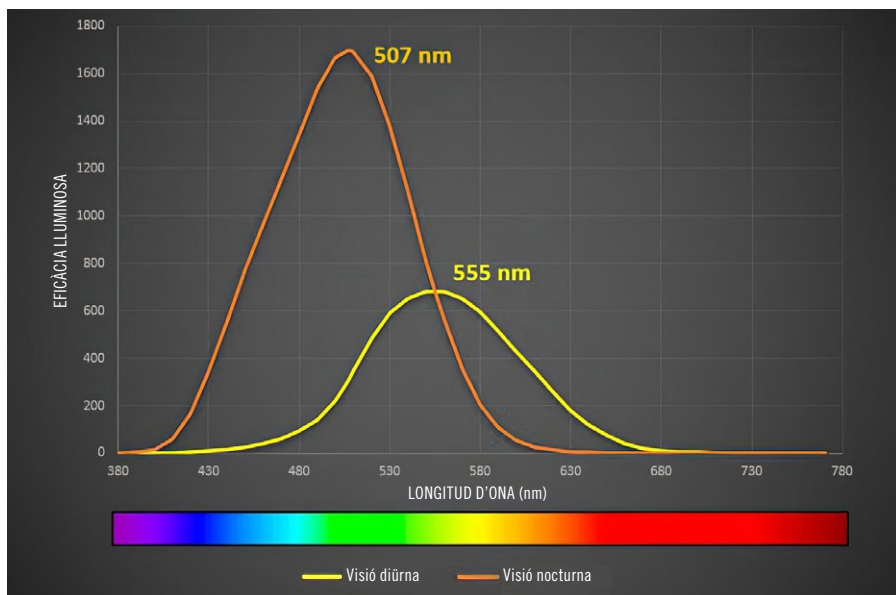
processament selectiu. En primer lloc, es dona molta més importància a la informació procedent de la fòvea, la zona central de la retina i on es projecta el punt de la imatge al qual estem mirant (punt de fixació). Aquest procés, conegut com augment foveal, assegura que el sistema dona sempre més importància a l'objecte que és focus de la nostra atenció. L'explicació fisiològica a aquest fet és que els cons de la retina central tenen connexions 1:1:1, és a dir, un únic con connecta amb una única bipolar, que al seu torn connecta amb una única ganglionar. Aquesta situació únicament ocorre en la retina central. En la retina perifèrica diversos centenars de bastons comparteixen una sola connexió. Es produeix, per tant, una forta compressió de la informació. Això implica que hi ha pèrdua d'informació, però per contra això afavoreix una velocitat de processament més alta en el còrtex visual.

Visió nocturna i visió diürna: l'efecte Purkinje

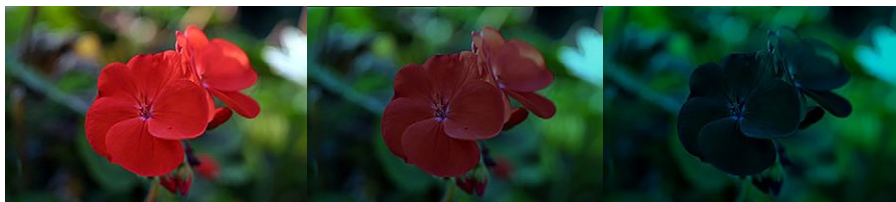
La visió humana resulta molt versàtil, ja que som capaços de veure en condicions d'illuminació molt variades. Podem veure a plena llum del dia i podem veure també en una nit clara amb lluna plena. En el primer cas, la luminància és de 10^6 cd/m², mentre que en el segon és de 10^{-2} cd/m². Probablement aquesta característica és una conseqüència evolutiva: l'espècie humana prové d'animals amb hàbits nocturns.

Fisiològicament, això és possible perquè realment la retina incorpora un doble sistema per a poder treballar en condicions d'alta i baixa il·luminació.

Les connexions dels cons i les dels bastons són independents, de manera que funcionen com dos sistemes separats. Quan la il·luminació és alta, funciona el sistema fotòpic, les entrades o els *inputs* del qual són els cons, uns receptors de llum o fotoreceptors que solament funcionen en aquestes condicions. Si la il·luminació baixa, es desactiven i comença a funcionar el sistema escotòpic, les entrades del qual són els bastons, que com hem vist presenten unes interconnexions amb les cèl·lules bipolars i ganglionars que permeten sumar les seues respostes, en un fenomen conegut com a sumació espacial. Això fa que en situacions de poca il·luminació, en deixar de funcionar



Durant el dia els fotoreceptors actius són els cons. La seua corba de sensibilitat té el màxim de sensibilitat en 555 nm (un color verd), mentre que la sensibilitat és més baixa per als blaus i els rojos. Amb baixa il·luminació els cons no funcionen, i els bastons passen a ser els fotoreceptors actius. La seua corba de sensibilitat és la del màxim en 507 nm (un verd blavós). La sensibilitat a la nit augmenta per al blau i disminueix per al verd i per a la resta de colors.



De dia, la flor roja és tan lluminosa com la blanca del fons, o fins i tot més. De nit, en canvi, es mostra bastant més fosca. Foto: L. Collard, adapt. D. Lyon.

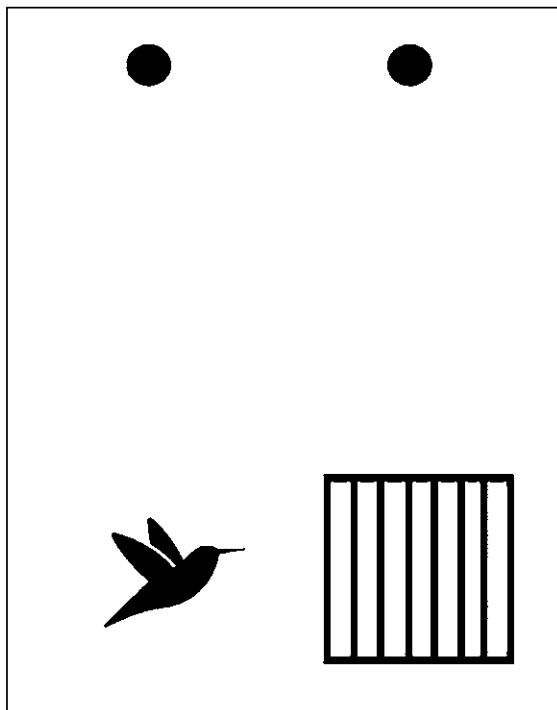
la fòvea, deixem de percebre el color dels objectes. Per això, com ens recorda el refranyer, de nit «tots els gats són negres».

Suposem que tenim dos objectes, un de roig i un altre de blau. En una situació amb alta il·luminació presentarien diferent color, però la mateixa

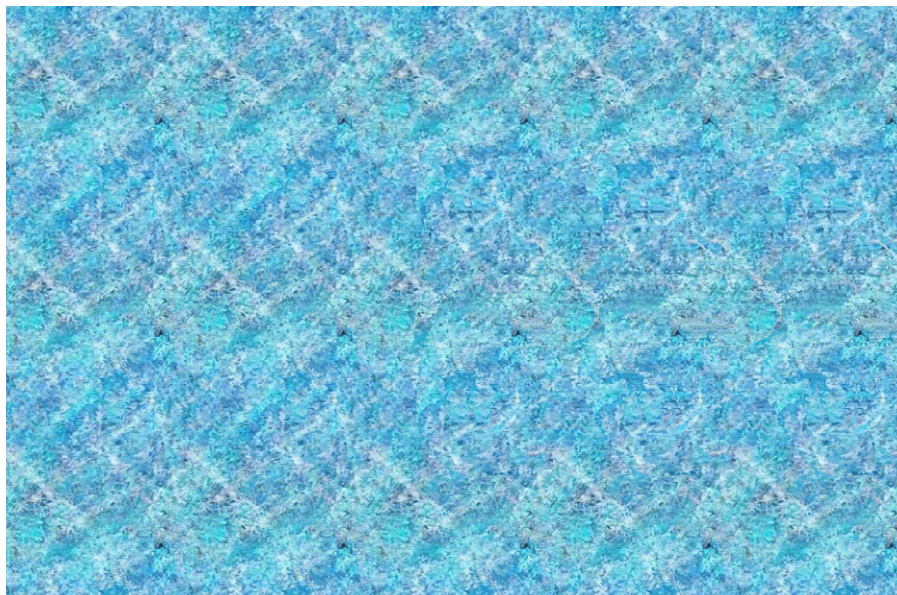
lluminositat; no obstant això, si els observem en un ambient escotòpic –en penombra– deixarem de percebre el color, però també observem que el blau es veu bastant més lluminós. L'explicació està en el fet que la corba de visibilitat dels bastons presenta el màxim desplaçat cap a les longituds d'ona curta (blaus) i molt baixa sensibilitat en la zona dels rojos. Es tracta del denominat efecte Purkinje, que demostra que cons i bastons funcionen com dos sistemes de manera bastant independent.

La visió binocular i els estereogrames

Igual que molts altres animals, els éssers humans tenim dos ulls, i el cervell ha de coordinar i integrar la informació de tots dos en



Il·lusió òptica. Col·loca la punta d'un llapis entre els dos punts, mira cap als punts mentre enfoques la vista en la punta del llapis i te l'acostes progressivament cap al nas. Quants punts hi ha? Repeteix l'experiència amb les figures inferiors. On està l'ocell, dins o fora de la gàbia?

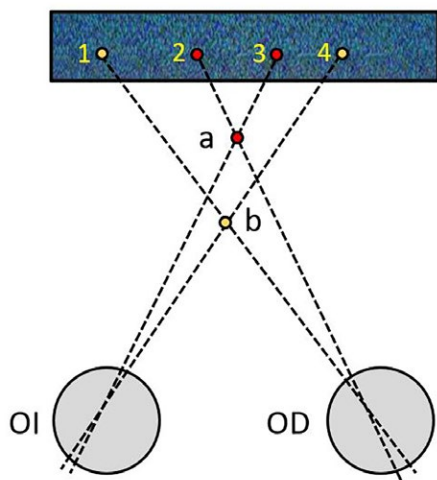


Estereograma de punts aleatoris. En la zona central apareixerà un objecte en 3D. Posa't prop de la imatge i mira a l'infinit. Font: Easystereogrambuilder.com.

una sola imatge. Aquest procés d'integració es coneix com *visió binocular*. La binocularitat aporta certs avantatges, ja que implica una millora molt notable –respecte a la visió monocular– en la percepció de les posicions i les distàncies entre els diferents objectes dins de l'escena. Això és possible perquè les imatges proporcionades pels dos ulls són lleugerament diferents: podem comprovar-ho fàcilment mirant a un punt fix en la llunyania i fent l'ullet alternativament un ull i un altre. Pel que fa als inconvenients, el fet que siga necessari superposar els dos camps visuals fa que es reduïska el camp visual total en comparació amb altres animals que tenen els ulls en posició lateral.

Perquè hi haja visió binocular són necessàries tres condicions: els ulls han

d'estar situats frontalment, de manera que els seus camps visuals es puguin superposar, els músculs extraoculars han de moure els ulls fins a col·locar-los en una posició que permeti superposar totes dues imatges i, finalment, el cervell ha de tindre la capacitat de fusionar-les. Per a fer-ho, el nostre cervell pren una referència en cada ull: el punt de fixació que actua com a centre de cada imatge. A partir d'aquests dos punts, el cervell actua per a integrar les dues imatges en una sola. Generalment ho aconsegueix, però no sempre: en la imatge de la pàgina anterior hi ha dos punts separats una certa distància; si col·loquem la punta d'un llapis enmig de tots dos i ens l'anem acostant lentament cap al nas, arriba un moment en què percebem tres punts en lloc de dos. Una cosa semblant ocorre amb l'ocell



En el patró de punts aleatoris, el nostre cervell reconeix com a iguals els punts 2 i 3, així que fusiona totes dues imatges i les situa on es creuen les dues trajectòries (punt *a*). La posició del punt *a* està per davant del pla de l'estereograma: es veurà en relleu i per davant d'aquest. Fent el mateix raonament per als punts 1 i 4 obtenim un altre pla de profunditat addicional.

i la gàbia: acostant el llapis al nas ara sembla que l'ocell es fica dins la gàbia. Què ha passat? Els ulls no estan situats convenientment i el nostre cervell és incapaç de fusionar correctament les dues imatges.

Aquests presumptes errors en la percepció s'aprofiten per a crear aquelles figures ocultes que coneixem com estereogrames de punts aleatoris. Es tracta d'imatges planes (en paper o en una pantalla) en les quals es pot percebre algun objecte en tres dimensions. Hi ha un objecte amagat que solament apareix quan s'observa en les condicions adequades. En l'estereograma reproduït en la pàgina anterior aparentment no hi ha res, només un núvol de

punts distribuïts a l'atzar, però en realitat no és així: entre tots aquests punts hem amagat una figura. Alguns dels punts no estan col·locats a l'atzar, sinó que estan col·locats en posicions molt concretes. En realitat, hi ha dues figures quasi iguals i lleugerament desplaçades l'una de l'altra, com ocorre en el món real amb la imatge de l'ull esquerre i de l'ull dret. Si mirem la figura mantenint la vista en l'infinít mentre ens l'anem acostant lentament al nas, el nostre cervell «descobreix» aquestes imatges dins de l'entramat aleatori i les fusiona col·locant-les en la posició corresponent, és a dir, per davant o per darrere del pla de fons. En la il·lustració de l'esquerra es veu una explicació simple d'aquest procés: en tractar de fusionar dos punts que el cervell identifica com a iguals, necessàriament els col·loca en una posició per davant del paper. Apareix l'objecte en tres dimensions. No és un objecte real, no existeix aquell volum. No obstant això, el veiem.

En resum, el procés de la visió és altament complex: el cervell rep molta informació des de les retines i intenta compondre una escena real amb diferents objectes amb les seues formes, colors, textures, situats en diferents posicions, amb il·luminacions que provoquen ombres, enlluernaments, amb objectes en moviment, etc. A vegades ho aconsegueix, a vegades no, i quan no ho aconsegueix tracta de buscar una nova interpretació de l'escena, en un bucle continu. Un procés fascinant, on també intervenen la memòria i els records. Un procés necessari per a poder relacionar-nos amb el món que ens envolta.

Un món de colors

Dolores de Fez Saiz

Dept. Òptica, Farmacologia i Anatomia

La llum que ens envolta està composta per múltiples longituds d'ona, una part de les quals el nostre sistema visual és capaç de percebre com a colors. La majoria de la població percep els colors de la mateixa forma, però un 8% té alguna alteració de la visió del color i interpreta els colors de manera diferent.

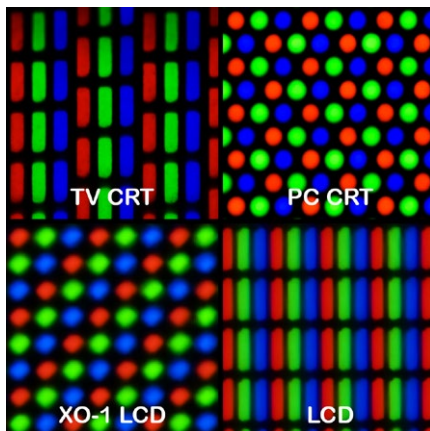
Quan treballem amb aparells en els quals es reproduïen colors (monitors, impressores, projectors, etc.), el procés de representació d'aquests colors segueix els mateixos principis que el nostre sistema visual: qualsevol color s'ha d'especificar mitjançant tres variables. En el sistema visual s'utilitza, per exemple, el senyal dels tres tipus de cons de la retina o els tres descriptors perceptius, com claredat, croma i to. En la colorimetria industrial s'especifiquen les quantitats de roig, verd i blau en cada píxel d'un monitor o els tres valors triestímul que es poden obtenir amb un colorímetre.

La colorimetria instrumental

L'exemple clàssic en colorimetria instrumental és la pantalla d'un monitor. Una pantalla està constituïda per píxels, formats per petits punts lluminosos

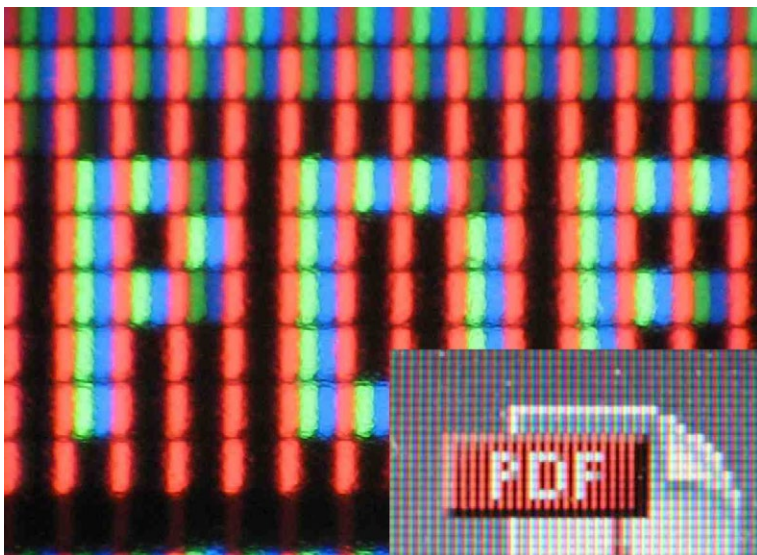
que poden estar més o menys il·luminats: fòsfors en un CRT (*cathode ray tube*, tub de raigs catòdics), cristalls en un LCD (*liquid crystal display*, pantalla de cristall líquid)... Els denominem primaris RGB en general perquè tots coincideixen que són roig, verd i blau. Aquests primaris s'ordenen en grups de tres molt xicotets, de manera que per a reproduir un color en un píxel s'encenen amb més o menys intensitat cadascun dels primaris.

La intensitat d'encesa de cada primari, és a dir, la major o menor emissió de llum, ve determinada per l'anomenat



Diferents configuracions de primaris RGB.

Foto: P. Halasz (CC BY-SA 3.0).



Imatge formada per l'encesa en diferents proporcions dels primaris de la pantalla.

nivell digital, i és la targeta gràfica de l'ordinador l'encarregada de controlar el nivell digital corresponent a cada una dels milers d'unitats que conformen la pantalla. La targeta gràfica de l'ordinador treballa amb 256 nivells de llum per a cada primari, numerats del 0 al 255; no obstant això, una mateixa combinació de nivells digitals, posem per cas [100 150 200], no genera exactament el mateix color en tots els monitors. Només cal pensar, per exemple, en quan comparem la mateixa imatge en els televisors exposats en qualsevol botiga.

Si el que volem és reproduir de manera precisa un color particular, hem de caracteritzar colorimètricament el monitor. El procés de caracterització colorimètrica implica construir un model matemàtic que relacione aquests descriptors, dependents de l'aparell (nivell digital de cada primari), amb

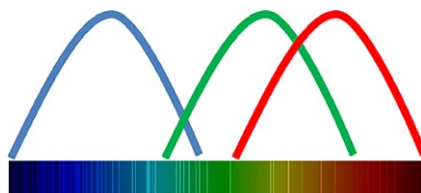
els descriptors dels colors (per exemple valors triestímul o claredat, croma i to). Aquest model matemàtic ens proporciona l'anomenat perfil colorimètric del dispositiu. D'aquesta manera, per a obtenir un color en aquest dispositiu sabrem exactament quins nivells digitals s'han d'encendre. I donat un conjunt de nivells digitals, sabrem quin color s'està representant.

La colorimetria visual i les anomalies de la visió del color

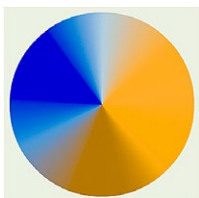
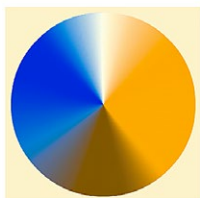
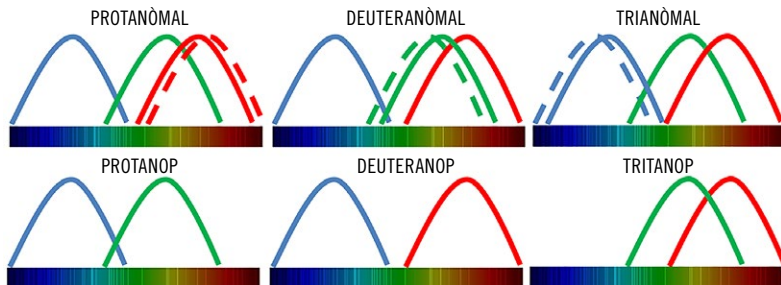
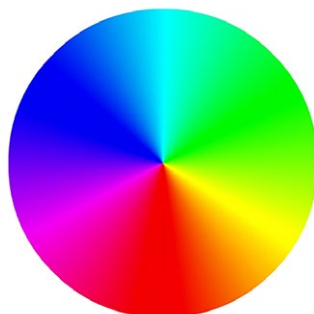
La majoria de la població humana té tres tipus de cons en la retina. Les corbes de resposta de cada tipus de con abasten quasi totes les longituds d'ona, per la qual cosa cada con és capaç de respondre a pràcticament tot l'espectre. Ara bé, aquesta resposta és màxima en una banda determinada de longituds d'ona

i és més negligible com més ens allunyem d'aquest màxim. Els màxims de sensibilitat estan centrats en longituds d'ona llarga (L), mitjana (M) i curta (S). El nostre cervell rep els senyals que li arriben dels tres tipus de cons i els compara, i d'ací extrau la percepció del color. Som capaços de percebre una gamma molt extensa de colors en l'espectre de la llum visible (milions de colors).

Els subjectes dicròmates i anòmals (daltònics, com se'ls coneix popularment) confonen colors d'aquesta gamma visible, però en diferent grau. Mentre que el dicròmat només disposa de dos tipus de cons, l'anòmal té els tres, encara que un d'ells no funciona com en el subjecte normal. Això produeix una gamma reduïda dels colors percebuts en els dos tipus de subjectes. A més, l'aspecte que tenen els colors



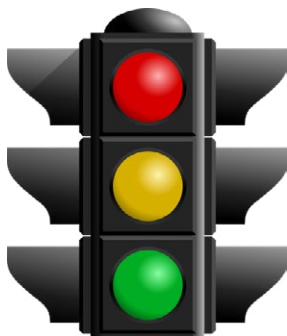
NORMAL



Dalt: corbes de resposta dels diferents tipus de cons per a subjectes normals, anòmals (tres cons, però un amb la corba de resposta desplaçada) i dicròmates (dos cons). Baix: simulació de la percepció dels tres tipus de dicròmates.



A



B



C

Exemples de situacions en les quals els subjectes dicròmats poden tindre problemes de reconeixement deguts a la pèrdua de discriminació de colors. Il·lustracions: D. Herreaz (A), Pixabay (B) i Fauna Demente (C).

que perceben no és com el que tenen per al subjecte normal, tot i que a vegades els noms que els donen siguen els mateixos.

Les persones dicròmats amb problemes en cons L i M (protan i deutan) tenen una percepció de colors dins de la gamma de blau i groc. Tots els colors amb longitud d'ona mitjana-alta es perceben com groguencs, i els colors amb longitud d'ona mitjana-baixa es perceben com blavosos. Les persones amb problemes en cons S (tritan) tenen una percepció en colors en la gamma roig i verd blavós.

En el cas de tractar-se de subjectes anòmals, la gamma de colors percebuts és més àmplia que per als dicròmats, però sense arribar a ser com la dels subjectes normals, ja que continuen confonent colors que el subjecte normal diria que són diferents.

Encara que de moment no es coneix cap cura o ajuda visual eficient, és primordial conèixer l'estat de la visió del color, ja que ens afecta en la nostra vida diària. La pèrdua de discriminació de colors pot impedir certes activitats basades en codis de colors, per exemple la identificació de línies de metro, semàfors, etc. Durant l'etapa escolar s'utilitzen materials docents amb un alt grau d'informació acolorida, per la qual cosa seria desitjable separar el rendiment acadèmic de l'anomalia en la visió del color.

Al llarg de la seua vida, la major part de les persones amb aquesta mena d'anomalties van desenvolupant pistes per a identificar colors. Per exemple: en els semàfors aprenen a identificar el significat de la llum per la posició i no pel color; en imatges amb una àmplia gamma de colors, per als anòmals

tipus deutan els verds semblen més foscos que els rojos, encara que tots dos es perceben dins de la gamma dels grocs, i moltes vegades són capaços d'anomenar-los correctament (llevat que hi haja rojos foscos, que anomenen verds també). Però aquests trucs no permeten falsejar els resultats d'un test de detecció d'alteracions de la visió del color.

Què ens diu la colorimetria sobre les ajudes visuals per als dicròmates?

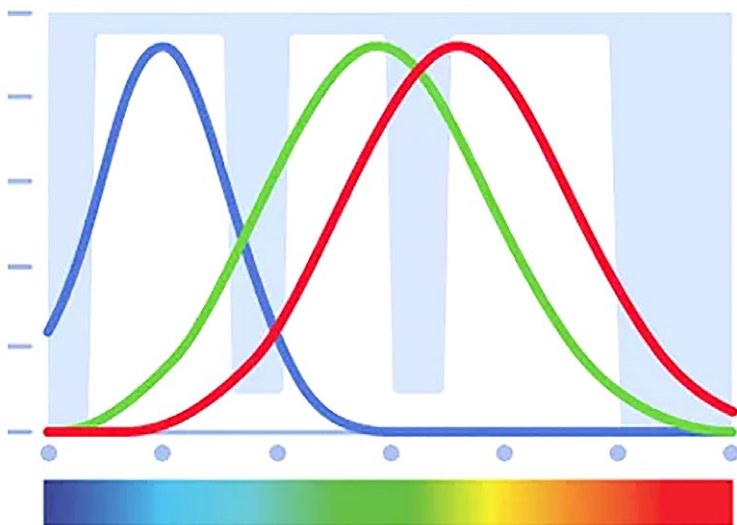
És possible que hages sentit parlar de les ulleres per a «curar» les alteracions de la visió del color. Parlem una mica sobre aquesta «moda».

Qualsevol filtre acolorit, per exemple els usats habitualment com a ulleres de sol, modifica els colors (tons) i la intensitat lluminosa (lluentor) que percebem quan mirem a través seu. Ens ha

de quedar clar que els filtres no poden afegir res a la llum que venia de l'objecte, l'única cosa que fan és llevar part d'aquesta llum, la dels colors que el filtre no deixa passar. Només la cromaticitat grisa és capaç de preservar els colors originals canviant únicament la lluentor de l'escena.

Què fan les ulleres recomanades per a dicròmates? Simplement modifiquen les gammes de colors percebudes, com qualsevol altre filtre acolorit, però no poden solucionar el problema, si bé no descartem que hi haja situacions en què puguin ajudar lleugerament en la percepció d'alguns colors. Els filtres usats en aquestes ulleres solen presentar tres bandes de transmitància en altes, mitjanes i baixes longituds d'ona, intentant imitar els tres tipus de cons.

Això pot ser equiparable a la informació que arribaria dels tres tipus de cons d'un subjecte normal? La veritat



Bandes de transmitància (en blanc) de la ullera EnChroma, amb les corbes de resposta dels tres tipus de cons.

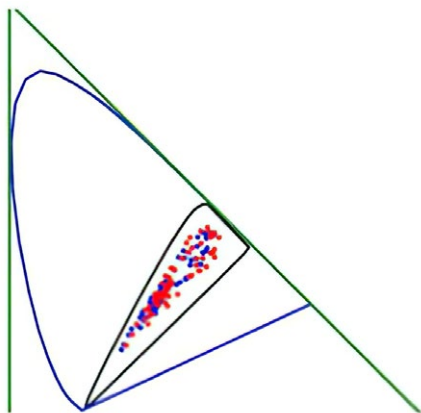


Diagrama cromàtic CIExy 1931. La gamma de colors que existeixen està limitada per la línia blava. La gamma de colors dels anòmals roig-verd correspon a la línia negra. Punts blaus: colors percebuts sense ullera. Punts rojos: els mateixos colors percebuts amb ullera.

és que no. Tot i que la llum que arriba a la retina del subjecte dicròmata té tres parts, tres «blocs» originats per les tres bandes de transmissió, continua sent arreplegada per dos cons només. El cervell del dicròmata es troba sempre amb dos senyals a partir dels quals ha d'interpretar el color, tant amb les ulleres posades com sense. Òbviament, però, el filtre de la ullera ha canviat parcialment aquests senyals en eliminar part de l'espectre.

Si representem en un diagrama cromàtic la gamma de colors que existeixen, obtenim la figura delimitada per la línia blava en el gràfic superior. Els

colors espectrals (una longitud d'ona) se situen en la mateixa línia, mentre que els colors obtinguts amb mescles se situen dins d'aquesta línia. Si afegim ara la gamma de colors que pot percebre un dicròmata (línia negra en la figura), veiem que és molt més reduïda que per a una persona normal. En la mateixa figura hem simulat els colors de l'atles de color Munsell: en blau els colors percebuts sense ullera i en roig amb ullera, per als anòmals roig-verd (deutan i protan). Es pot comprovar que la gamma de colors percebuda amb la ullera canvia i pot ser lleugerament major que la gamma percebuda sense la ullera. En cap cas, però, l'increment que s'experimenta excedeix de la gamma de colors que pot percebre l'anòmal.

Tot això es tradueix en un xicotet canvi de to o lluentor, però no en el sentit de produir un color que el subjecte abans no era capaç de veure. El que ocorre és que, dins de la gamma que pot percebre, ara s'assembla més a un altre color que a l'original. Determinats efectes poden semblar subjectivament espectaculars per a alguns subjectes, ja que els permet tindre sensacions diferents d'algunes escenes, però la veritat és que, encara que aquests canvis en colors poden ajudar a diferenciar objectes, també poden tindre l'efecte contrari i portar a confondre'ls, ja que ara el color s'assembla a un altre que també podria estar en l'escena.

Alguns efectes òptics de la vida quotidiana

Sergi Gallego Rico

Dept. Física, Enginyeria de Sistemes i Teoria del Senyal

Per als humans, la llum és un dels mitjans que més influeixen en la nostra manera de percebre i relacionar-nos amb l'entorn, tant el pròxim com el llunyà. Ens permet veure des d'un àtom fins als confins de l'Univers visible, d'on ens arriba informació del que va passar fa milers de milions d'anys. Ens relacionem amb la llum d'una manera constant, però pràcticament inconscient. Normalment no ens plantejem preguntes profundes al voltant de la seua naturalesa, però cada matí ens mirem a l'espill i repassem el nostre aspecte físic: els cabells, algun pèl indiscret, les pigues, etc.

Quan ens prenem amb una canyeta l'aiguallimó que tant ens refresca, si algú ens observara veuria com si la canyeta estiguera partida just per on entra dins del líquid. Després de ploure, si un raig de sol aconsegueix obrir-se pas entre els núvols, apareix l'arc de Sant Martí amb el seu explosiu colorit. A més, si observem atentament aquest fenomen, podem veure un arc secundari per damunt del principal, menys intens i amb l'ordre dels colors invertit. Si mirem els núvols notarem que uns són més blancs i altres més obscurs. El cel canvia el seu blau esplèndid i radiant de migjorn pels tons vermellors del capvespre. Els dies de calor sufocant, des del Montgó

podem veure enlairar-se l'illa d'Eivissa per damunt de la mar, o Tabarca des del cap de Santa Pola, per posar alguns exemples prou coneguts.

Els dies de fred podem quedar bocabadats amb el parheli que produeixen els cristalls de gel de l'atmosfera, i tenint moltíssima sort podrem presenciar un paraselene o parantheli. Si pugem a alguna de les nostres muntanyes un dia de boira, no ens espantem si veiem la nostra ombra magnificada i fantasmagòrica envoltada d'un cercle de llum: és el denominat espectre de Brocken.

Tots aquests fenòmens, de vegades sorprenents, tenen una explicació científica que intentarem exposar en aquest capítol, en el qual buscarem comprendre un poc més com es comporta la llum que ens envolta.

La reflexió

Quotidianament veiem la llum reflectida en multitud de superfícies. Tal vegada la més emblemàtica és la lluna, que inicialment es pensava que tenia llum pròpia, perquè no sabíem que simplement reflectia la llum del sol. La reflexió es produeix quan la llum, en el seu camí, es troba un medi diferent i, d'alguna manera, hi rebota. Si la superfície



Reflex sobre l'aigua en un dels llacs de Plitvice, a Croàcia.

de l'altre medi està polida, tenim el que anomenem *reflexió especular*. En aquest cas, més que llum reflectida, podrem veure fins i tot una imatge nítida de l'escena reflectida especularment. Aquest fenomen el podem observar sobre l'aigua en calma. De fet, aquesta va ser la manera com els primers éssers humans

van poder veure la seua pròpia imatge abans de poder recórrer als espills.

Parlant d'espills, s'ha demostrat que aquests utensilis ja eren utilitzats per egipcis, grecs i romans fa més de dos mil anys. Inicialment es construïen amb metall ben polit, amb les limitacions que ofería la tecnologia de l'època, i no eren massa comuns. No va ser fins al segle XIII que, amb la invenció del sistema a través del qual el vidre es depositava sobre una capa metàl·lica, se'n va perfeccionar la fabricació. Ara bé, fins al segle XVI no apareix en el mobiliari, i ja en el segle XVII a Venècia es comencen a construir espills de grans dimensions. Aquesta capa de vidre sobre el metall, plata o alumini, protegeix l'espill i el fa perdurar en el temps.

L'espill més utilitzat ha sigut el pla, que produeix una imatge directa i virtual de l'escena. Això és perquè la llum incident sobre la superfície polida ix reflectida amb el mateix angle respecte

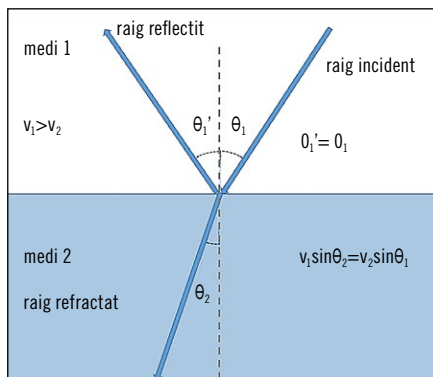


Diagrama de reflexió i refracció sobre una superfície plana.

a la normal de la separació entre els medis. Quan l'espill té una certa curvatura –còncava, convexa o totes dues combinades– ofereix una imatge deformada. Aquest efecte, que ara utilitzen les aplicacions del telèfon mòbil, solia utilitzar-se en museus de ciències i parcs d'atraccions.

La refracció

La refracció, que, com la reflexió, també la van estudiar els antics grecs, té lloc quan la llum canvia de medi. En general, quan la llum, en el seu camí, es troba amb un medi diferent, una part és reflectida, torna arrere, i l'altra continua propagant-se dins del nou medi, però desviada.

En la nostra vida quotidiana quasi sempre ens trobem envoltats d'aire, i per això no és senzill percebre aquest efecte. El veiem quan la llum entra en l'aigua. Allà ens adonem que objectes que en l'aire són rectilinis semblen trencar-se o canviar de direcció quan estan parcialment submergits. Per què i com canvia la direcció de propagació de la llum en travessar un altre medi material? La primera vegada que s'intentà donar resposta a aquesta pregunta fou en un tractat sobre òptica escrit l'any 984 per Ibn Sahl, un matemàtic i físic persa de l'edat d'or de l'islam, precursor d'Alhazen. Seria sis segles més tard, en 1621, que el científic holandès Willebrord



Reflexió en una superfície convexa reflectant.

Snel van Royen va publicar el treball en què formulava, en els termes en què la coneixem actualment, la denominada llei de Snell. Aquest autor va establir que la llum viatja a diferent velocitat en cada medi, i que els sinus dels angles d'incidència amb la normal de separació dels medis estan relacionats entre si i amb les velocitats de propagació, com podem veure en l'esquema de la pàgina anterior, on, a més de la reflectida, veiem el que ocorre a la llum quan canvia de medi.

L'exemple explícit es mostra en la imatge del got d'aigua amb un bastonet dels que tradicionalment s'utilitzen



Got d'aigua amb un bastonet, exemple de la refracció de la llum.

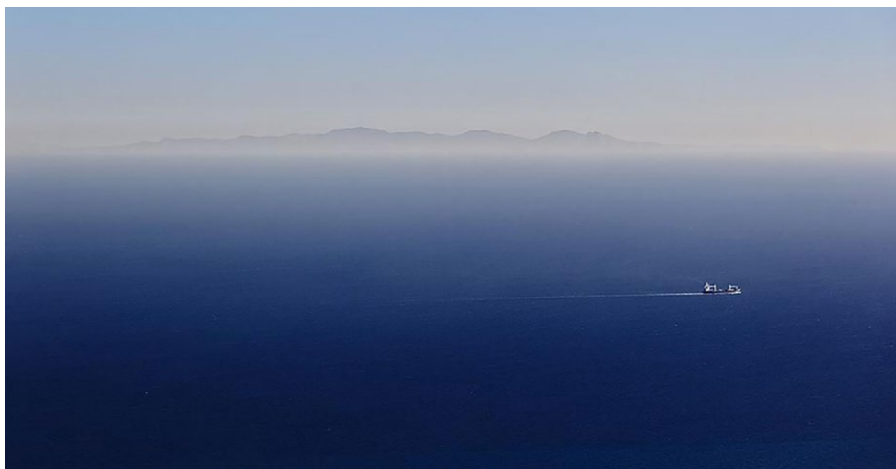
per a menjar als països asiàtics. Això és el que percebem els humans en veure un objecte recte introduït en aigua: ens apareix com si l'objecte estiguera partit just en la separació dels dos medis

materials. Més tard, aquestes idees plasmades en la llei d'Snell sobre la reflexió i la refracció de la llum van ser integrades dins del principi de mínima acció enunciat per Pierre Louis Moreau de Maupertuis, què incloïa el principi de Fermat i que va tindre una gran transcendència en el món de la física.

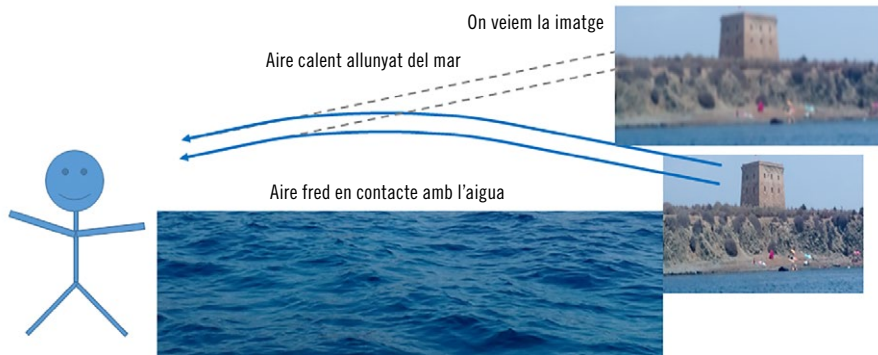
De tota manera, aquest efecte en què es veu que la llum es doblega i que un objecte que percebem en un lloc de l'espai en realitat està en un altre el tenen molt ben interioritzat alguns humans d'una manera inconscient. Els pescadors de zones tropicals que pesquen amb llança coneixen molt bé aquest efecte, i per això no apunten on veuen el peix, sinó on realment es troba, que depèn molt de la profunditat.

La fata morgana, miratges i fantasmes

Per a observar el canvi en la direcció de propagació de la llum hi ha vegades



Efecte fata Morgana sobre l'illa d'Eivissa vista des del Montgó (753 m). Fotografia presa el 4 de gener de 2012, amb el mar a uns 13 °C o 14 °C i l'aire a 24 °C. Foto: F. Gallego.

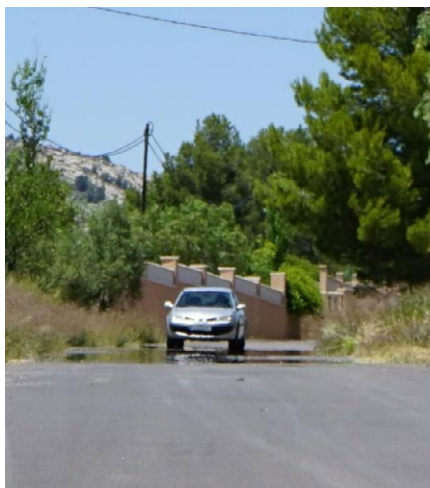


Esquema de propagació dels raigs de llum quan hi ha inversió tèrmica, efecte fata morgana, utilitzant l'antiga presó de l'illa de Tabarca.

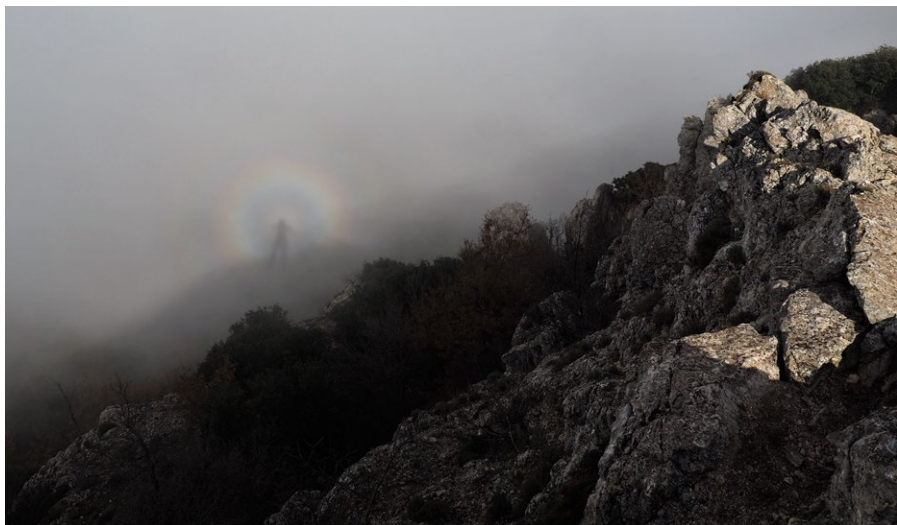
que no cal un canvi de medi. Pot donar-se dins del mateix medi si la densitat d'aquest varia bruscament i, per tant, es modifica la velocitat de la llum a dins seu. Quan podem tindre un canvi de densitat brusc en l'aire? Doncs, per exemple, quan l'aire calent està en contacte amb altres medis que es troben a temperatures més baixes, és a dir, hi ha una forta inversió tèrmica en què la temperatura augmenta amb l'altura. Quan això ocorre, els objectes apareixen allargassats i elevats sobre l'horitzó com si es tractara d'un conte de fades. De fet, *fata* vol dir fada en italià, i Morgana és un personatge de la mitologia celta, una fada poderosa i d'aparença canviant que representa el desig, la temptació i, en certa manera, l'obscuritat. Conta la llegenda que va dur a la perdició diferents personatges, com el rei Artús o el mag Merlí.

El fenomen del miratge, tant relacionat tradicionalment amb els deserts, parteix d'una situació diferent, ja que en aquest cas tenim el terra molt més calent que l'aire del voltant, però es basa en el mateix principi: una variació en la densitat de l'aire deguda a la

temperatura. Els dies de basca de l'estiu es pot veure aquest fenomen sobre l'asfalt calent. La imatge del cel de l'horitzó que ve cap a nosaltres, lleugerament descendent, a causa de les contínues refraccions canvia el seu angle i al final acaba pujant, de manera que veiem una imatge poc nítida del cel sobre l'asfalt que ens pot donar la idea que hi ha aigua sobre l'asfalt.



Miratge sobre l'asfalt.



Espectre de Brocken. Foto: M. Á. Quereda.

Finalment, és possible que, si heu anat per la muntanya un dia de boira, hàgeu tingut la sensació de trobar-vos amb un fantasma. En realitat es tracta del denominat espectre de Brocken, anomenat així perquè va ser descrit per primera vegada, l'any 1780, en les muntanyes d'aquest nom, ubicades entre Gotinga i Magdeburg, al centre-nord d'Alemanya. Aquest és un indret relacionat amb una llarga tradició de fenòmens màgics i paranormals (el mateix Goethe fa referència a aquest lloc i aquestes llegendes en les pàgines de *Faust*). Podrem percebre aquest espectre si pugem a la muntanya un dia de boira o núvols baixos i tenim el sol situat a l'esquena. Aleshores la nostra ombra és projectada davant nostre sobre les gotes dels núvols, que tenen una grandària uniforme i estan homogèniament distribuïdes, i ens apareix magnificada, una mica borrosa i pàl·lida, ja que es tracta d'una difracció causada

per reflexió. Si hi sumem l'anell de llum que, com una mena d'aurèola de glòria, pot envoltar l'espectre de Brocken, tal com s'aprecia en la fotografia, i el moviment en ocasions sobtat que experimenten aquests espectres pel desplaçament dels núvols o canvis de densitat, segurament tindreu la sensació de trobar-vos davant d'un ésser d'ultratomba.

L'arc de Sant Martí

Ja hem vist que la velocitat i direcció de la llum canvien quan aquesta passa de l'aire a un altre medi, fins i tot dins del mateix aire quan hi ha un canvi brusc de temperatura. Qualsevol tipus de llum, visible o no, es propaga en el buit a una velocitat de 300 000 km/s, però quan hi ha un canvi de medi la velocitat de la llum variarà de manera diferent segons la seua freqüència o longitud d'ona.



Arc de Sant Martí.

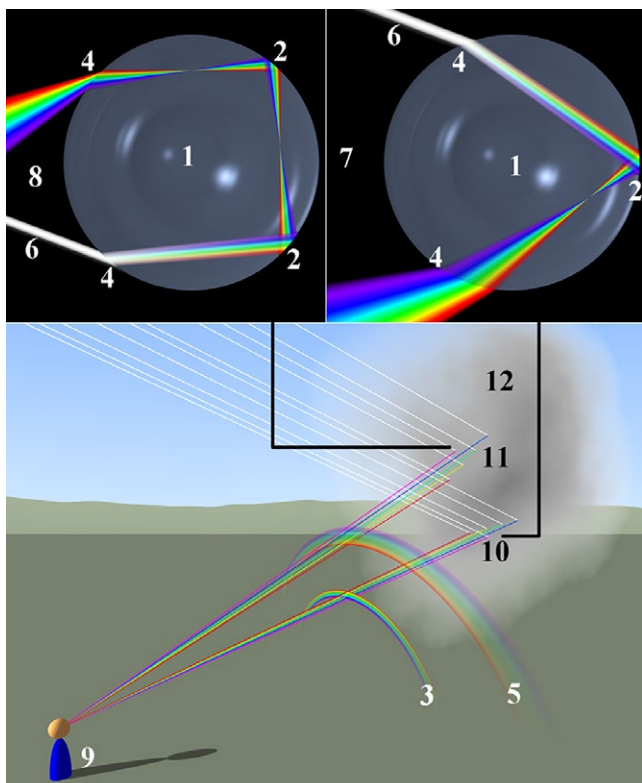
La llum visible té una longitud d'ona entre 300 i 700 nm, i dins de la llum radiada pel sol es troben tots els colors que som capaços de percebre. Snel va postular que la velocitat de cada color canvia quan es propaga en un medi que no siga el buit o l'aire. Per això, si la incidència de la llum en la superfície de separació dels medis no és perpendicular, cada color eixirà reflectit amb un angle diferent. L'arc de Sant Martí o arc iris és el resultat d'aquest efecte quan la llum solar travessa les gotes d'aigua de la pluja i els colors es dispersen.

L'altura on apareix aquest efecte depèn de la posició del sol, però l'arc principal sempre està entre 40° i 42° , i el secundari entre 51° i 54° . En la fotografia superior es pot observar un arc principal on el color violat és a baix, i dalt es veu l'arc secundari, menys brillant, on els colors estan invertits i els blaus estan ara a la part superior. L'explicació apareix en la il·lustració

de la pàgina següent, on es veu que el principal es forma quan la llum fa una reflexió dins la gota d'aigua i el secundari quan en fa dues, per això és menys lluminós. En realitat l'arc de Sant Martí es pot veure com un cercle sencer si s'observa des de prou altura, com per exemple des d'un avió.

El cel i els núvols

Si ens preguntaren de quin color és el cel, tots respondríem que és blau, però la veritat és que canvia de color. A les vesprades, moltes vegades deixa el seu color blau característic i esdevé ataronjat o vermellós. Aquest efecte, com l'arc de Sant Martí, sempre ha encuriósit les diferents civilitzacions, i com més coneixement acumulaven més els estranyava aquest fenomen, ja que no és igual cada dia. De fet, sovint està relacionat amb les condicions atmosfèriques.



Esquema dels fenòmens òptics que resulten en la formació de l'arc de Sant Martí principal (3) i secundari (5): (1) gotes esfèriques, (2) punts on succeeix la reflexió interna de la llum, (4) punts on succeeix la refracció de la llum, (6) feix de llum blanca procedent del sol, (7) recorregut de la llum que forma l'arc primari, (8) recorregut de la llum que forma l'arc secundari, (9) observador, (10) regió que forma l'arc primari, (11) regió que forma l'arc secundari, (12) zona atmosfèrica amb presència de petites gotes esfèriques. Il·lustració: S. Peo (CC BY-SA 3.0).

Si del sol ens arriba llum de tot l'espectre, des de l'infraroig fins a l'ultraviolat, per què veiem el cel només blau? Per què unes eixides o postes de sol són especialment vermelloses i altres només un poc? Què li ocorre a la llum quan passa per l'atmosfera terrestre, majoritàriament composta per nitrogen? Va ser l'any 1871 que el físic anglès John Strutt, tercer baró de Rayleigh, ens en va oferir una explicació.

Segons Lord Rayleigh, la llum es difon quan travessa medis transparents amb partícules menors que la seua longitud d'ona. Aquest efecte d'intensitat difusa s'accentua com més baixa és la longitud d'ona de la llum. I de tots els colors del visible, els blaus i violats són els que tenen una longitud d'ona menor. Per això, aquests colors són els que difonen més en totes les direccions en xocar amb les partícules de l'atmosfera,

que són majoritàriament de nitrogen, i arriben als nostres ulls des de totes les bandes. El verb *difondre* és una traducció de l'anglès *scattering*, i se sol aplicar a l'efecte que pateix una ona quan travessa un medi material.

Cal tindre en compte que quan Rayleigh proposa la seua explicació encara no es coneixia la física quàntica, i per això no es considera la llum com un conjunt de fotons. Amb posterioritat s'han oferit explicacions més detallades i complementàries d'aquest fenomen. De tota manera, és important remarcar que la importància de la longitud d'ona en la difusió ve donada per la quarta potència de la longitud d'ona; per tant, xicotetes variacions d'aquesta magnitud fan que l'efecte varie prou en la seua importància. Aquesta difusió de la llum en l'atmosfera fa que la llum es polaritze, és a dir, que vibre d'una manera determinada i no a l'atzar, per això amb unes ulleres polaritzades –els vidres són polaritzadors lineals– veurem que la lluminositat del cel varia quan les fem girar, i el contrast amb els núvols o fum de l'atmosfera canvia quan les girem.

Amb l'explicació de Rayleigh també podem entendre per què veiem els núvols blancs, ja que estan compostos per molècules d'aigua, que són aproximadament el doble de grans que les de la atmosfera, i per això aquesta difusió no

és tan important. Si un núvol es veu de color gris, fins i tot quasi negre, és perquè ens arriba poca llum a través seu, per la seua grandària o perquè té molta densitat i no deixa passar els raigs de sol. Per això, quan els veiem ben obscurs podem pensar que plourà, si bé aquest efecte depèn de moltes més circumstàncies, com la humitat del vent o la quantitat de pols en suspensió en l'atmosfera, així que tindre grans núvols ben carregats d'aigua no és condició suficient per a ploure, com bé sabem al País Valencià. De tota manera,



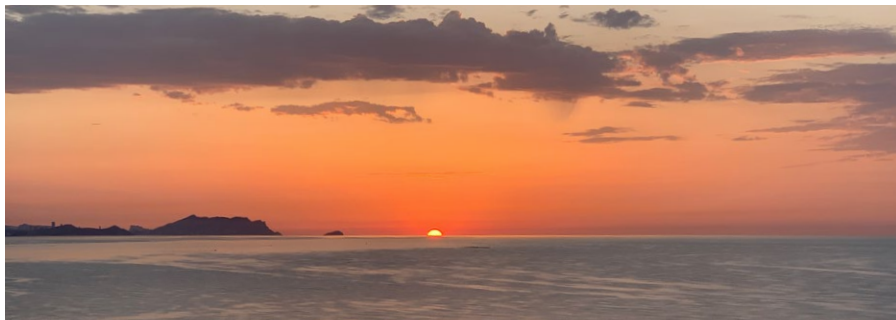
Dibujar l'espai, escultura popularment coneguda com «la Mà», al campus de la Universitat d'Alacant, sota un cel cobert de núvols blancs.

si veiérem aquests núvols des de dalt, com quan viatgem en avió, els veuríem tots blancs.

Alguns dies, a l'ocàs, podem percebre imatges d'uns colors corprenedors. Quan el cel ha perdut el seu característic color blau diürn ja no ens arriba la llum blava. Això ocorre perquè en incidir el sol amb un angle molt oblic, la llum solar ha de travessar llargues distàncies dins l'atmosfera. Aleshores la llum blava es difon tant que ja no ens arriba, només ens arriba la llum de longitud d'ona llarga, que no s'ha difós. Per això veiem aquests colors vermellors tan espectaculars. Aquest efecte s'accentua si hi ha núvols alts, que no solen portar pluja, ja que la llum s'hi reflecteix i baixa a la superfície

terrestre: Aquest camí afegit que recorre la llum fa que minve encara més la component blava. Amb tot, la presència de núvols alts és un element magníficador d'aquest efecte, però no suficient. Un ambient sec amb partícules de pols molt fines a l'atmosfera ens ajuda a percebre aquest envermelliment dels núvols, fins i tot a veure-hi tons molt rosats. Aquestes partícules de pols finíssimes augmenten la dispersió de la llum, per això aquest efecte sol ser molt espectacular després de l'erupció d'un volcà.

Al País Valencià aquesta explosió rogenca sol tindre lloc els dies en què el ponent ha bufat amb força, ja que és un vent que ens sol portar núvols alts, sequescat i pols molt fina de terra endins.



Eixida del sol des del Campello i capvespre sobre Castalla. Fotos: M. J. Cerdà i S. Gallego, respectivament.

Instruments òptics

Marta Morales Vidal i Inmaculada Pascual Villalobos

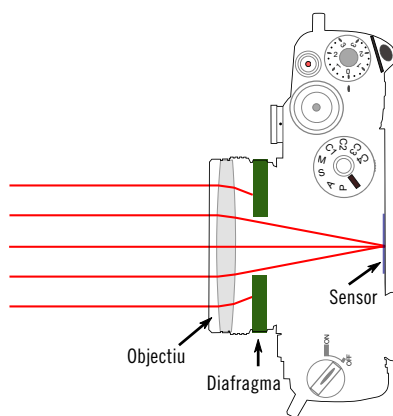
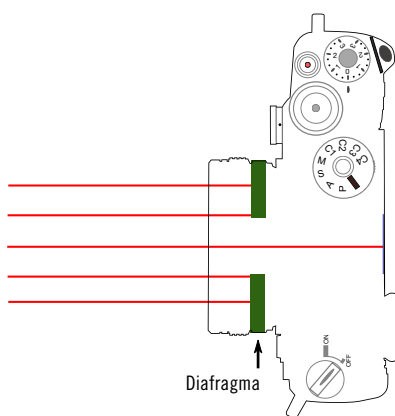
Inst. Univ. Física Aplicada a les Ciències i les Tecnologies

Un instrument òptic és un dispositiu que permet formar una imatge mitjançant la llum –o radiació electromagnètica visible– que parteix d'un objecte i travessa aquest instrument. Si la imatge es forma sobre un sensor, com ara un sensor CCD, tindrem una càmera fotogràfica. Si es forma sobre una pantalla de projecció, tindrem un projector. Si utilitzem una lupa, un microscopi o un allargavistes, la imatge es formarà sobre la retina de l'ull. Les aplicacions d'aquests instruments s'estenen a molts àmbits del coneixement, com l'astronomia, la biologia o l'art. Ramón y Cajal va poder desenvolupar gran part de les

seues aportacions científiques gràcies a la utilització del microscopi i la càmera fotogràfica. Herschel va poder observar per primera vegada galàxies exteriors a la nostra utilitzant un telescopi reflector. Galileu va descobrir les taques solars o les llunes de Júpiter amb el seu allargavistes.

Càmera fotogràfica i sistemes de projecció

Qualsevol moment especial pot quedar plasmat en una imatge: un bonic paisatge d'un lloc que visitem en vacances,



Traçat de raigs en una càmera sense lent objectiu i traçat de raigs en una càmera fotogràfica amb lent objectiu, que forma imatge en el sensor.

un pastís d'aniversari o simplement una reunió d'amics. Què necessitem per a obtenir una bona instantània d'aquests moments? Seran importants dues coses: una bona il·luminació i una càmera fotogràfica que permeti enfocar allò que volem fer perdurar en la imatge.

Totes les càmeres fotogràfiques, de les més senzilles a les més sofisticades, funcionen bàsicament de la mateixa manera: focalitzant els raigs de llum procedents de l'escena o objecte que es vol fotografiar sobre un detector o sensor CCD. Per tal que els raigs de llum formen una imatge sobre el detector, el més senzill és utilitzar una lent convergent que funcione com a objectiu fotogràfic. Quan els raigs de llum procedents de l'objecte travessen l'objectiu de la càmera la seua direcció és modificada, i això dona lloc a la imatge. En el cas que el punt objecte es trobe molt allunyat, ocorrerà el següent: un feix de llum paral·lel procedent d'aquest objecte es concentrarà en un punt situat en el pla del sensor de la càmera i formarà una imatge puntual.

Com podem obtenir fotografies nítides? La nitidesa de la foto dependrà, entre altres coses, de l'òptima combinació entre il·luminació, sistema òptic i sistema de detecció. En general, la separació entre l'objectiu i el pla de detecció de la càmera haurà de ser pròxima a la distància focal imatge de l'objectiu, encara que dependrà també de la distància a què estiga l'objecte respecte de la càmera, de la distància focal utilitzada i de la il·luminació. Per aquesta raó, les càmeres fotogràfiques més sofisticades ofereixen la

possibilitat d'enfocar diferents objectes, de ser usades amb objectius de diferents distàncies focals i de modificar la grandària o número de diafragma en funció del tipus de fotografia que vulguem obtenir.

El diafragma és una obertura, generalment circular, que s'utilitza per a limitar la quantitat de llum que entra en la càmera i arriba al sensor. Quan el diafragma és gran, el número de diafragma és baix. Un diafragma molt gran (número de diafragma molt baix) suposaria un excés de llum i produiria una imatge excessivament clara i amb poc contrast, llevat que el temps d'exposició siga prou curt per a permetre obtenir una imatge ben il·luminada. Per contra, un diafragma molt xicotet (número de diafragma alt) deixaria passar molt poca llum dins de la càmera i donaria com a resultat una imatge molt fosca, tret que el temps d'exposició fora bastant llarg per a permetre una imatge prou il·luminada.

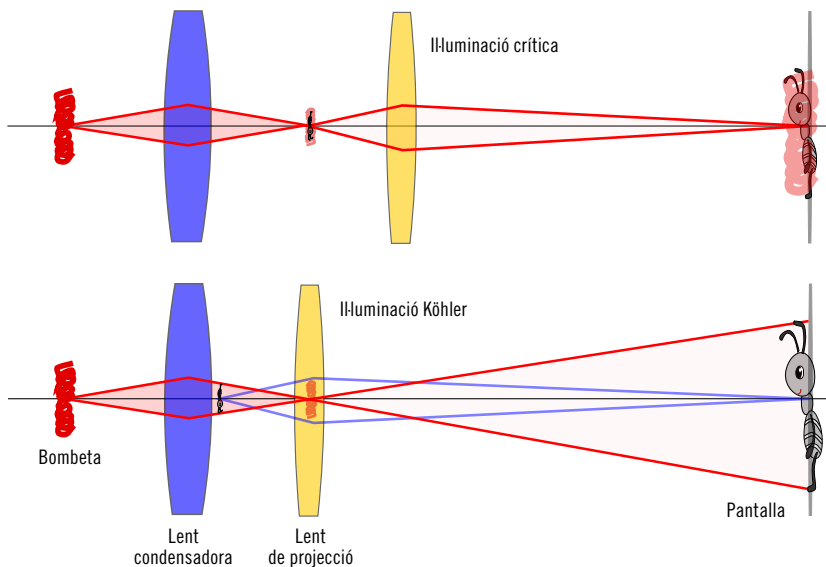
El temps d'exposició marca l'interval durant el qual l'obturador estarà obert per tal que la llum travesi l'objectiu i l'interior del diafragma per a ser detectat finalment pel sensor. D'altra banda, reduir l'obertura del diafragma pot ser útil per a augmentar l'espai de distàncies enfocades de manera nítida en una mateixa imatge, és a dir, per a augmentar la profunditat de focus. L'efecte de reduir la grandària del diafragma es podria comprovar de forma molt senzilla mirant a través d'una cartolina foradada amb una agulla; en aquest cas, encara que l'escena es veuria més fosca, podríem veure nítid pràcticament a totes les distàncies,

de manera que veuríem amb nitidesa el que abans véiem borrós. Les càmeres fotogràfiques més senzilles solen tindre profunditats de focus grans per a permetre, amb un únic objectiu, enfocar de forma prou acceptable quasi a totes les distàncies.

Parlem de càmera digital quan la imatge es forma sobre un sensor digital. El sensor digital transforma el senyal lluminós que arriba a cada píxel en un corrent elèctric, i aquest corrent es tradueix en un determinat nivell d'intensitat en la imatge digitalitzada. Aquesta imatge digital s'emmagatzema en la targeta de memòria per a ser posteriorment processada per un ordinador i visualitzada en una pantalla digital. La grandària del sensor està relacionada amb la resolució de la imatge: un

sensor gran o un nombre alt de píxels permet aconseguir imatges grans i de bona qualitat.

En el cas d'un sistema de projecció, la imatge que s'obté sobre la pantalla és una imatge ampliada d'un objecte menut. Tradicionalment s'utilitzen projectors de diapositives, però actualment els sistemes de projecció són digitals. En el cas de la projecció de pel·lícules és important que la il·luminació sobre la pantalla siga molt intensa, i no es prioritza tant la uniformitat; ara bé, si la imatge es manté immòbil, qualsevol canvi d'uniformitat serà fàcilment percebut. Per a aconseguir la il·luminació adequada s'utilitzen dos tipus de projecció: la crítica, més intensa, i la de Köhler, més uniforme.



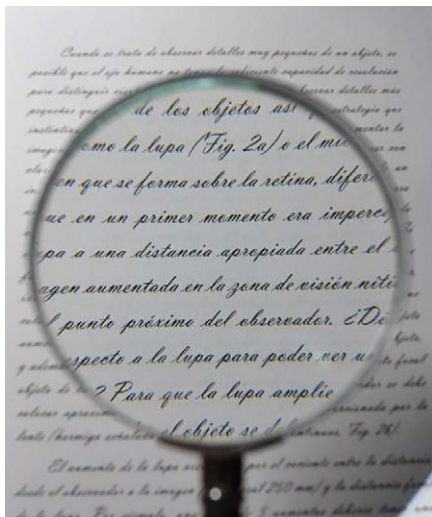
Sistemes de projecció crítica i de Köhler.

Lupa o microscopi

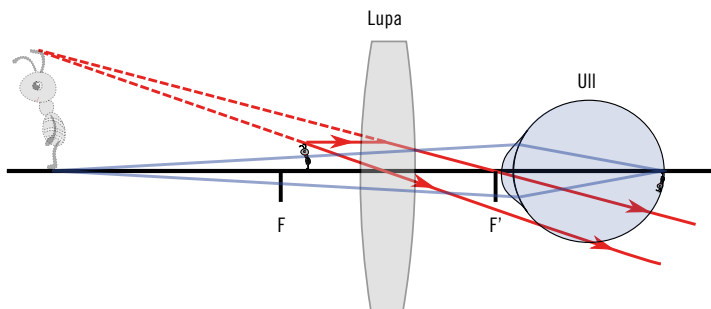
Quan es tracta d'observar detalls molt xicotets d'un objecte, és possible que l'ull humà no tinga prou capacitat de resolució per a distingir certs detalls. Com és possible observar detalls més xicotets que els detectables a simple vista? La primera estratègia que instinctivament s'utilitza és acostar l'objecte a l'ull per a augmentar la imatge percebuda. Però a vegades això no és suficient per a veure amb claredat certs detalls dels objectes, així que la utilització d'un instrument òptic com la lupa o el microscopi serviran per a augmentar la imatge que es forma sobre la retina, diferenciant i fent visible així el que en un primer moment era imperceptible a l'ull. Si colloquem la lupa a una distància apropiada entre l'objecte i l'ull es formarà una imatge augmentada en la zona de

visió nítida de l'observador, idealment en el punt pròxim de l'observador. On s'haurà de col·locar l'objecte respecte a la lupa per a poder veure una imatge de l'objecte augmentada i dreta? Perquè la lupa amplie la imatge d'un objecte, i a més la vegem dreta, l'objecte s'ha de col·locar entre el punt focal objecte de la lupa (F) i la lent, mentre que l'observador s'ha de col·locar aproximadament a 25 cm de la imatge proporcionada per la lent (la formiga assenyalada pels raigs rojos discontinus).

L'augment de la lupa ve donat pel quocient entre la distància de l'observador a la imatge (en general 250 mm) i la distància focal de la lupa. Per posar un exemple, una lupa de cinc augments hauria de tindre una distància focal de 50 mm. Per a aconseguir veure la imatge d'un objecte 100 vegades més gran, necessitaríem una lent amb una focal de 2,5 mm, cosa que des d'un punt de vista pràctic no seria viable. En aquest cas, la combinació apropiada de dues lents, per exemple, una primera lent de distància focal 16 mm i una segona de distància focal 25 mm, separades una distància de 201 mm, ens permetria obtindre un sistema òptic amb la focal necessària. Aquests tipus de sistemes òptics compostos per dues lents positives o convergents i separades una certa distància són la base de tots els microscopis. En general, el microscopi està format per dos sistemes òptics convergents, objectiu i ocular. L'ull es col·loca darrere de l'ocular, i la mostra o objecte davant de l'objectiu. Com més baixa siga la distància focal de les lents més alt serà el poder d'amplificació del microscopi; per això un microscopi sol tindre diferents objectius intercanviables.



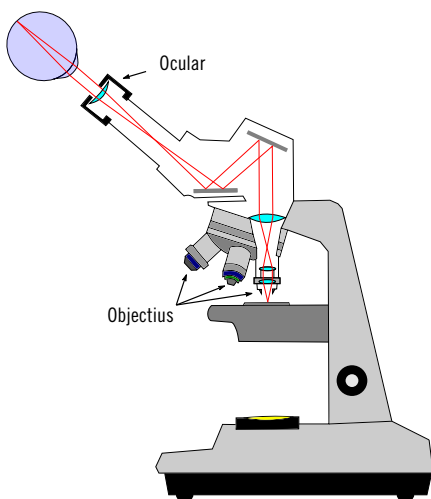
Augment de la imatge proporcionat per una lupa.



Formació de la imatge a través de la lupa (raigs rojos) i formació de la imatge a través de l'ull (raigs blaus).

Els microscopis proporcionen imatges invertides molt ampliades d'objectes molt pròxims. Que la imatge estiga invertida no suposa major problema, perquè n'hi haurà prou amb girar la mostra que colloquem sobre el portaobjectes per a aconseguir veure la imatge dreta. Per a obtenir el màxim rendiment del microscopi s'haurà de seleccionar, cada vegada que s'use, l'objectiu de microscopi que millor enfoque la mostra a analitzar. Els objectius solen estar formats per diverses lents i es caracteritzen pel seu augment i la seua obertura numèrica, que és, aquesta última, una mesura de la quantitat de llum que és capaç d'arreglar el microscopi, i que també ens indica la seua capacitat per a distingir detalls xicotets a una distància fixa. Si necessitem distingir punts molt pròxims podem utilitzar obertures numèriques més grans. També podem disminuir la longitud d'ona utilitzant colors de l'espectre en la zona dels blaus, o bé podem utilitzar un objectiu d'immersió en contacte amb un mitjà d'índex de refracció major que el de l'aire.

Tal com hem explicat prèviament respecte a la lupa, podríem aconseguir una ampliació lleugerament major si la imatge de l'objecte l'observem en el punt pròxim de l'observador. No obstant això, aquest lleuger guany

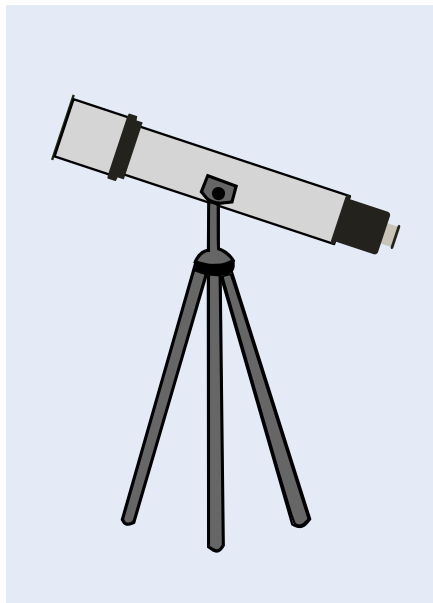


Components d'un microscopi i esquema de la formació d'imatge a través d'aquest.

pràcticament no compensa la fatiga de l'observador en enfocar una imatge molt pròxima. Per tant, el més recomanable és començar la mesura ajustant l'ocular per a assegurar que l'ull estiga relaxat i l'ocular preparat per a enfocar en la retina els raigs de llum que ixen de l'ocular i arriben paral·lels a l'ull.

Allargavistes i telescopis

Si el que volem és veure objectes molt llunyans, podem utilitzar un sistema afocal, com un allargavistes o un telescopi. Mirant a través d'aquest sistema, i sense necessitat d'estar prop dels objectes, es formarà en l'ull una imatge tan augmentada que semblarà que tenim els objectes a l'abast de la mà.

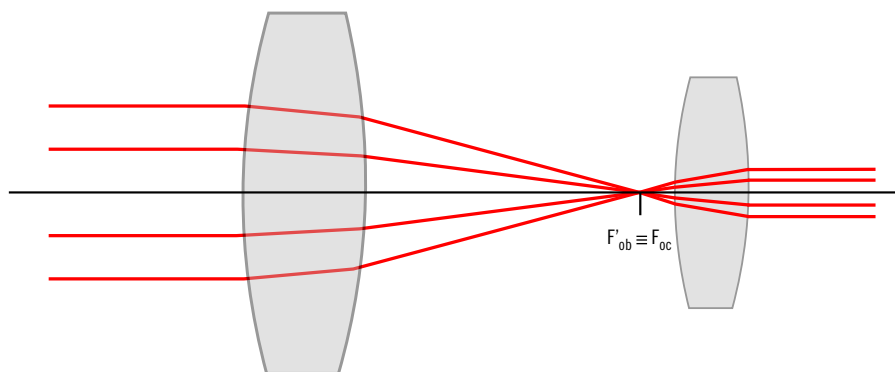


Allargavistes astronòmic.

L'allargavistes astronòmic és un sistema afocal compost per dues lents convergents. Però què és un sistema òptic afocal? Es tracta d'un conjunt de lents capaç de formar en l'infinít la imatge d'un objecte molt llunyà. Dit d'una altra manera, el feix de raigs paral·lels que ve d'un punt que està en infinit ix de l'allargavistes paral·lel, és a dir, forma la imatge molt allunyada (en infinit). Per a obtenir un sistema òptic afocal a partir de dues lents, el punt focal imatge de la primera lent ha de coincidir amb el punt focal objecte de la segona lent.

Per a obtenir grans augments i bona resolució d'objectes molt llunyans s'utilitza un objectiu de grans dimensions amb una focal molt gran i un ocular amb una focal molt xicoteta. Com més gran siga la diferència entre la focal de l'objectiu i la de l'ocular, major serà l'augment, i com més gran siga l'objectiu, major serà la resolució. No obstant això, l'augment no és l'únic paràmetre que cal tindre en compte per a construir un allargavistes astronòmic. La quantitat de llum que travessa l'objectiu determinarà la claredat de la imatge.

La fabricació de lents de grans dimensions i de bona qualitat suposa una important limitació. Per aquest motiu, l'ús d'espills en lloc de lents que funcionen com a objectiu sol ser l'elecció preferida quan es tracta de fer observacions d'estrelles molt llunyanes. Quan s'utilitzen simultàniament espills i lents per a formar la imatge, l'instrument utilitzat es denomina telescopi. En la il·lustració es pot veure un esquema de la formació d'imatge a través d'un telescopi. En aquesta mena de sistemes òptics cal que



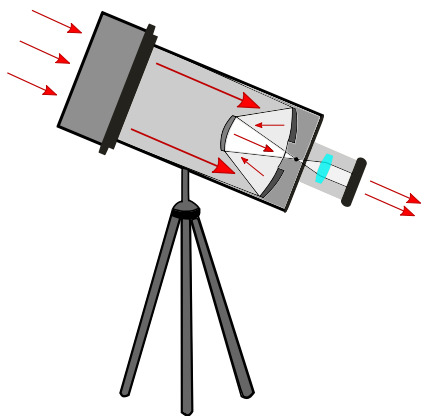
Sistema afocal.

l'observador se situa darrere de l'instrument. El feix de raigs paral·lels que ix de l'ocular entra a l'ull i forma les imatges en la retina de l'observador.

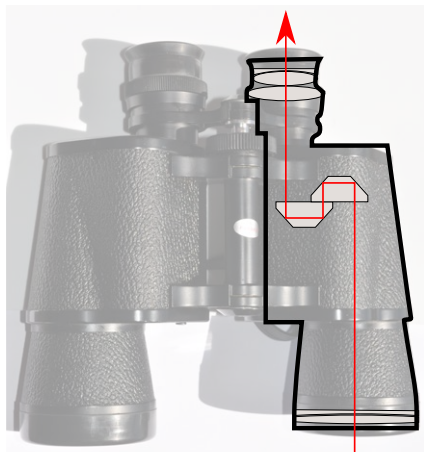
Quan s'utilitzen allargavistes per a observacions terrestres és necessari utilitzar sistemes inversors d'imatge, prismes en el cas dels allargavistes prismàtics i lents en el cas del periscopi submarí o espills quan el periscopi és casolà. Els prismes que s'utilitzen en els

allargavistes prismàtics poden ser de diversos tipus, i per a minimitzar-ne el pes se'n solen eliminar les vores amb la finalitat d'arredonir-ne les superfícies. Un periscopi casolà està format per dos espills col·locats a 45° , l'un enfront de l'altre.

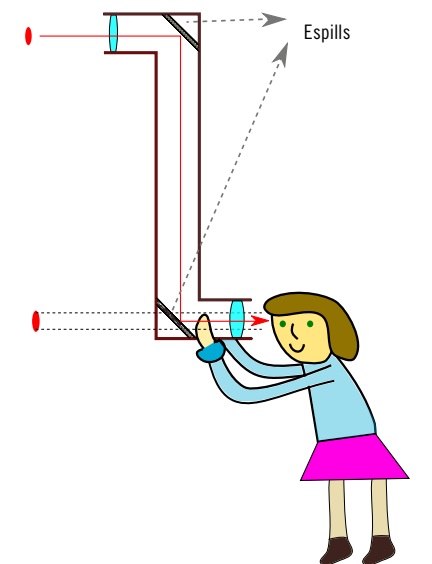
Una altra manera de produir la inversió de la imatge és l'ús d'un allargavistes de Galileu, compost per una lent convergent o positiva i una lent



Telescopi. Sistema afocal utilitzant espills i lents.



Allargavistes prismàtic.

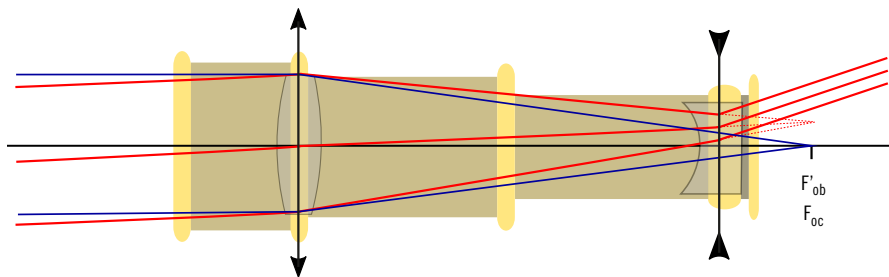


Periscopi.

divergent o negativa. En la il·lustració es pot veure un esquema de la formació

d'imatge a través d'un d'aquests allargavistes, tant d'un objecte en eix com fora d'eix.

En aquest capítol hem descrit alguns instruments òptics formats per lents, espills i prismes que processen la llum per a emmagatzemar imatges o bé per a visualitzar-les amb més detall. La càmera fotogràfica ens permet emmagatzemar les imatges per a visualitzar-les més tard. El projector ens proporciona imatges molt amplades. La lupa i el microscopi processen la llum perquè l'observador pugui percebre amb més detall els objectes més pròxims i els allargavistes o telescopis permeten a l'observador veure amb més detall objectes més llunyans. Els principis de funcionament de les lents, espills i prismes són molt simples, però la creativitat dels investigadors ha permès revolucionar la manera de veure i entendre el nostre entorn pròxim i llunyà.



Traçat de raigs d'un allargavistes de Galileu. En roig el traçat de raigs per a objectes fora d'eix, i en blau per a objectes en eix.

L'aprofitament energètic de la radiació solar

Jorge Francés Monllor i Sergi Gallego Rico

Dept. Física, Enginyeria de Sistemes i Teoria del Senyal

Alguns dels reptes més importants que se'ns plantegen com a societat són la sostenibilitat i l'autosuficiència energètica. D'ençà de la revolució industrial, la demanda energètica no ha deixat de créixer. En general, la nostra societat necessita diàriament grans quantitats de corrent elèctric, és a dir, necessitem transformar diferents tipus d'energia en corrent. Els dispositius actuals són cada dia més eficients des del punt de vista energètic, i malgrat tot la demanda no deixa d'augmentar. La millora en les condicions de vida ha vingut associada a un major consum energètic en àmbits com el transport, les comunicacions, la climatització, la il·luminació, etc.

La nostra principal font d'energia és la llum que ens arriba del Sol, que funciona per a nosaltres com un gran reactor de fusió nuclear a distància. Les estrelles –el Sol n'és una– estan compostes majoritàriament d'hidrogen, un element el nucli del qual està format per un sol protó. A causa de les forces gravitacionals, els nuclis tendeixen a fusionar-se i donen lloc a

elements més pesats, normalment heli, que té dos protons, i en aquest procés s'allibera una gran quantitat d'energia. Les altes temperatures que arriben a assolir les estrelles per aquest motiu fan que aquestes emeten llum –energia radiada–, amb freqüències que es troben tant dins com fora de la franja visible, segons la temperatura. Això es manté mentre els queda hidrogen; una vegada exhaurit el seu combustible, l'evolució que experimentarà cada estrella dependrà de la seua massa.



Llanterna sense piles carregada segons la llei de Faraday.

En el nostre planeta quasi totes les fonts actuals d'energia provenen, d'una forma o altra, del sol. En serien excepcions la mareomotriu –obtinguda a partir del moviment de les mareas provocat per la força gravitatòria de la Lluna i el Sol–, la geotèrmica –que aprofita l'escalfor que hi ha dins de l'escorça terrestre– i la fissió nuclear –que aprofita l'energia alliberada de la desintegració d'àtoms pesats formats en les estreles–. Aquestes energies fan girar turbines que transformen l'energia mecànica dels fluids que les accionen en energia elèctrica, seguint la llei de Faraday. És el mateix principi que s'utilitza en les dinamos de les bicicletes o en les llanternes que no necessiten piles.

Energies com l'eòlica o la hidràulica també depenen indirectament de l'energia de la llum solar, ja que aprofiten la força de fenòmens meteorològics com el vent i la pluja a les capçaleres dels rius, fenòmens que estan causats majoritàriament per l'escalfor produïda per la llum solar (que genera variacions de pressió i temperatura) i l'evaporació de l'aigua líquida (que després cau en forma pluja o gel).

L'energia en forma de llum solar ens arriba cada dia, i no deixarà d'arribar-nos mentre a l'astre no se li acabe l'hidrogen, cosa que, segons les estimacions, no passarà fins d'ací a cinc mil milions d'anys. El problema, però, és traure'n el màxim profit: com transformar la llum solar en energia útil per a la nostra societat. Un exemple d'aprofitament energètic ens l'ofereixen les plantes, que utilitzen aquesta energia, emmagatzemada en enllaços químics, per a sintetitzar matèria orgànica i créixer. Les plantes han sigut durant mil·lennis unes grans emmagatzemadores

d'energia solar; tant és així que els anomenats combustibles fòssils –gas, petroli i carbó– són restes de plantes de fa milions d'anys. El seu consum, a banda dels problemes de contaminació evident, presenta el problema inexcusable de la sostenibilitat, perquè el que ha costat de crear milions d'anys ho consumirem en poc més de tres segles.

Per altra banda, també hi ha la biomassa, que pot derivar en biocombustible o bioetanol. Aquesta font d'energia té l'avantatge que permet aprofitar residus (d'aliments, ramaders, forestals o urbans), però malauradament també contamina molt i no es veu sostenible a llarg termini.

Com convertim la llum solar en energia aprofitable?

La llum solar es pot aprofitar directament de dues maneres: calfant un fluid (energia solar tèrmica) o generant corrent elèctric (energia solar fotovoltaica). El principal avantatge d'aquest aprofitament és que es tracta d'una energia neta, és a dir que no genera residus contaminants com la nuclear o la basada en combustibles; només es contamina en la fabricació dels panells fotovoltaics o concentradors solars. En la fotografia veiem un disseny de cuina mòbil i sostenible que va guanyar el Premi Especial a la Sostenibilitat dels Premis d'Arquitectura de la Regió de Múrcia 2015. En aquest projecte es combina una cèl·lula fotovoltaica per a tindre corrent elèctric i un concentrador solar per a cuinar. A més a més, el trasllat es fa amb bicicleta, de manera que no contamina. Per a aquests usos els valencians ens beneficiem d'un clima òptim,

per la poca nuvolositat. Ara bé, per a aprofitar al màxim aquesta energia cal adequar la posició dels panells al moviment del Sol durant el dia, i tindre en compte que la inclinació de l'astre rei canvia en cada època de l'any.

Energia solar tèrmica

Els problemes derivats de l'activitat industrial, la contaminació ambiental i el seu impacte en el canvi climàtic han provocat que la societat i els organismes competents hagen anat prenent consciència de les conseqüències que tindrà per a la societat l'abús continuat de les fonts d'energia tradicional a través de combustibles fòssils. L'energia solar tèrmica és una forma alternativa de generació d'energia a partir de la radiació solar. A diferència de l'energia fotovoltaica, de la qual parlem en l'apartat següent, l'energia solar tèrmica fa ús d'un fluid per a convertir l'energia provinent de la radiació solar en energia tèrmica. La tecnologia utilitzada per a aquesta finalitat és ben coneguda des de fa algunes dècades, i sorprenentment han sigut alguns països del nord d'Europa els líders en producció de la denominada aigua calenta sanitària (ACS) durant molts anys, a pesar de no disposar de tantes hores de sol com els països del sud d'Europa.



Projecte «Huerta bizarra», d'Antonio Abellán i Javier Esquivá.
Foto: A. Abellán.

La generació d'energia tèrmica a partir de la radiació solar es pot fer mitjançant aplicacions de baixa, mitjana i alta temperatura. Els panells solars tèrmics, per exemple, formen part del grup d'aplicacions de baixa temperatura (fins a 65°C, aproximadament) i fan servir els denominats col·lectors plans vidriats per a l'obtenció d'aigua calenta sanitària, el calfament de piscines i calefacció, principalment en edificis, tot i que també s'utilitzen en entorns



Planta de torre en la plataforma Solúcar a Sevilla.
Foto: Abengoa.com.

industrials, en la calefacció d'hivernacles, piscifactories, etc. Les aplicacions de mitjana i alta temperatura generalment no utilitzen col·lectors (ja que per damunt de 80°C els col·lectors comencen a deixar de ser eficients), sinó que fan ús d'altres sistemes més avançats, com concentradors parabòlics (espills) que concentren l'energia del Sol per a calfar i evaporar un fluid que, en

de control. Cal dir que és habitual també que en les aplicacions d'aigua calenta sanitària hi haja un sistema d'aportació d'energia calorífica tradicional (basat en gas o electricitat) per a compensar el dèficit que hi puga haver en situacions puntuals de demanda.

Un dels avantatges de les instal·lacions d'aigua calenta sanitària és que en els últims anys s'ha assolit una alta qualitat o eficiència energètica. L'impacte ecològic és molt baix, a més de ser una font d'energia inesgotable a escala humana. Segons càlculs de l'Institut per a la Diversificació i l'Estalvi de l'Energia, utilitzant tan sols una part dels recursos proporcionats pel Sol i amb la tecnologia actual, Espanya és capaç de cobrir el 70 % de les necessitats d'aigua calenta de les llars. Per tant, és evident que l'aplicació d'instal·lacions d'aigua calenta sanitària



Instal·lació ACS en un hotel de Gran Canària.
Foto: Aguiaringenieros.com.

en les vivendes ajuda a reduir de forma considerable les emissions de CO_2 , ja que aquest 70% d'energia obtingut a través d'energia solar tèrmica no prové de mètodes tradicionals basats en l'ús de combustibles fòssils. No obstant això, no tot són avantatges, ja que es tracta d'una energia intermitent que abunda durant el dia, però no durant la nit. A més, és una energia que no segueix les necessitats del consum. Ara bé, Espanya presenta una ubicació geogràfica privilegiada, ja que, amb el bon clima que tenim, cada any hi incideixen al voltant de 1.500 kWh/m^2 .

L'espectre de la radiació que genera el Sol es pot classificar en diferents franges o regions. Una xicoteta regió d'aquesta radiació és la que denominem *espectre visible*, en la qual se situen els colors que l'ésser humà és capaç de percebre. Ara bé, més enllà de l'espectre visible hi ha l'espectre de la regió infraroja, que està relacionada amb el fenomen de la transmissió de la calor, ja que qualsevol cos que presente una temperatura per damunt dels zero graus Kelvin (equivalent a $-273,15^\circ\text{C}$) emetrà aquest tipus de radiació.

És important destacar ací que l'objectiu d'un col·lector pla és absorbir tota la radiació solar possible. Des del punt de vista físic, idealment això seria un cos negre perfecte amb



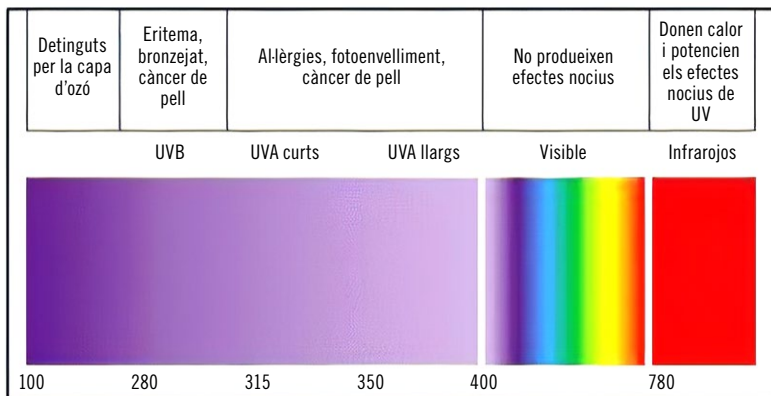
Instal·lació ACS en un edifici a Santa Cruz de Tenerife.
Foto: *Habitissimo.com*.

una absorbència igual a la unitat (entnem com *absorbència* la relació entre la radiació absorbida i la radiació incident). D'altra banda, tot cos que es calfa emetrà una radiació. En la gràfica que apareix a la part inferior de la pàgina següent es pot veure clarament que la longitud d'ona (λ) radiada per un cos és inversament proporcional a la seua temperatura (T), fet que és conegut com



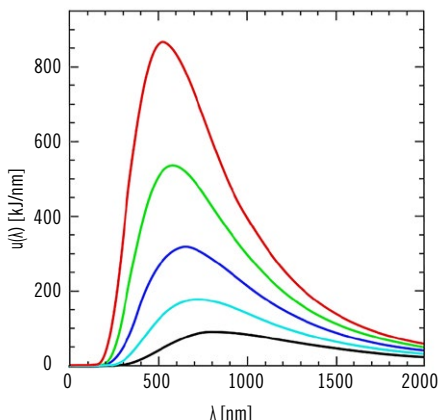
Instal·lació ACS en un habitatge unifamiliar.
Foto: *Renovablesverdes.com*.

Espectre de la radiació solar



Espectre de la radiació solar des de l'ultraviolat curt fins als infrarojos. Font: *Medicosecuador.com*.

llei de Wien. D'acord amb aquesta llei, i tenint en compte que la temperatura en el col·lector és molt baixa comparada amb els valors presents en la gràfica, la radiació infraroja del col·lector se situarà en la banda de l'infraroig llunyà,



Representació de l'emissió en funció de la longitud d'ona. Hi podem apreciar el desplaçament del màxim d'emissió en funció de la temperatura per a un cos negre.

Font: *Ecured.cu*.

és a dir, presentarà una longitud d'ona llarga.

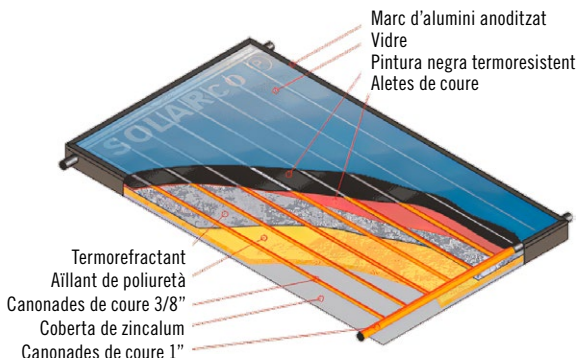
D'aquesta manera, idealment es necessita una superfície captadora de radiació solar que presenti una absorptància alta per al visible i l'infraroig i una emitància baixa per a l'infraroig llunyà. Això facilitarà que el captador es calfe per l'efecte de la radiació solar incident, però que al seu torn no perdi energia a causa de la generació de radiació en forma d'infraroig llunyà degut al seu propi calfament. En resum, la tecnologia dels captadors d'energia solar tèrmica busca maximitzar l'absorció de l'energia rebuda i, a més, encapsular la radiació que es produeix pel calfament del mateix captador per a evitar pèrdues de manera similar a l'efecte que es produeix en un hivernacle.

És important remarcar ací que no solament és portadora d'energia la radiació solar obtinguda per la incidència del raig directe del sol sobre el col·lector pla: també la radiació difusa que prové de la reflexió de la radiació solar en obstacles com l'orografia, els edificis,

els núvols, etc., contribueix de forma significativa a l'aportació energètica en aplicacions d'aigua calenta sanitària.

El sistema de captació és l'encarregat de capturar la major quantitat possible d'energia provinent del Sol. En l'interior del captador hi ha un serpenti amb el líquid termòfor, que usualment és aigua o una mescla d'aigua amb anticongelant (usualment, glicol). La xarxa de tuberies connecta el captador amb l'acumulador, que emmagatzema l'aigua calenta i està dissenyat per a evitar la pèrdua de calor. L'acumulador pot estar basat en serpenti o no tindre un sistema d'intercanvi. Això dependrà del fet que la instal·lació estiga basada en un únic circuit, en què el líquid termòfor és la mateixa aigua calenta sanitària, o bé que conste de dos circuits separats, i que el líquid termòfor transferisca l'energia calorífica a l'aigua de consum en l'acumulador. En moltes instal·lacions esdevé necessari utilitzar bombes de circulació per a proporcionar moviment al fluid, així com vàlvules de seguretat, purgadors i un vas d'expansió per a absorbir les dilatacions del fluid termòfor.

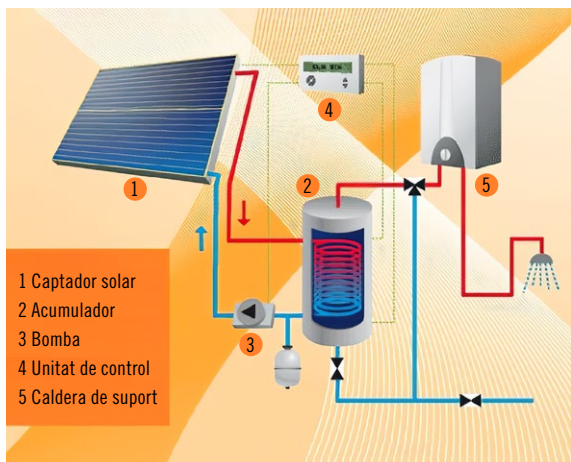
A causa de les irregularitats de la radiació solar, el captador solar no podrà aportar l'energia suficient en alguns moments, i per això es recorre a un



Elements d'un captador solar per a aplicacions de ACS.

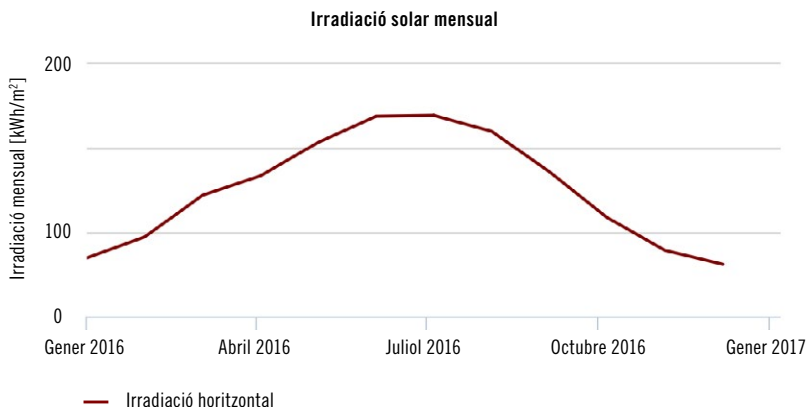
Font: Suelosolar.com.

sistema auxiliar de calfament d'aigua. El fet que la Terra orbite al voltant del Sol al llarg de l'eclíptica (intersecció del pla de l'òrbita terrestre amb el Sol) i que hi haja una inclinació d'aproximadament $23^{\circ} 27'$ respecte al pla de l'equador terrestre ocasiona l'existència dels solsticis i equinoccis, és a dir, de les estacions. En la gràfica es pot veure la distribució de radiació en funció



Estructura bàsica d'una instal·lació ACS típica.

Font: Ingemeccanica.com.



Irradiació horitzontal en funció dels mesos a Alacant durant l'any 2016.
Font: Photovoltaic Geographical Information System.

dels mesos de l'any (dreta) i la inclinació òptima del col·lector també segons el mes de l'any. Com s'hi pot apreciar, la radiació solar és molt més intensa en els mesos d'estiu, en què la trajectòria aparent del Sol és molt més vertical que en els mesos d'hivern.

Les instal·lacions d'aigua calenta sanitària es dissenyen tenint en compte la topologia d'obstacles que poden bloquejar la radiació solar, com poden ser cornises o edificis pròxims, per exemple. A més, per a definir el nombre, l'orientació i la inclinació dels captadors es tenen en compte factors com la ubicació de la instal·lació en termes de latitud i longitud i la demanda d'aigua calenta sanitària de l'edifici o habitatge. Tots aquests factors s'han de valorar perquè l'aportació d'energia provinent de la radiació solar siga, de mitjana, superior a una cota establida en funció de la demanda de l'edifici i de la zona climàtica de la instal·lació. La normativa defineix aquestes zones climàtiques per una major o menor contribució de l'energia solar en funció de la quantitat de radiació

solar que rep de mitjana durant un any. Per exemple, a Alacant i altres municipis pròxims la fracció exigida és del 70 %. Això vol dir que l'energia requerida per a calfar l'aigua provinga com a mínim en un 70 % de la radiació solar, i només el 30 % restant del sistema auxiliar de calfament d'aigua. Tot el disseny s'ha de fer amb molt de compte, ja que un sobredimensionament de la instal·lació pot produir calfaments excessius del líquid termòfor.

Les instal·lacions d'aigua calenta sanitària s'amortitzen en un interval temporal que depèn de la magnitud de la instal·lació, però que sol estar entre els cinc i els deu anys de mitjana. A més, és relativament senzill adaptar les instal·lacions convencionals ja existents si es disposa de certes infraestructures o condicions prèvies. D'altra banda, la vida útil dels sistemes de captació tèrmica és d'uns vint anys aproximadament, tot i que un ús més intensiu de l'aigua calenta sanitària pot reduir més encara el temps d'amortització. Per tot això, aquest tipus d'infraestructures és



Instal·lació de plaques fotovoltaïques en una vivenda aïllada creant l'estructura d'un aparcament.
Foto: Ijes Solar.

de gran interès tant des del punt de vista mediambiental com econòmic.

Energia fotovoltaica

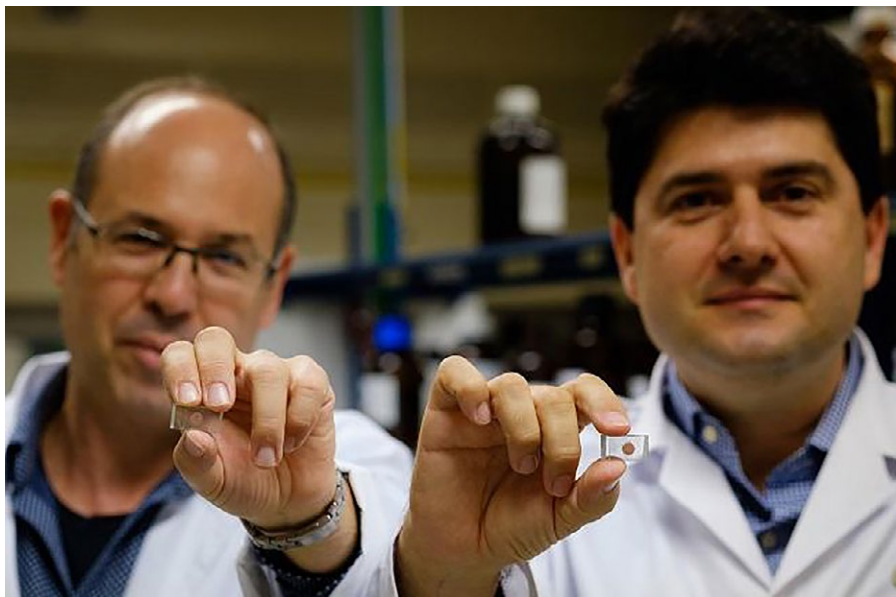
El terme *efecte fotovoltaic* es va començar a utilitzar en la primera meitat del segle XIX, però no va ser fins cinquanta anys més tard, a finals de segle, que es va construir la primera cèl·lula que transformava la llum solar en energia elèctrica. Val a dir que aquella primera cèl·lula només era capaç de transformar l'1 % de l'energia solar en energia elèctrica.

La base teòrica per a entendre l'efecte fotovoltaic va ser publicada per Albert Einstein en 1905. El físic establí que podíem entendre la llum com xicotets paquets d'energia –els fotons– l'energia de cadascun dels quals depenia directament de la seua freqüència, que és inversament proporcional a la longitud d'ona. Quan aquesta energia

és suficientment alta, els fotons poden extraure electrons d'un metall o un semiconductor, per exemple, i fer-hi circular corrent elèctric. Aquest efecte, que el podem veure cada dia en les portes automàtiques, li va valdre a Albert Einstein el seu únic Premi Nobel l'any 1921.

La primera cèl·lula fotovoltaica moderna basada en semiconductors va arribar abans de la meitat del segle XX, però la seua comercialització no va ser possible fins algunes dècades més tard, quan es van assolir eficiències del 14 %, que suplíren els costos de fabricació i les feren rendibles. Hui en dia és un tipus d'energia indispensable en les telecomunicacions –els satèl·lits no podrien funcionar sense–, la senyalització –les boies marines–, l'electrificació d'indrets aïllats com refugis de muntanya o en dispositius com ara calculadores, instal·lacions de reg, etc.

Fins ara, les cèl·lules solars més eficients que componen els panells solars

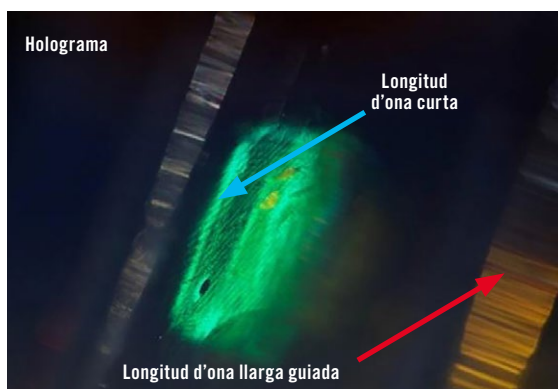


Jesús Berenguer (Universitat de La Rioja) y Javier García (Universitat d'Alacant) sostenen dues cèl·lules solars basades en titani.

no han arribat al 30 % d'eficiència en condicions de laboratori. És a dir, encara queden més de dos terços d'energia solar que no s'aprofiten. A més a més,

aquests panells tenen una vida útil d'uns 25 anys. Els més eficients són els fabricats amb silici monocristallí, en els quals tota la cèl·lula és un sol cristall.

En els primers models això feia que el preu s'encarira considerablement, però prompte va començar una competició per buscar cèl·lules alternatives més econòmiques i flexibles. Així, a hores d'ara disposem de panells de cèl·lules de silici policristallí o de silici amorf (5-10 % d'eficiència), que són menys eficients però que resulten prou més barates. També van aparèixer les cèl·lules solars orgàniques, algunes de les quals són més lleugeres i es



Element hologràfic com a concentrador solar. Les longituds d'ona curtes, de color verd, són reflectides, i les d'ona llarga són guiades cap a la cèl·lula solar.



Planta solar a Tougas (França). Foto: Ijes Solar.

poden adherir a determinades superfícies, com ara finestres, però tenen també una baixa eficiència i un temps de vida més curt, d'uns deu anys. Un altre tipus de cèl·lula és la Grätzel (o sensibilitzada per colorant), que intenta imitar el funcionament de les plantes. Han arribat a eficiències del 15 % en laboratori, però de moment són altament inestables i molt dependents de la temperatura. En Internet podem trobar tutorials per a fabricar aquest tipus de cèl·lules de manera casolana i senzilla amb suc de fruita o infusió de te i el sucre dels dònuts industrials (pel seu contingut en òxid de titani).

La recerca en noves cèl·lules fotovoltaïques no para. N'hi ha que utilitzen punts quàntics o grafé. Fins i tot a la Universitat d'Alacant, en col·laboració amb altres centres, s'ha proposat una tecnologia alternativa basada en un elèctrode amb una barreja de titani comercial P25 Degussa i nanopartícules de titani que va aconseguir una eficiència del 8,75% en 2017, la més alta obtinguda fins aquella data per aquest tipus de cèl·lula. Aquestes noves cèl·lules donen resposta a la necessitat

de substituir els substrats de vidre per uns altres de més flexibles (de plàstic) i de pes lleuger, que es puguin doblegar, siguin imprimibles i s'adaptin a qualsevol superfície. En aquest sentit, podrien funcionar com a unitats de generació d'energia a petita escala per a aplicacions tant a l'interior dels edificis (dispositius electrònics, il·luminació, etc.) com a l'exterior (sostres de cotxes, teules d'edificis o integrades en la roba per a subministrar energia a dispositius electrònics portàtils, entre d'altres).

Per a augmentar encara més l'eficiència dels panells solars, s'han proposat diferents solucions tecnològiques, com els sistemes de seguiment o els concentradors. Els primers tenen la funció de buscar que el panell es desplaci amb el sol per a aconseguir que la llum sempre incidisca perpendicularment al panell i no de gaidó. Els segons, mitjançant l'òptica, concentren la llum que arriba a una superfície gran en una altra molt més xicoteta, on hi ha les cèl·lules solars. Alguns concentradors solars utilitzen l'holografia com a tècnica per a concentrar la llum amb la mínima despesa.

L'expansió de l'energia solar fotovoltaica sembla imparable. Ens els darrers vint anys no han deixat d'instal·lar-se panells solars basats en silici o de construir-se arreu del món centrals solars gegants, també conegudes com horts solars. La Xina, seguida dels Estats Units, són els principals generadors d'energia fotovoltaica. Espanya és el cinqué país productor europeu, darrere d'Alemanya, Itàlia, Anglaterra i França. Tenint en compte les hores de sol de cada país, crida l'atenció que alguns com Anglaterra o Alemanya estiguen significativament per davant d'Espanya: la nostra producció en 2019 va ser més de sis vegades inferior a la d'Alemanya. En aquest sentit, la voluntat política és determinant: en 2010 es va implantar al nostre territori l'anomenat «impost al sol», que va suposar un greu entrebanc per a l'expansió d'aquest tipus d'energia. Aquest entrebanc va desaparèixer l'any 2019 amb una nova legislació, i des d'aleshores la instal·lació de panells solars s'ha disparat. A més, la fabricació en massa dels

panells solars a la Xina ha fet que el preu d'aquests dispositius haja baixat moltíssim, cosa que n'ha accelerat l'expansió encara més arreu del planeta.

Cal dir, però, que aquest tipus de grans infraestructures també tenen una factura paisatgística i ecològica. A més, un dels problemes encara no resolts d'aquest tipus d'energia és què fer quan se'n produeix de més i com emmagatzemar-la per a les hores d'obscuritat o quan el cel estiga nuvolat, un problema, aquest últim, especialment greu en el cas de construccions aïllades sense connexió a la xarxa. Una de les formes d'emmagatzematge més utilitzades i estudiades actualment és utilitzant hidrogen. Aquest gas és un dels candidats a vector d'energia renovable del futur, ja que presenta una densitat d'energia tres vegades superior a la dels combustibles fòssils i n'hi ha en grans quantitats a la natura (l'aigua n'és la principal font). El repte, però, és emmagatzemar-lo d'una manera que resulte energèticament eficient i compacta.



Instal·lació de plaques solars fotovoltaïques destinades a l'autoconsum en un restaurant de carretera.
Foto: Ijes Solar.

La llum artificial

Cristian Neipp López

Inst. Univ. Física Aplicada a les Ciències i les Tecnologies

Per a comprendre la importància que tenen les fonts d'illuminació en la societat actual, només hem d'imaginar què passaria si en qualsevol moment del dia s'apagaren totes les llums de la ciutat en què vivim. No cal ni que siga de nit: si per exemple s'apagaren les llums a les 12.00 h del migdia, bona part de l'activitat humana es detindria. Tal és la dependència actual de l'ésser humà respecte de la llum artificial.

No sempre ha sigut així. En els seus orígens, l'ésser humà depenia íntegrament de la llum del sol per a poder desenvolupar la seua activitat, inicialment reduïda a tasques de caça, pesca i recollecció. Va ser amb el descobriment del foc, possiblement per l'*Homo erectus*, que l'ésser humà es va alliberar de l'esclavitud de la nit i va guanyar seguretat davant de les bèsties salvatges que rondaven al voltant dels seus assentaments. El control del foc, que impulsaria el desenvolupament de la civilització, es va fer amb manolls de pals lligats junts que produïen una llum brillant i duradora: les torxes.

El següent pas en l'evolució de la il·luminació correspon a les primeres llànties. En les coves de Lascaux (França) s'han trobat llànties que daten de fa uns 15 000 anys. Aquestes cerosols primitius estaven fets de manera natural

amb roques, petxines, banyes o pedres i estaven plens de greix, animal o vegetal, com a combustible. A partir de llavors les torxes i les llànties van constituir el mitjà d'illuminació artificial comunament utilitzat per l'home, i encara que les torxes van mantindre la seua forma bàsica inicial, els cerosols van anar evolucionant amb el pas del temps. Per exemple, en el 600 a. C. es van fabricar llànties de ceràmica en l'antiga Grècia, i és en les minoiques i ateneses que apareixen mànecs per primera vegada. El combustible utilitzat en els llums antics depenia en gran manera de la disponibilitat. L'oli d'oliva va ser probablement el principal combustible utilitzat als països mediterranis, mentre que el de sèsam devia ser majoritari a Orient.

Si bé els llums d'oli van continuar sent utilitzats, en el segle V es va inventar una altra forma d'illuminació artificial, amb un gran simbolisme per al cristianisme i, per tant, per a la civilització occidental: el ciri. Fet amb cera d'abella, que actua com a combustible, el seu ús ha estat associat a les cerimònies o cultes religiosos en la litúrgia cristiana. A més, ha il·luminat també la major part dels monuments i construccions de la civilització occidental des de principis de la nova era.



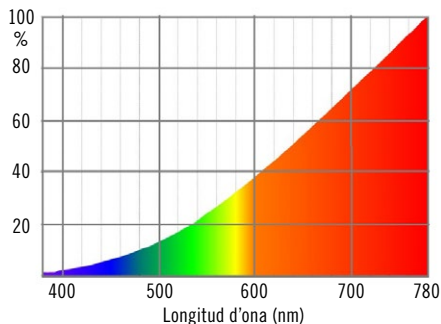
Llànties de moll d'os trobades en les coves d'Altamira. Font: *Prehistorialdia.blogspot.com*.

Les tres fonts de llum anteriors, torxa, llàntia i ciri, comparteixen un element en comú, i és que la llum es genera pel calfament d'un cert material –de naturalesa orgànica en aquest cas–, i s'emet llum quan s'assoleixen temperatures altes. Aquest tipus de font de llum, que es denomina font incandescent, emet llum infraroja i visible i el seu espectre és continu. Que l'espectre siga continu vol dir que emet totes les longituds d'ona (o colors), des de llum infraroja (de longitud d'ona més alta) a llum violeta (de longitud d'ona més baixa). Això es pot comprovar amb un prisma: si l'il·luminem amb una font incandescent com les comentades, podrem observar sobre una pantalla que el prisma descompon la llum, i apareixen tots els colors de l'arc de Sant Martí, a més de la llum infraroja que no veiem.

A partir de la revolució industrial es van produir nous avanços en

il·luminació artificial amb la invenció dels llums de gas a les acaballes del segle XVIII i els llums elèctrics quasi un segle després. El primer llum elèctric va ser creat per l'anglès Humphry Davy, que va utilitzar un banc de bateries i dues barres de carbó, entre els extrems de les quals es va formar un arc de llum. Posteriorment, Joseph Wilson Swan va inventar el llum incandescent (bombeta), una font de llum que continua en ús en els nostres dies i que es podria dir que és un dels invents més importants del segle XIX. El llum incandescent té un funcionament similar al de les fonts de llum esmentades anteriorment, ja que la llum es genera a través del calfament a altes temperatures d'un determinat material, si bé en aquest cas no es tracta d'un material orgànic, sinó d'un filament metàl·lic que es calfa pel pas del corrent elèctric (efecte Joule).

En el segle XX es van inventar noves fonts artificials d'il·luminació, el funcionament de les quals s'explica amb tipus de processos diferents respecte als casos precedents. Així, per exemple, en 1920 Arthur H. Compton, que va rebre el Premi Nobel de Física per demostrar la naturalesa corpuscular de la radiació

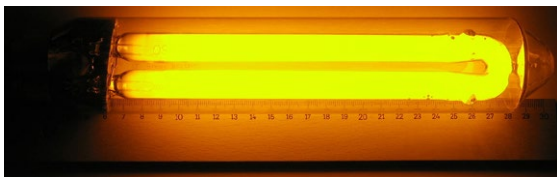


Distribució espectral de llum incandescent.

electromagnètica, va inventar el llum de vapor de sodi. Aquest tipus de font genera llum en enviar una descàrrega elèctrica a través d'un gas ionitzat o plasma.

A diferència dels llums incandescents, l'espectre emès per aquest tipus de fonts de llum ja no és continu. Depenent de l'estructura atòmica del gas s'emeten unes certes longituds d'ona (l'espectre d'emissió del gas), que és el que determina el color de la llum. En el cas del llum de vapor de sodi, la radiació emesa és de color groc (589 nm) i està molt pròxima al màxim de sensibilitat de l'ull humà (555 nm), raó per la qual l'eficàcia d'aquests llums és molt alta. Quan s'utilitzen gasos com el neó, l'argó o el criptó, els llums emeten en tons ataronjats, morats o verds, respectivament. Els llums de descàrrega elèctrica de gas es divideixen en dos tipus, atesa la pressió a què està sotmès el gas: de baixa pressió, que són els que operen a pressions molt per davall de la pressió atmosfèrica, i d'alta pressió, aquells la pressió dels quals és lleugerament superior a l'atmosfèrica. En línies generals, els llums d'alta pressió produeixen un espectre més ampli que els de baixa pressió.

En el segle XX, el descobriment i desenvolupament dels materials semiconductors va tindre repercussió en tots els àmbits de la ciència i la tecnologia, i també en la invenció de noves fonts artificials de llum, com el díode emissor de llum o led (per les



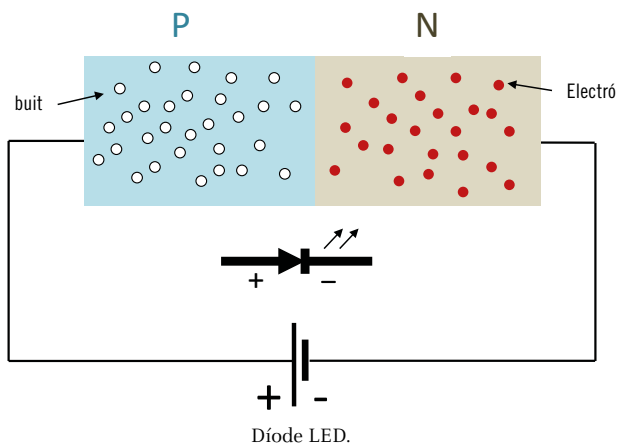
Llum de sodi.

inicials en anglés, *light-emitting diode*), la invenció del qual es deu al soviètic Oleg Lósev en 1927. Per a poder explicar el funcionament dels leds és necessari entendre els principis físics dels semiconductors.

Bàsicament, un semiconductor és un material amb una capacitat de conduir l'electricitat (conductivitat elèctrica) situada entre la d'un material conductor (com el coure) i la d'un material aïllant (com el vidre). Aquesta conductivitat es pot alterar introduint impureses en la xarxa cristal·lina del material semiconductor. Un semiconductor amb impureses diem que està dopat, i aquestes impureses poden ser un excés d'electrons en la xarxa cristal·lina (semiconductor dopat tipus *n*) o un defecte d'electrons (semiconductor dopat tipus *p*). En aquest últim cas



Espectre (discontínu) d'un llum de sodi d'alta pressió. Foto: C. Heilman (CC BY-SA 3.0).



es diu que el semiconductor ha sigut dopat per buits (absència d'electrons). Un led es crea unint un semiconductor de tipus n amb un semiconductor de tipus p ; quan s'aplica un camp elèctric en la direcció de P a N (vegeu la figura superior), els electrons es mouen cap al càtode (pol positiu) i els buits cap a l'ànode (pol negatiu). Durant aquest procés es produeixen recombinacions de buits i electrons

que causen l'emissió d'energia en forma de llum i calor.

Els leds tenen avantatges i desavantatges respecte a altres fonts de llum, com els incandescents o de descàrrega elèctrica de gas. Els avantatges són que presenten, en general, unes dimensions reduïdes, un baix consum d'energia, a penes es calfen i es poden encendre i apagar ràpidament. Els desavantatges són bàsicament que la selecció de longitud d'ona està limitada i que requereixen una resistència limitadora amb un controlador de voltatge.



Leds. Foto: PiccoloNamek (CC BY-SA 3.0).

Rendiment lluminós

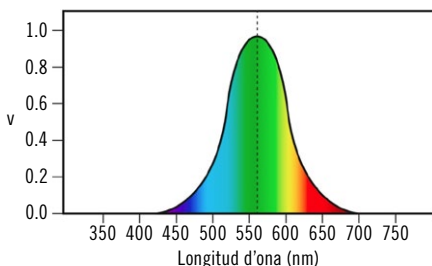
L'avanç en il·luminació ha estat vinculat als avenços tecnològics, i per això actualment hi ha una gran varietat de fonts de llum artificial. Quin criteri utilitzarem llavors per a usar unes fonts o altres? Sembla lògic pensar que l'elecció dependrà de la mena d'activitat humana concreta per a la qual necessitem el sistema d'il·luminació. Per exemple, si pretenem il·luminar un habitatge,

podem distingir entre il·luminació general o ambiental, il·luminació exterior o il·luminació de treball.

La il·luminació ambiental està destinada a il·luminar una habitació íntegrament i ha de proporcionar un nivell uniforme d'il·luminació en tot l'espai, independentment d'altres fonts de llum. La il·luminació exterior generalment s'installa per a garantir la visibilitat i augmentar la seguretat al voltant d'un edifici. La il·luminació de treball il·lumina les tasques que una persona realitza en un espai donat, com ara llegir, cuinar, treballar davant de l'ordinador... En aquest cas es requereix una llum més brillant en un punt focal més o menys concret de la sala.

En qualsevol cas, si bé és necessari utilitzar fonts de llum diferents per a objectius diferents, hi ha algunes característiques que seria desitjable optimitzar de manera general en un sistema d'il·luminació, com poden ser les hores de funcionament, el cost de la instal·lació o el rendiment energètic. En particular, i en la direcció de preservar la sostenibilitat ambiental, és evident que l'optimització del rendiment energètic és absolutament desitjable en qualsevol sistema d'il·luminació actual. L'elecció de fonts de llum amb major rendiment energètic ha de ser una qüestió prioritària a l'hora de dissenyar la il·luminació de qualsevol espai. Ara bé, abans de valorar quin tipus de font de llum és la més adequada d'acord amb aquest criteri, cal entendre què s'entén per rendiment energètic.

Aquest concepte sorgeix del fet que el nostre ull no és sensible a tota la radiació electromagnètica produïda per una font de llum, englobant dins de radiació electromagnètica tot l'espectre conegut:



Corba de sensibilitat espectral.

raigs gamma, raigs X, raigs ultraviolats, llum, raigs infrarojos, microones, ones de ràdio i altres radiacions. De fet, l'ull humà és sensible únicament a la radiació electromagnètica amb longituds d'ona compreses entre 380 i 780 nm, aproximadament, marge que denominem *llum visible*.

A més, no totes les longituds d'ona (colors) són percebudes de la mateixa manera, i el nostre ull respon també de manera diferent de dia (visió fotòpica) i de nit (visió escotòpica). Aquestes diferències a l'hora de percebre la radiació es poden caracteritzar mitjançant la denominada corba de sensibilitat espectral relativa de l'ull humà o corba de visibilitat, $V(\lambda)$, que expressa quantitativament que, a iguals fluxos d'energia de la radiació electromagnètica amb diferents longituds d'ona (en el rang visible de l'espectre), la intensitat de la llum percebuda per l'ull humà és diferent; és a dir, la seua resposta espectral no és plana, sinó corba. Per tant, no tota la radiació emesa per una font de llum és aprofitada (en termes energètics), i podríem definir el rendiment lluminós com la fracció de radiació a la qual el nostre ull és sensible en relació amb la radiació total emesa. En la figura de la pàgina següent es comparen diferents fonts en funció del nombre d'hores útils

Llum incandescent	Llum halogen	Fluorescència compacta	LED
1.000 hores	3.000 hores	10.000 hores	30.000 hores
			
15 W/100 lm	10 W/140 lm	3 W/150 lm	1 W/75 lm
60 W/710 lm	35 W/600 lm	12 W/650 lm	7 W/750 lm
75 W/1100 lm	50 W/910 lm	18 W/1150 lm	10 W/1100 lm
100 W/1600 lm	75 W/1450 lm	23 W/1600 lm	15 W/1400 lm

Comparativa de diferents fonts.

i el rendiment lluminós (mesurat en W/lm o potència consumida/potència útil), en la qual s'observa la supremacia dels leds respecte de la resta de fonts.

Contaminació lumínica

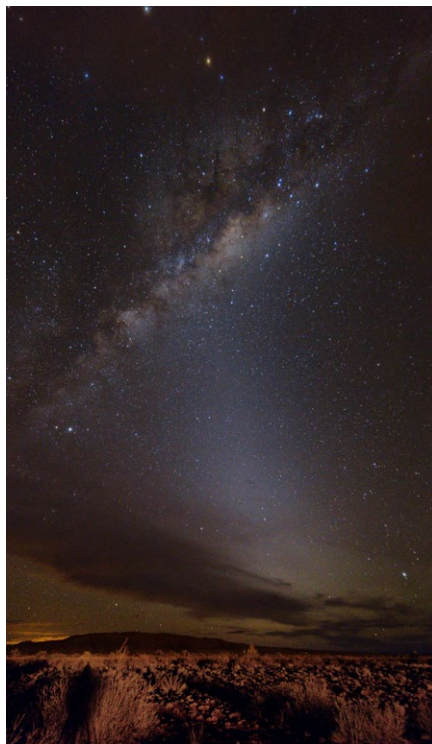
En el que hem descrit més amunt es fa palesa la capacitat de l'ésser humà per a aconseguir fonts de llum artificial cada vegada més potents i més eficients. És un fet que en l'actualitat no hi ha pràcticament cap punt de la superfície terrestre que no es puga observar, de manera directa o indirecta, gràcies als nostres sistemes d'illuminació. Ha quedat clar que l'ésser humà ha guanyat la batalla a la foscor. No obstant això, com ocorre amb una gran part dels avanços de la humanitat, el seu ús indiscriminat i irracional –en aquest cas, de la llum artificial– afecta greument el nostre entorn.

Des d'un punt de vista energètic, és evident que l'ús no moderat de la il·luminació artificial contribueix negativament a la deterioració climàtica. Això és degut a la dependència que la il·luminació artificial té de l'electricitat i al fet que actualment aquesta encara provinga de la combustió d'hidrocarburs fòssils, amb la consegüent producció de gasos que acidifiquen les mars i creen efecte d'hivernacle. Però hi ha un altre aspecte negatiu de l'ús irracional de la il·luminació també preocupant: la contaminació lumínica.

La contaminació lumínica és l'alteració dels nivells de llum natural en l'ambient exterior a causa de les fonts de llum artificial. Aquest fet és clarament perceptible quan observem el cel nocturn des d'una població qualsevol d'un país desenvolupat. El firmament que apreciem no té res a veure amb el que observaríem des d'un lloc deshabitat. Es pot comprovar que en la zona



Percepció del cel nocturn amb contaminació lumínica. Foto: E. Aparicio (Astroingeo).



Cel nocturn en zona lliure de contaminació lumínica. Foto: T. Mazón i R. García.

poblada augmenta notablement la brillantor del cel nocturn. Aquest fet es deu al fet que la llum que es perd cap amunt per la il·luminació exterior nocturna il·lumina les partícules i molècules atmosfèriques, i això produeix un fons lluminós que obstrueix la visió del cel nocturn.

Des d'un punt merament filosòfic, i circumscriuint-nos al principi antròpic, és trist pensar que, des dels llocs que habitem, ja no podem observar el cel que els nostres avantpassats contemplaven. I no hi ha dubte que la pèrdua de percepció de l'Univers des d'on vivim afecta directament la comprensió

d'aquest. L'observació del cel nocturn ha resultat clau per a entendre les lleis que governen el moviment dels astres, però també ha sigut font d'inspiració per a multitud de teories filosòfiques, ens ha permès qüestionar-nos quin és el nostre lloc en el món, quina és la raó de l'existència mateixa. I, no obstant això, actualment és probable que hi haja molta gent jove que ni tan sols ha vist la Via Làctia, la galàxia on vivim, a simple vista.

Però la contaminació lumínica produeix molts altres impactes sobre el medi ambient i la salut dels éssers que hi viuen (animals, plantes i homes),



La península Ibèrica vista des de l'espai. Font: National Geographic.

com demostren una gran quantitat d'estudis i informes científics. Per exemple, l'exposició a la llum durant la nit (si aquesta és blava, l'efecte és més marcat) pot impedir la generació de melatonina, que és totalment necessària perquè l'ésser humà pugui descansar adequadament. Així mateix, els comportaments dels animals, com ara la reproducció, l'alimentació o el son, venen regulats per cicles de llum i foscor naturals. Alterar aquests cicles mitjançant llum artificial té efectes adversos (en ocasions irreversibles) sobre moltes espècies d'animals.

Actualment, la situació de contaminació lumínica és particularment preocupant. El Primer Atles Mundial de Bril·lantor del Cel Nocturn va llançar unes dades desconcertants:

- El 99% de la població de la Unió Europea viu en zones on el cel nocturn està contaminat.
- Per a vora dos terços de la població de la Unió Europea, la «nit» mai arriba realment.
- Al voltant de la meitat de la població de la Unió Europea ha perdut la possibilitat de veure la Via Làctia.
- Aproximadament una sisena part de la població de la Unió Europea ni tan sols pot observar el cel nocturn a causa de l'alta brillantor.

A partir de les impressionants dades disponibles, sembla clar que és indispensable un esforç legislatiu que sigui capaç de promoure un canvi en els hàbits d'il·luminació i en la conscienciació de la gent en general.

El làser i les seues múltiples aplicacions

Marta Morales Vidal i Eva M. Calzado

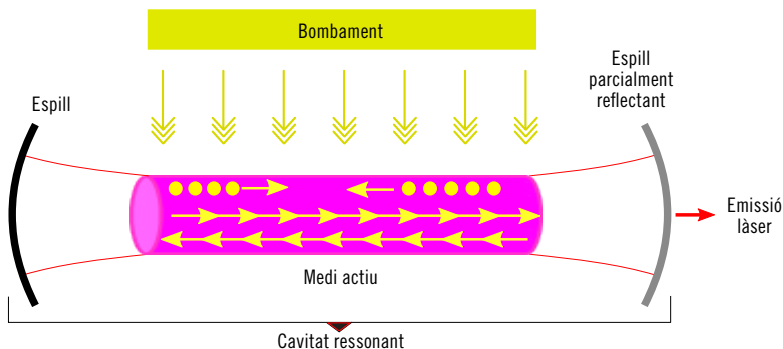
Inst. Univ. Física Aplicada a les Ciències i les Tecnologies

El làser és un dispositiu molt utilitzat en els nostres dies, tant que sovint l'usem sense ser-ne pràcticament conscients: els lectors de codis de barres dels comerços, la impressora làser, els punters làser, els sistemes de telecomunicació basats en fibres òptiques, la depilació definitiva que ens ofereixen en els centres de bellesa... A més, hi ha aplicacions làser en camps tan diversos com la indústria i la medicina que han revolucionat moltes tècniques i processos per a fer-los més senzills i competitius. D'altra banda, és important assenyalar que aquest tipus de llum no solament és important en les aplicacions d'ús quotidià, sinó que ha sigut i és una eina fonamental en investigació que permet

utilitzar tecnologies capdavanteres en diversos camps científics.

El làser està compost per tres parts principals: un medi actiu, un sistema de bombament i una cavitat ressonant. El medi actiu (gas, líquid o sòlid) emet la llum en ser excitat a través del sistema de bombament, que pot ser a vegades un altre làser. Aquest medi actiu està col·locat entre dos espills, que reflecteixen la llum emesa per aquell, de manera que ajuden a amplificar-la. Un d'aquests espills té una xicoteta transmissió, per la qual cosa part de la llum amplificada escapa en forma de feix.

La llum làser no deixa de ser un tipus de llum, però hi ha una sèrie de



Típica estructura d'un làser.

característiques que la fan única respecte a la resta. En primer lloc, la llum d'un làser pot arribar a ser molt intensa, a causa de la cavitat ressonant que amplifica la llum. Per això, els dispositius làser són capaços de concentrar molta energia per unitat de superfície, mentre que la resta de fonts dispersen l'energia en superfícies molt més grans.

D'altra banda, la llum emesa és molt direccional, cosa que significa que els feixos de llum són molt estrets i pràcticament no es dispersen, per més llarg que siga el recorregut que facen (estan col·limats); per això veiem que la

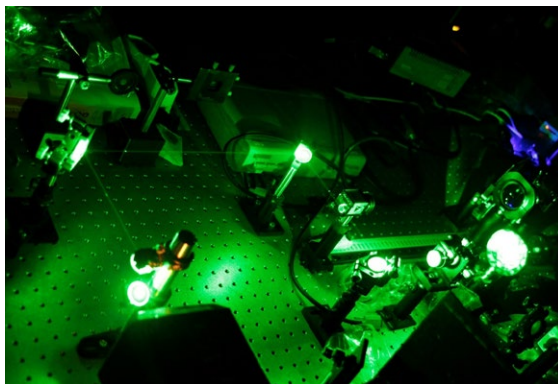
trajectòria que segueix el feix de llum làser és pràcticament rectilínia.

A més, els dispositius làser són capaços d'emetre llum monocromàtica –és a dir, d'un sol color–, i per aquest motiu tècnicament es denominen dispositius monocromàtics. Per contra, una bombeta clàssica, incandescent, emet llum de la mateixa manera com ho fa el Soll, a causa de la seua temperatura, i ho fa en tot el rang de colors visibles; per això percebem llum blanca.

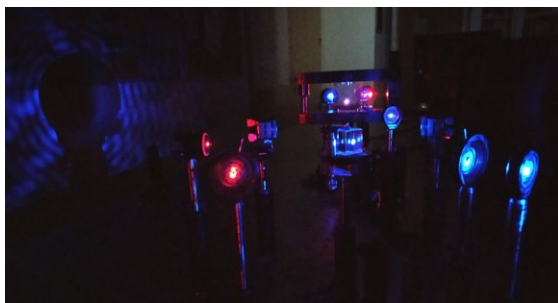
Finalment, la llum làser és coherent, que vol dir que les diferents ones lluminoses que emet un dispositiu làser s'uneixen de forma ordenada i de ma-

nera sincronitzada; és a dir, l'ona emesa té sempre la mateixa forma i es genera amb la mateixa freqüència. La llum led, per la seua banda, és monocromàtica, però presenta una amplada molt superior a la llum làser, i no és coherent.

Per tot això, aquest tipus de dispositius són fonamentals en el desenvolupament tecnològic de la nostra societat. En les imatges podem apreciar una petita mostra de tots els làsers de què disposa la Universitat d'Alacant: un de neodimi YAG de 4 W (llum verda), un d'estat sòlid (llum blava) i un d'heli-neó (llum roja).



Làser de neodimi YAG.



Làser d'estat sòlid i d'heli-neó.

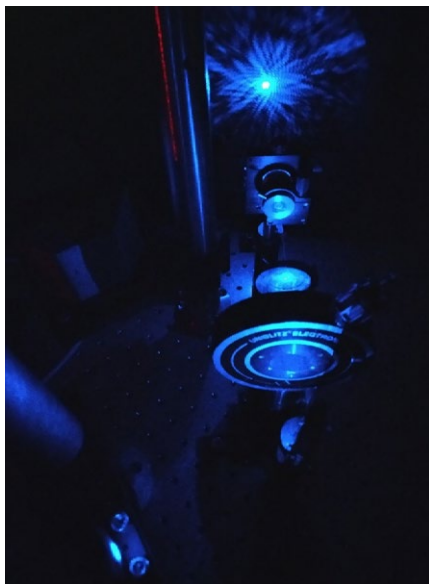
Els orígens del làser

La paraula *làser* és un acrònim de l'expressió «light

amplification by stimulated emission of radiation». Aquesta mena de dispositius es remunten a 1916, quan Albert Einstein intentava entendre com es movien i comportaven els electrons a l'interior dels àtoms.

En principi els electrons poden ocupar diferents posicions, discretes i quantificades, a l'interior de l'àtom emetent o absorbint llum. De manera natural i sense cap agent extern, els electrons són capaços d'emetre llum espontàniament. Einstein va estudiar la possibilitat d'estimular electrons perquè ocuparen determinades posicions a l'interior de l'àtom de manera que foren capaços d'emetre llum d'un determinat color, amb una energia concreta. Aquest procés es denomina *emissió estimulada* i és el procés fonamental en què estan basats els làsers.

No obstant això, la teoria en la qual es fonamenten els dispositius làser i que va donar lloc al primer làser de la història són els treballs desenvolupats pels físics Charles Townes i Arthur Shawlow en 1958, que van desenvolupar el màser, un dispositiu similar al làser. Gràcies a aquestes investigacions prèvies, el 16 de maig de 1960 Theodore Maiman, físic i enginyer de 32 anys, va aconseguir polsos de llum làser en els Laboratoris d'Investigació Hughes (Califòrnia). Aquest descobriment va suposar el començament d'una revolució de l'òptica i va permetre obrir noves línies de treball que fins al moment havien passat desapercebudes, a més d'un interès per desenvolupar diferents tipus de fonts de llum làser amb diferents usos i aplicacions, com els làsers de fibra, els de díode o de semiconductor, els d'excímer, els d'estat sòlid, etc.



Làser d'estat sòlid emetent en el blau.

Fonts de llum làser més utilitzades

La llum emesa per un làser pot ser contínua o per pulsacions. Un làser té funcionament continu quan emet de manera contínua un determinat nivell de potència. D'altra banda, un làser per pulsacions es caracteritza per emetre llum amb una potència periòdica, de manera que el que es generen són polsos de llum amb una duració temporal, una potència de pols i una freqüència de repetició determinades.

Els làsers continus i premuts tenen usos diferents. Encara que la llum làser per pulsacions va ser la primera que es va descobrir, hi havia la dificultat d'aconseguir làsers premuts d'alta potència, pel fet que la llum molt intensa danyava els espills i altres elements òptics. Donna Strickland, en la seua tesi doctoral, dirigida per Gérard Mourou,

va proposar el mètode «chirped pulse amplification». Aquesta tècnica consisteix a estirar temporalment el pols de llum amb fibra òptica per a després tornar a comprimir-lo, cosa que permet manipular llum per pulsacions d'alta potència, i els va valdre als dos el Premi Nobel en 2018. El principal avantatge de la llum per pulsacions és que no calfa les proximitats de les zones irradiades. Aquesta major precisió fa que aquests làsers siguin molt útils per a aplicacions mèdiques, per a restauració d'obres d'art i per a talls de precisió.

A continuació detallem alguns dels làsers més utilitzats en els nostres dies.

Làsers de fibra

En les dues últimes dècades, la tecnologia de làsers de fibra ha evolucionat en gran manera, i en l'actualitat lidera les vendes del mercat de làsers. Aquests làsers poden generar i amplificar un feix de llum intens (100 kW), coherent i monocromàtic. El nucli de la fibra sol contindre terres rares, com iterbi, erbi o neodimi, que permeten l'emissió làser. El bombament d'aquesta mena de làsers sol ser òptic, a partir de díodes. A més, la incorporació de materials absorbents saturables dins de la cavitat fan que aquests làsers permeten generar polsos de llum de manera senzilla i siguin molt compactes i flexibles, fàcilment enrotllables i integrables en manipuladors com robots o taules amb desplaçament monitorat.

Els làsers de fibra es poden fabricar a partir de materials semiconductors i ser usats com a fonts en telecomunicacions. A més, presenten molts

avantatges, com ara compatibilitat amb fibres òptiques, espectre estret i alta potència d'eixida.

Làsers de díode o de semiconductor

Els làsers de díode solen ser bastant xicotets, fins i tot de grandària inferior al mil·límetre, i ofereixen la possibilitat de ser fabricats a gran escala, cosa que els fa molt interessants pel que fa a la comercialització del dispositiu. Per les seues dimensions i per tractar-se de dispositius molt eficients, se solen utilitzar com a fonts de llum en el camp de les telecomunicacions amb fibra òptica. A més, la seua grandària, poc pes, baix consum i rapidesa d'encesa i apagada els fan molt útils per a aplicacions de lectors de discos compactes, impressores, aplicacions mèdiques en dermatologia o fins i tot per a acoblar-los a fibres òptiques (i així el seu ús s'estén, en aquest últim cas, a alguns camps de la indústria i de la ciència).

Làsers de gas

En aquest tipus de làsers el medi actiu està format per un gas o mescla de gasos i pot ocupar un gran volum en comparació amb una altre tipus de làsers. A continuació detallem les característiques principals de diferents tipus de làsers de gas.

Làsers de gas neutre (heli-neó)

El medi actiu d'aquests làsers està compost per una mescla d'heli (85%) i neó

(15%). Es tracta de làsers compactes i xicotets de fàcil manteniment que no requereixen altes potències per a funcionar. En general són làsers que emeten llum contínua de color roig. Entre les aplicacions més quotidianes d'aquesta mena de làsers trobem els lectors de codis de barres, la impresió, alineament, etc.

Làsers de gas ionitzat (argó)

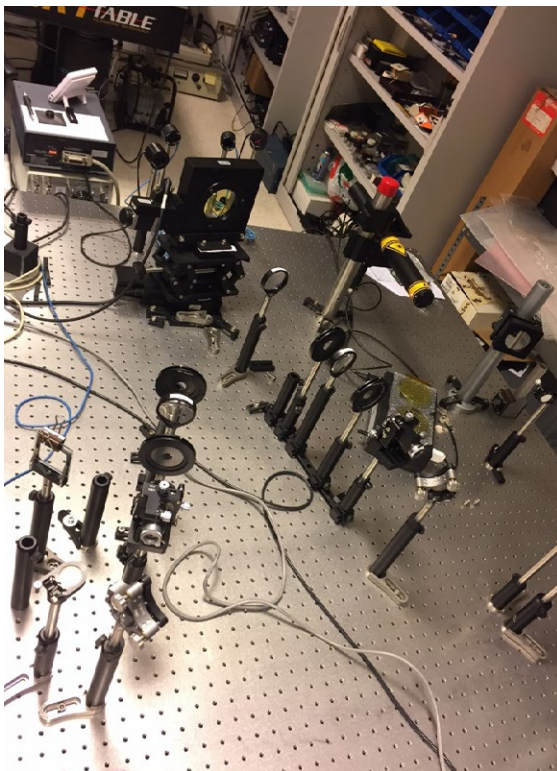
El d'argó és el làser de gas ionitzat més utilitzat. Aquest làser utilitza com a medi actiu un gas noble que és ionitzat a través de descàrregues d'alta tensió. Aquest dispositiu té diverses línies d'emissió, si bé les més intenses són el blau i el verd. Una altra característica important d'aquesta mena de làsers és que emet en el continu i pot presentar potències més altes que un làser d'heli-neó.

Làsers de diòxid de carboni

Són els més utilitzats en aplicacions industrials, ja que són molt potents i eficients a longituds d'ona infraroja, per la qual cosa s'utilitzen en un ampli ventall d'aplicacions, com ara tall, soldadura, perforacions, aplicacions mèdiques



Làser d'heli-neó.



Muntatge experimental.

i cirurgia. Aquest tipus de dispositius tenen un funcionament continu o premut i el seu funcionament està basat en una mescla de gasos de diòxid de carboni, nitrogen i heli.

Làsers de excímer

Aquest tipus de dispositiu làser està format per un gas noble i un halogen. El funcionament d'aquesta mena de làsers és per pulsacions, i s'obté llum emesa amb alta intensitat a longituds d'ona curta (ultraviolada). S'utilitzen per a fotolitografia en la indústria electrònica, per a aplicacions científiques i per a medicina, especialment per a ablacions corneals en correccions d'ametropies (miopia, hipermetropia o astigmatisme).

Làsers d'estat sòlid

Els làsers d'estat sòlid estan basats en un material sòlid, normalment un cristall, que no és pur, al qual se li ha introduït un altre tipus de material, que es denomina *impuresa* i que afavoreix l'emissió de llum làser. Aquest material cristallí pot tindre forma de cilindre, prisma, disc...

Són làsers robustos, de manteniment fàcil i capaços de generar polsos molt intensos. Com a exemples de làsers d'estat sòlid cal destacar el primer làser, fabricat en 1960 amb cristall de robí, i els làsers basats en neodimi en diferents matrius sòlides (com la matriu de granat d'itri-alumini, YAG). S'utilitzen en processament de materials (tall, soldadura, foradament, marcat), medicina, detecció de contaminants, etc.

Algunes aplicacions dels làsers

Processament de materials i litografia

Actualment, el mercat dels làsers està dominat per aplicacions en processament de materials i litografia. Aquest tipus d'aplicacions tenen un gran impacte en la indústria, però també estan molt relacionades amb la investigació i el desenvolupament de nous làsers de gran potència i ultraràpids. Els làsers de fibra estan tenint un gran impacte en aquesta mena d'aplicacions per la possibilitat que ofereixen d'assolir altes potències. A més, són més senzills d'alinear i manejar que els làsers convencionals. Per a aquesta mena d'aplicacions també es poden utilitzar làsers de díode, d'excímer, d'estat sòlid, així com làsers de diòxid de carboni.

Tradicionalment, els làsers han estat molt estesos en la indústria per a tall i soldadura de metalls, però hui dia els materials metàl·lics estan sent reemplaçats per nous materials sintètics més lleugers, com la fibra de vidre o de carboni. Aquests materials sintètics tenen un gran impacte en la indústria automobilística, naval i aeroespacial, i per aquest motiu el desenvolupament de nous làsers adaptats al tall, soldadura i perforat d'aquests materials és ja una realitat. Els làsers tenen també el seu nínxol de mercat en àrees de la indústria relacionades amb el marcatge ceràmic i tèxtil.

De manera més simbòlica, els làsers s'han utilitzat per al tractament de diferents tipus de superfícies, per exemple en la restauració de façanes d'edificis històrics o fins i tot per a millorar la rugositat superficial de pròtesis dentals.



Tall de metall amb làser de plasma. Foto: Parcreativo (CC BY 4.0).

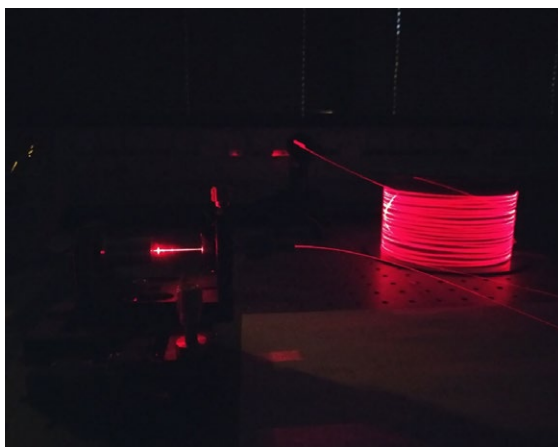
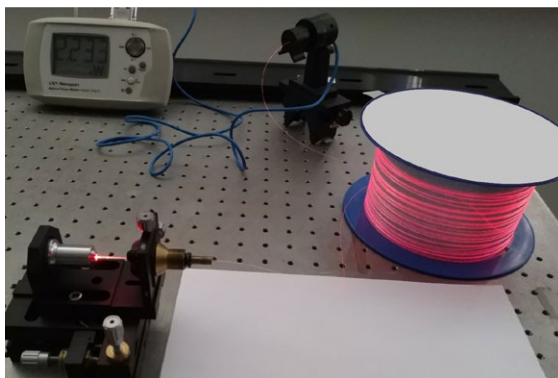
Telecomunicacions

En els últims anys, els díodes làser han sigut un element fonamental per a l'avanç de les telecomunicacions i l'emmagatzematge de dades a escala mundial. La transmissió d'informació en comunicacions de curta i llarga distància està dominada per la fibra òptica. Aquesta ens permet estar connectats a través d'ordinadors o línies telefòniques i permet comunicacions d'alta velocitat (pràcticament a la velocitat de la llum), cosa que ha representat el reemplaçament dels tradicionals cables de coure coaxials.

La fibra òptica és capaç de confinar la llum al seu interior mitjançant un guiatge òptic. El fonament està basat

en la reflexió total interna produïda en les parets del material (amb un índex de refracció major al del material que envolta la fibra).

L'espectre electromagnètic més utilitzat en les comunicacions per fibra òptica es troba en l'interval de l'infraroig pròxim –per això no podem veure aquesta llum amb els ulls–, en concret, en les finestres de 850 nm, 1310 nm i 1550 nm. Actualment, el que es persegueix és poder transmetre la llum a través de guies de fibra òptica amb la menor quantitat de pèrdues possible. En la imatge de la pàgina següent es veu llum visible propagant-se per la fibra òptica en les pràctiques de l'assignatura Dispositius Fotònics i Optoelectrònics del màster en Telecomunicació.



Fibra òptica utilitzada en el camp de les telecomunicacions.

Medicina i estètica

El camp de la medicina, i en concret el de l'oftalmologia, va ser pioner en l'aplicació de la tecnologia làser. La transparència dels mitjans oculars (còrnia, humor aquós, cristallí, humor vitri) permeten que el feix làser penetre fins al fons de l'ull i tracte patologies en la retina de manera senzilla i no invasiva.

En les dues últimes dècades, les tècniques de cirurgia ocular per a la correcció visual d'ametropies (miopia,

hipermetropia i astigmatisme) s'han estès a pràcticament totes les clíniques oftalmològiques. El procediment en aquesta mena de tractament es basa a modelar amb el làser la part interna de la còrnia. Gràcies a l'avanç dels làsers ultraràpids és possible fer els talls requerits en la intervenció de forma més neta, precisa i menys invasiva. En la línia d'aconseguir talls molt precisos sobre teixits biològics, el làser ha anat reemplaçant el bisturí en molts tipus de cirurgies. Per exemple, en cirurgia refractiva és possible substituir la ganiveta que s'utilitza per a alçar la capa més superficial de la còrnia que protegeix l'ull de l'exterior per un làser molt potent i amb pulsacions capaces de fer talls molt precisos i nets en la còrnia de l'ull. També els làsers de fibra òptica estan permetent tractar teixits o òrgans interns de manera

menys invasiva i amb talls de menor profunditat i grandària.

La tecnologia làser s'utilitza al seu torn sobre la superfície de teixits biològics per a tractar unes certes patologies dermatològiques. En aquest cas s'aprofita el control de la radiació sobre unes certes zones o teixits molt específics per a eliminar-les de manera selectiva. L'avantatge d'aquests tractaments làser és que són capaços d'eliminar només unes certes cèl·lules o teixits, i amb això s'aconsegueixen uns tractaments



Esquema de correcció de miopia amb làser d'excímer.

molt segurs, efectius i en certs casos reversibles.

Un fonament molt similar és utilitzat en molts tractaments d'estètica com la depilació làser o l'eliminació de tatuatges amb làser. En el cas de la depilació per làser el que es fa és eliminar el borrisol per calfament mitjançant la utilització de llum. Per a fer-ho es trien dispositius que emeten llum en un determinat rang de longituds d'ona, de manera que la melanina del pèl, que és la que produeix el color, l'absorbeix i siga destruïda per efecte de la calor. Com més melanina continga el borrisol més eficient serà la depilació amb aquesta tècnica. Per això el pèl fosc s'elimina amb més facilitat que el clar.

Hi ha també unes certes eines de diagnòstic en medicina que aprofiten les peculiaritats de les fonts làser per aconseguir imatges d'alta resolució i en profunditat en teixits biològics, com la tècnica de tomografia de coherència òptica (OCT).

Tanmateix, malgrat totes les aplicacions esmentades en aquest capítol, encara estan oberts molts avanços relacionats tant amb la tecnologia làser com amb les seues aplicacions. Algunes aplicacions làser que encara no estan molt esteses en medicina, però que pel seu impacte prometen tindre molt de futur per davant, són les pinces òptiques i els biosensors òptics. Per la seua banda, les pinces òptiques tenen

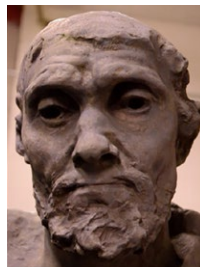
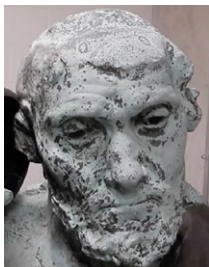


Aplicació de làsers ultraràpids per a fer talls en cirurgia refractiva.



Depilació per làser de díode. Foto: Akire Estética.

un gran futur com a eina molt útil per a la manipulació de biomolècules de manera no invasiva. Respecte als biosensors òptics, es tracta d'una línia d'investigació altament sol·licitada per la repercussió que tindrien en la societat els nous mètodes de detecció de malalties de manera precoç i no invasiva. En particular, els biosensors fabricats per mètodes hologràfics podrien permetre la detecció molt ràpida de biomolècules, fins i tot per personal no especialitzat, únicament a través de l'observació d'un canvi de color en la llum que emet el biosensor.



Ús del làser per a eliminar la corrosió sobre una escultura de bronze. Font: *Philamuseum.tumblr.com*.

La difracció: quan les ones troben obstacles

Andrés Márquez Ruiz

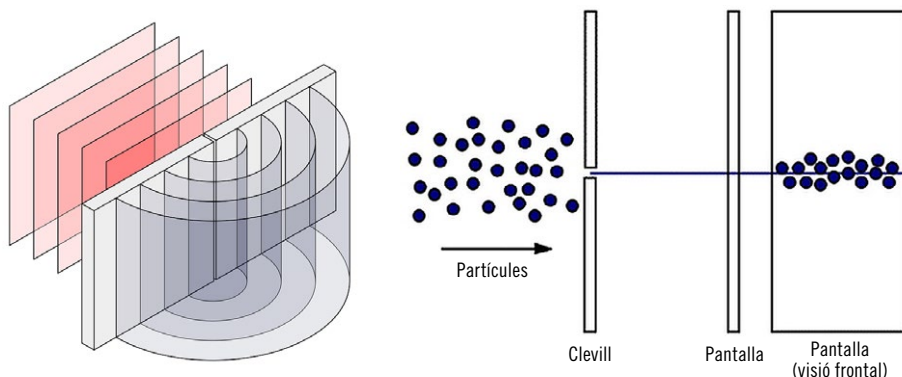
Inst. Univ. Física Aplicada a les Ciències i les Tecnologies

Quan les ones troben un obstacle, la direcció de propagació inicial és modificada. Aquest fenomen és el que anomenem *difracció*. Llavors poden passar situacions tan interessants com que l'ona es propague dins de la regió d'ombra de l'obstacle. Això no és possible quan el que incideixen sobre l'obstacle són partícules: en aquest cas, no trobarem cap partícula darrere de l'obstacle (zona d'ombra), ja que hauran estat bloquejades.

La difracció permet, per tant, distingir quan ens trobem davant d'un moviment de partícules o d'un moviment ondulatori. La llum, quan es propaga, es comporta com una ona

(electromagnètica) i, per tant, dona lloc a fenòmens de difracció com els que veurem més avall. De moment, tinguem en compte que la difracció és un fenomen general que afecta qualsevol tipus d'ona, com les que es formen en la superfície d'un líquid. Així, en la imatge de la pàgina següent podem veure com funciona la difracció en les ones del mar quan troben un obstacle: les ones «rodegen» l'obstacle i arriben a punts que estan just darrere d'aquest.

Històricament, cal destacar que va ser el científic francès Augustin Fresnel qui a principis del segle XVIII va plantejar per primera vegada l'estudi



Quan es troben amb una obertura, ones i partícules es comporten de manera diferent.



Ones en la mar i difracció per un obstacle. Fotos: Verbcatcher i Dmitris1 (CC BY-SA 4.0).

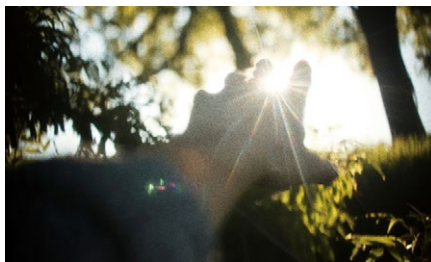
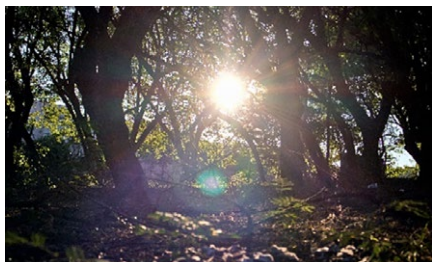
matemàtic dels fenòmens de difracció. Per a fer-ho, es va basar en la teoria de les onetes plantejada per Huygens, científic holandès del segle XVII, segons la qual cada punt d'un front d'ones actua d'emissor d'ones secundàries. La superposició d'aquest conjunt d'ones secundàries darrere de l'obstacle dona com a resultat la modificació de la direcció de propagació del front d'ona incident. Veiem, així, que difracció i interferències estan molt relacionades entre si.

La difracció de la llum en la natura

Podem trobar exemples de difracció de la llum en la natura. Normalment, els

efectes que es produeixen ens criden molt l'atenció. Així, en les imatges que tenim més avall veiem que la llum es difracta i la seua trajectòria es desvia en passar entre obstacles: en un cas, les fulles dels arbres, i en l'altre, els dits d'una mà.

En la imatge també podem veure una altra característica relacionada amb la difracció, i és que la desviació provocada en la trajectòria depén del color de la llum, és a dir, depén de la longitud d'ona: els rojos, de major longitud d'ona, es desvien més (són més difractats) que els blaus, de menor longitud d'ona. Això, com veurem, permet analitzar quina és la composició cromàtica de la llum, és a dir, el seu espectre.



Difracció de la llum en situacions quotidianes en la natura. Fotos: J. Tomaz i E. Pellegrini (Unsplash).

La difracció i l'espectre de les fonts de llum. La xarxa de difracció i el DVD

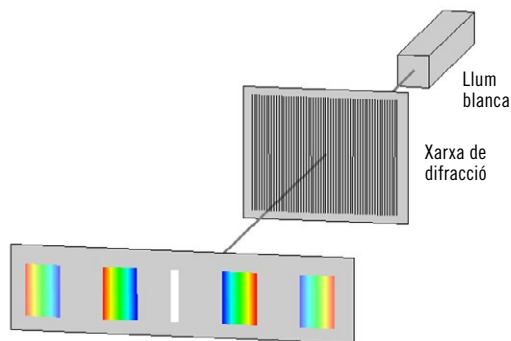
Potser hi ha dos tipus d'obstacles que són els més habituals i que donen lloc a una gran quantitat de fenòmens lligats a la difracció. D'una banda, tenim les obertures o forats, que acabem de comentar. Però quan els obstacles es repeteixen amb una certa periodicitat, aleshores parlem de xarxes de difracció. Quan un feix de llum incideix sobre una xarxa de difracció, aquesta desvia la llum en diferents direccions, però de manera diferent per a cada longitud d'ona. Això ens permet descompondre la llum blanca en els colors de l'arc iris, tal com es faria amb un prisma. La diferència és que en el cas del prisma el fenomen responsable és la refracció, i la llum violeta és la que més es desvia; en la xarxa de difracció la responsable és la difracció, i és la llum roja la que més es desvia.

Un exemple de xarxa de difracció present en la vida quotidiana el trobem en la superfície dels discos òptics CD, DVD o Blu-Ray. En aquests discs, la informació s'enregistra al llarg d'una

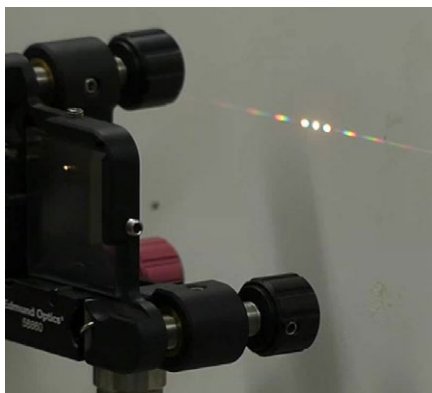
sèrie de pistes concèntriques separades entre si una distància fixa. D'aquesta manera, el que tenim al llarg de qual-sevol radi de la superfície del disc és una xarxa de difracció. Quan la llum incideix sobre la superfície, veiem que aquesta es descompon en els colors que en conformen l'espectre.

Ja sabem que hi ha fonts de llum que tenen una tonalitat més blava, més blanca, etc. L'anàlisi de la llum difractada per la xarxa ens permet quantificar quines longituds d'ona (quins colors) emet la font de llum concreta que estem analitzant. Un fluorescent té tots els colors del visible; un led, només una part al voltant del seu color característic, i un làser podem dir que emet un color molt pur.

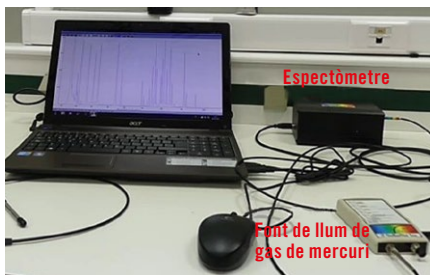
En la imatge següent mostrem una experiència portada a terme en el nostre laboratori. Usem un làser de llum blanca per a incidir amb un feix de llum sobre una xarxa de difracció, que genera uns ordres de difracció sobre una pantalla. En la imatge podem apreciar com es distribueixen sobre la pantalla els diferents colors que componen el feix de llum blanca. Podem



La xarxa de difracció permet separar els diferents colors de la llum. El disc òptic n'és un exemple.



La llum blanca que incideix sobre una xarxa de difracció se separa en diferents ordres de difracció, i dins de cada un d'ells els colors se separen entre si.

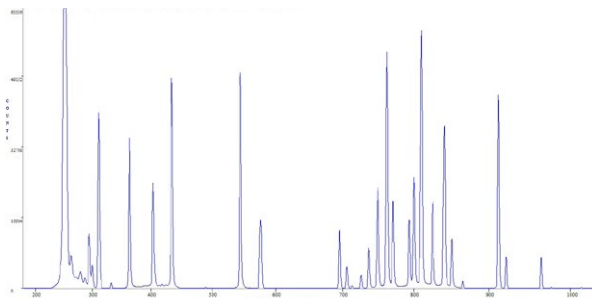


comprovar també que els blaus es desvien (difracten) menys i els rojos es desvien (difracten) més.

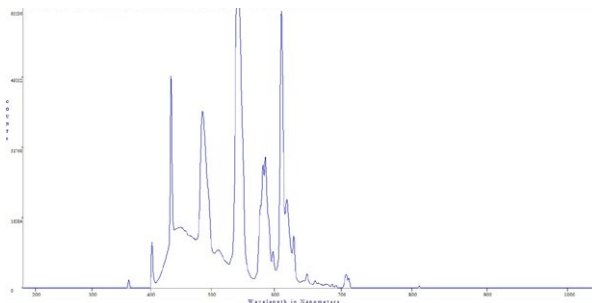
D'altra banda, una de les tasques que fem al laboratori és mesurar l'espectre de les diferents fonts de llum, o l'espectre reflectit o absorbit per un material que hem fabricat.

Per a fer-ho disposem d'espectròmetres, que són aparells que incorporen a l'interior una xarxa de difracció que, com ja sabem, separa els components de color de la llum que entra a l'aparell. Dins de l'espectròmetre hi ha uns espills que s'encarreguen de portar aquesta llum a un sistema detector que transforma en electrons l'energia dels fotons, i aquesta lectura s'envia a un ordinador que arplega i representa gràficament quants fotons de cada color hi han arribat.

En la imatge veiem els diferents elements de l'experiment: tenim un ordinador connectat a l'espectròmetre –la



Mesura de l'espectre d'emissió d'una font de llum de gas de mercuri.



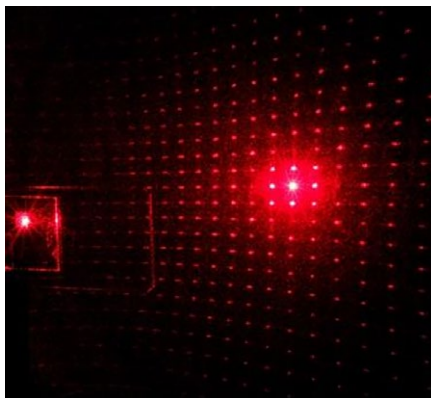
Els pics corresponen al mercuri de dins dels tubs, mentre que el fons continu està originat pel material que recobreix l'interior del fluorescent.

caixa negra de la dreta–, que, a través d'una fibra òptica, rep la llum que volem analitzar, que està generada per una font de llum de gas de mercuri (l'aparell de colors a la part inferior dreta). La pantalla de l'ordinador ens mostra la representació de l'espectre: a l'eix d'abscisses tenim la longitud d'ona, i a l'eix d'ordenades, quina quantitat s'ha detectat de cada color. Els diferents pics corresponen a l'espectre d'emissió dels àtoms de mercuri i estan relacionats amb els seus nivells energètics. Cada àtom té un espectre característic que seria únic, i permet identificar-lo gràcies a l'espectròmetre.

Si, en canvi, captem la llum directament dels fluorescents del sostre del laboratori, orientant-hi el sensor de la fibra òptica, aquesta porta la llum a l'espectròmetre i l'ordinador ens en mostra l'espectre, en el qual podem identificar uns pics –corresponents al gas de mercuri que hi ha dins del tub fluorescent– que destaquen sobre un espectre continu que cobreix tot l'espectre visible, que correspon al material fluorescent que recobreix la cara interna del tub fluorescent.

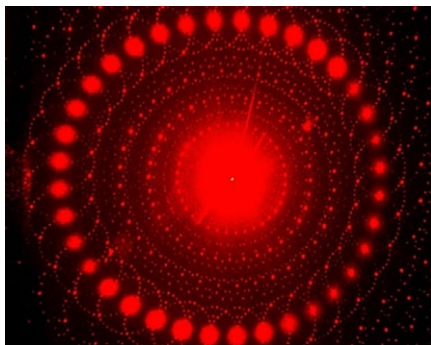
La difracció permet mesurar les estructures més petites. Descobriment de l'estructura de l'ADN

Quan la llum (o qualsevol ona en general) incideix sobre una estructura periòdica, com ara una xarxa de difracció, no solament tenim que es descompon per difracció en l'espectre de colors, sinó que, a més, la llum es divideix en punts separats periòdicament. Aquesta separació revela el període i orientació de l'estructura periòdica.

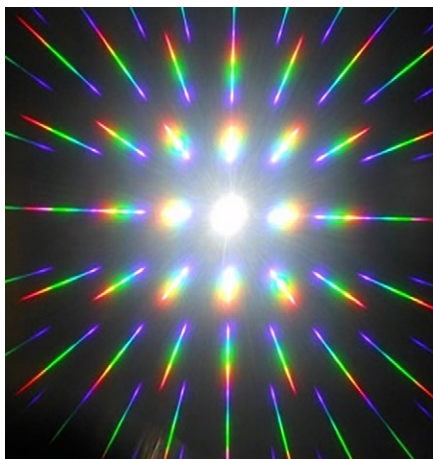


A l'esquerra, un objecte transparent sobre el qual incideix un feix de llum. En la pantalla, a la dreta, el feix s'ha dividit en una graella de punts amb simetria cartesiana, que revela la mateixa simetria en l'objecte difractor.

Si el període de l'estructura és més petit, els punts se separen més. La direcció en què se separen es correspon amb la direcció on tenim la periodicitat. Amb tot això es pot reconstruir l'estructura de l'objecte. En la imatge veiem el patró de difracció produït per diverses estructures periòdiques. També veiem com es combina amb la separació en l'espectre de colors quan s'illumina



Patrons de difracció que revelen la geometria de l'objecte. Foto: Natural Philo (CC BY-SA 3.0).

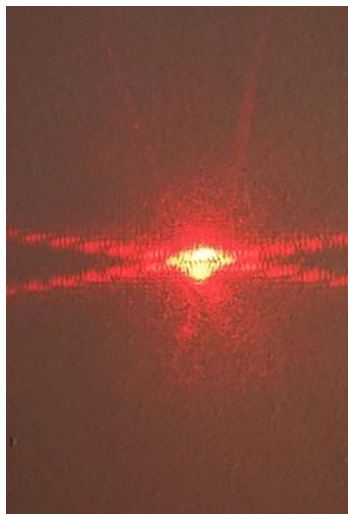
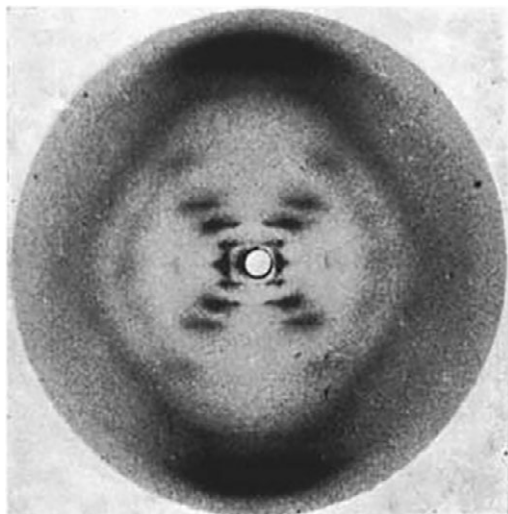


Si el feix incident és de llum blanca, s'obté un patró de difracció amb separació de colors al mateix temps.

amb llum blanca. Cal dir que, per a poder apreciar els efectes de la difracció,

la llum incident ha de ser coherent espacialment.

Això és especialment útil quan l'objecte és molt petit, ja que llavors és molt difícil de veure amb un microscopi, però és quan la difracció genera punts més separats, i amb aquest procediment alternatiu és més fàcil de compondre'n l'estructura. Precisament, va ser gràcies a la difracció deguda a la seua estructura periòdica que es va poder deduir la estructura de l'ADN, la famosa doble hèlice. La denominada foto 51, presa per Rosalind Franklin i el seu ajudant Raymond Gosling, va ser fonamental per a determinar-ne l'estructura. El model va ser proposat per Watson i Crick, que van ser els qui, de manera molt polèmica, es van emportar tots els honors en ser guardonats amb el Premi Nobel de Fisiologia i Medicina en 1962.



A l'esquerra, la coneguda com a foto 51. A la dreta, patró de difracció produït en il·luminar l'espiral d'un quadern, on veiem que l'estructura manté moltes semblances amb característiques del patró de la foto 51.

L'holografia: molt més que imatges tridimensionals

Augusto Beléndez Vázquez

Dept. Física, Enginyeria de Sistemes i Teoria del Senyal

La forma clàssica de produir i emmagatzemar imatges permanents d'objectes que emeten o difonen llum és la fotografia. De fet, les primeres imatges fotogràfiques de la història es van fer ja fa més de dos segles i les va realitzar Joseph-Nicéphore Niépce (1765-1833), si bé va ser Louis Daguerre (1787-1851) qui a partir de 1839 va perfeccionar el mètode de Niépce. Els problemes llavors estaven relacionats amb l'obtenció d'una pel·lícula fotogràfica en la qual es poguera enregistrar la imatge i que aquesta s'hi mantinguera al llarg del temps.

Com és ben sabut, en una fotografia el caràcter tridimensional de l'objecte fotografiat es perd, perquè el que veiem sobre el paper o en la pantalla d'un ordinador és una versió bidimensional de l'objecte. No obstant això, les investigacions que va iniciar en 1948 el físic i enginyer d'origen hongarès Dennis Gabor (1900-1979) van donar lloc al naixement d'una tècnica d'emmagatzematge d'imatges en tres dimensions, l'holografia, el desenvolupament i les aplicacions de la qual continuen en l'actualitat. Inicialment el treball de Gabor no va generar molt d'interès, i fins i tot es va mantindre quasi inadvertit durant quasi quinze anys. No va ser fins a

la invenció del làser en 1960 quan es va produir un ressorgiment de l'holografia, que es va transformar en un camp d'investigació prioritari.

Encara que la reconstrucció d'una imatge en tres dimensions donant la sensació de relleu és, sens dubte, una de les realitzacions més espectaculars i més conegudes de l'holografia, n'hi ha moltes altres aplicacions en àmbits molt diferents. La interferometria fotogràfica, els elements òptics fotogràfics, les memòries fotogràfiques, el processament òptic d'informació, els hologrames generats per ordinador, l'holografia digital, els hologrames de seguretat, la litografia fotogràfica, l'holografia solar o els sensors fotogràfics són només algunes de les múltiples aplicacions científiques i tècniques basades en el mètode fotogràfic. Stephen Benton (1941-2003), un dels pioners de l'holografia i inventor de l'holograma que incorporen les targetes de crèdit, va assenyalar en més d'una ocasió que «és la intersecció d'art, ciència i tecnologia el que fa l'holografia tan interessant». La veritat és que, juntament amb innumbrables aplicacions científiques i tecnològiques, l'holografia és un dels pocs camps científics que han proporcionat un mitjà per a l'art.

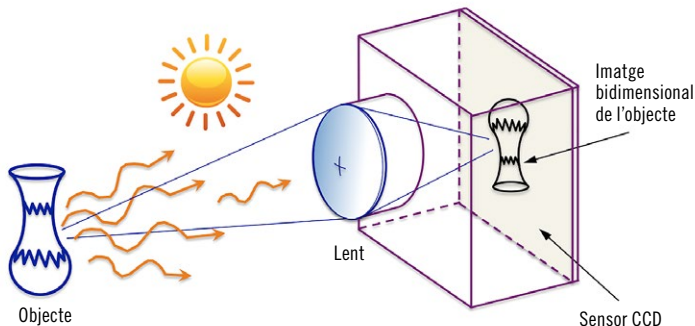
Què és un holograma?

Per a un físic, un holograma és l'enregistrament de la interacció de dues ones coherents en la forma d'un patró microscòpic de franges interferencials en un mitjà fotosensible adequat. Per a un llec en física però ben informat, és una pel·lícula fotogràfica o placa d'un altre material fotosensible que ha sigut exposada a la llum del làser i processada de tal manera que en ser il·luminada de manera convenient produeix una imatge tridimensional. Per a algú menys informat és només algun tipus de fotografia tridimensional. No obstant això, la fotografia i l'holografia produeixen la imatge d'una forma completament diferent, de manera que no és possible descriure en els mateixos termes la manera en què es formen els dos tipus d'imatges, la fotogràfica i l'hologràfica.

Resulta senzill mostrar com la lent de l'objectiu d'una càmera fotogràfica forma la imatge d'un objecte sobre el sensor CCD sense utilitzar més que un simple traçat de raigs i conceptes bàsics d'òptica geomètrica. Per a enregistrar aquesta imatge, les càmeres

fotogràfiques utilitzaven al principi emulsions fotosensibles, encara que des de fa ja alguns anys es fan servir sensors digitals CCD.

Com que la tècnica fotogràfica es coneix des de fa tant de temps, estem acostumats a veure el món tridimensional comprimit en la bidimensionalitat de la pàgina d'un àlbum de fotos o una revista o en la pantalla del cinema o la televisió. Tots ells comparteixen la limitació de ser només representacions de la intensitat de les ones lluminoses. Dit d'una altra manera, quan la imatge d'una escena es reproduïx a través d'una fotografia, el que finalment s'observa no és una reproducció precisa de l'ona lluminosa que inundava l'objecte, caracteritzada per la seua amplitud i fase, sinó més aviat un enregistrament punt a punt de la intensitat d'aquesta ona (el mòdul quadrat de la seua amplitud). La llum que es reflecteix en una fotografia porta amb si informació sobre l'amplitud, però res sobre la fase de l'ona que provenia de l'objecte original. Ara bé, si tant l'amplitud com la fase de l'ona original es pogueren reconstruir d'alguna manera, l'ona resultant no es distingiria de l'original.



Esquema de la fotografia d'un objecte utilitzant una càmera fotogràfica.

És fàcil d'entendre si tenim en compte que quan observem un objecte el que ens arriba als ulls és l'ona emesa o difosa per aquest. Per tant, si d'alguna manera aconseguirem reproduir aquesta ona i aquesta arribara als nostres ulls, ens semblaria que prové de l'objecte original. Llavors seriem capaços de veure la imatge formada en una tridimensionalitat perfecta, exactament com si l'objecte estiguera realment davant de nosaltres.

Això és el que es pot aconseguir amb l'holografia, mètode que permet obtenir imatges tridimensionals i que consta de dues etapes denominades *enregistrament* i *reconstrucció*. Amb el procés d'enregistrament s'emmagatzema en determinats materials fotosensibles, i en forma de franges d'interferència, la informació necessària per a reconstruir posteriorment un front d'ona quasi idèntic al que va donar lloc a aquesta informació. El material fotosensible impressionat i processat, suport d'aquesta informació, constitueix l'holograma, del grec *holos*, que significa «la totalitat».

Una diferència fonamental respecte de la fotografia és que ara, en compte d'emmagatzemar-se la imatge bidimensional de l'objecte, s'emmagatzema informació suficient per a poder reproduir l'ona objecte mateixa. És com si amb l'holografia es poguera «congelar» l'ona procedent de l'objecte i posteriorment «posar-la una altra vegada en marxa». En aquest sentit un holograma és com una «finestra amb memòria».

La realització d'un holograma requereix l'enregistrament i la reconstrucció d'ones lluminoses, i pot dir-se que un holograma conté l'enregistrament

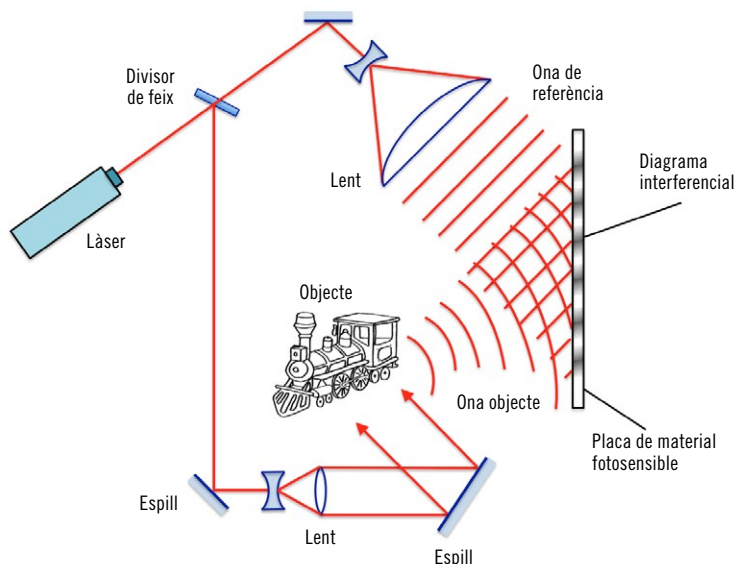
codificat d'una ona objecte. Per a explicar la formació de la imatge hologràfica és necessari recórrer als conceptes d'*interferència* i *difracció*, tots dos característics dels fenòmens ondulatoris.

En l'etapa d'enregistrament es fa interferir l'ona emesa o difosa per un objecte amb una ona de referència coneguda. El «codi hologràfic» consisteix a «mesclar» l'ona objecte amb l'ona de referència i enregistrar el seu patró interferencial en un material fotosensible –com pot ser una pel·lícula fotogràfica– que, una vegada processat, dona lloc a l'holograma. Aquest conté informació codificada tant de l'amplitud com de la fase de l'ona objecte.

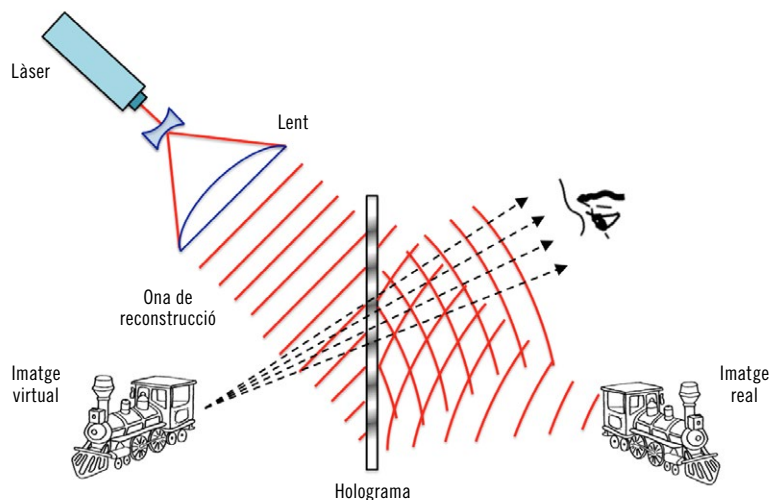
Per a descodificar la informació emmagatzemada en l'holograma i reconstruir així una rèplica de l'ona objecte original, l'holograma s'illumina en l'etapa de reconstrucció amb una ona anàloga a l'ona de referència utilitzada en l'etapa d'enregistrament. Aquesta ona és difractada per la complexa estructura de franges d'interferència emmagatzemada en l'holograma, i això genera una ona imatge de característiques similars a l'ona objecte original. D'aquesta manera, si mirem a través de l'holograma veurem una imatge tridimensional de l'objecte, encara que aquest ja no es trobe allí, perquè disposem de la seua ona i és aquesta la que ens arriba als ulls. Aquest front d'ona imatge reconstruït és pràcticament indistingible de l'ona original procedent de l'objecte i pot produir els efectes visuals del feix primitiu.

Perquè es produïsquen interferències és necessari que la llum siga coherent, com la llum del làser. A més, si ens fixem en l'enregistrament de l'holograma més senzill, en el qual tant l'ona

ENREGISTRAMENT



RECONSTRUCCIÓ



Enregistrament (dalt) i reconstrucció (baix) d'un holograma per transmissió d'un objecte difusor. En mirar a través de l'holograma podem veure una imatge virtual de l'objecte tridimensional, que ofereix una sensació de relleu.

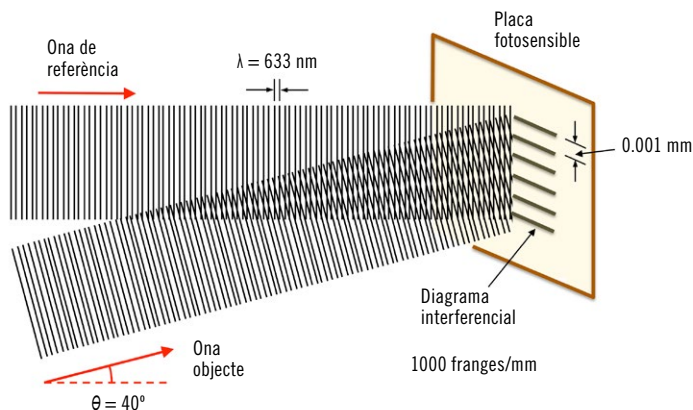
objecte com l'ona de referència són ones planes, si l'angle entre les dues és de 40° i la llum és la d'un làser d'heli-neó, és a dir, de longitud d'ona 633 nm (un nanòmetre són 10^{-9} m), llavors la distància entre les franges d'interferència que cal emmagatzemar és de 0,001 mm, és a dir, hi ha mil franges per mil·límetre. Això requereix, d'una banda, que el material fotosensible tinga resolució suficient per a emmagatzemar tal quantitat de franges d'interferència per mil·límetre i, d'una altra, una total absència de vibracions durant l'enregistrament de l'holograma; per això, el millor és que el muntatge òptic estiga situat sobre una taula o tauler antivibratori en el qual tots els elements estiguen fixats a la taula amb imants o caragols.

El desenvolupament del làser a partir de 1960 va resoldre la primera d'aquestes dificultats, la de la coherència de la llum, mentre que la segona es va anar superant amb la utilització d'emulsions fotogràfiques, fotoresines, gelatines dicromatades, fototermoplàstics, fotopolímers i altres materials

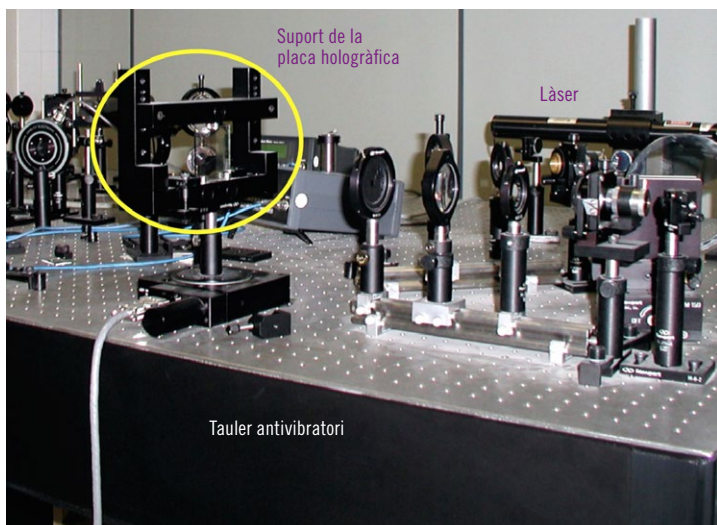
fotosensibles aptes per a l'enregistrament d'hologrames. Tant els làsers com els materials d'enregistrament són els responsables del desenvolupament de l'holografia i de les seues innombrables aplicacions.

L'holograma de la il·lustració es coneix com holograma per transmissió i es caracteritza perquè tant el feix de referència com el feix de reconstrucció incideixen sobre la mateixa cara de la placa de material fotosensible. En aquesta mena d'holograma, tant l'enregistrament com la reconstrucció s'han de fer amb llum làser i es formen dues imatges, una de real i una de virtual en la posició en què es trobava l'objecte original. Mirant a través de l'holograma es veu l'objecte, i a més es veu en tres dimensions.

Un altre tipus d'holograma és l'holograma per reflexió, generat per primera vegada per Iuri Denisyuk (1927-2006). En aquest cas s'utilitza la llum del làser per a l'enregistrament, com en l'holograma per transmissió, però ara els feixos objecte i referència incideixen



Etapa d'enregistrament hologràfic per transmissió usant un làser d'heli-neó.



Muntatge hologràfic típic sobre un tauler antivibratori.

cadascun d'ells per una de les cares de la placa fotosensible. Aquest tipus d'holograma per reflexió es caracteritza perquè es pot reconstruir amb llum blanca, de manera que la imatge de l'objecte apareix en la seua posició original i del color de la llum utilitzada durant l'enregistrament o lleugerament diferent, segons si el gruix del material fotosensible ha variat durant el processament. Per això l'holograma per reflexió ha sigut el més utilitzat amb finalitats artístiques.

Quines aplicacions té l'holografia?

Tot i que, com ja hem dit, la reconstrucció d'una imatge en tres dimensions donant una perfecta sensació de relleu és una de les realitzacions més espectaculars i més conegudes, hi ha moltes altres aplicacions de l'holografia en àmbits molt diferents. Una de les primeres

aplicacions científiques i tecnològiques de l'holografia es va iniciar just un any després, en 1965, ara fa poc més de cinquanta anys, i va ser la interferometria hologràfica, que suposa un mètode molt poderós d'anàlisi no destructiva. Amb aquesta tècnica es poden visualitzar les formes de vibració d'instruments, estudiar les deformacions d'objectes degudes a esforços o bé analitzar la distribució de temperatura, per exemple, a l'interior d'una bombeta. Al llarg de les línies que apareixen en l'interferograma de la imatge la temperatura és constant.

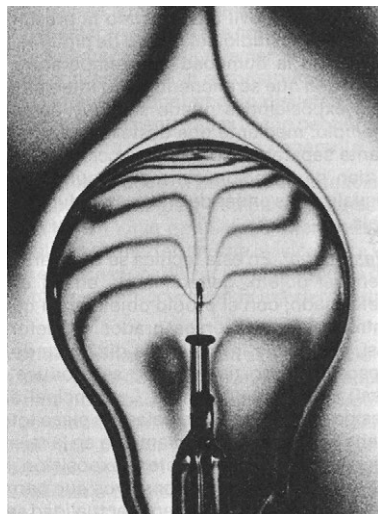
La interferometria hologràfica es pot aplicar a l'estudi de fenòmens de transport, la visualització del flux de fluids, el mesurament de components en ambients hostils o corrosius o la realització d'assajos no destructius, i fins i tot s'ha aplicat en camps com l'ortopèdia, en el mesurament de les deformacions d'ossos i pròtesis o en estudis

relacionats amb la conservació i restauració d'obres d'art.

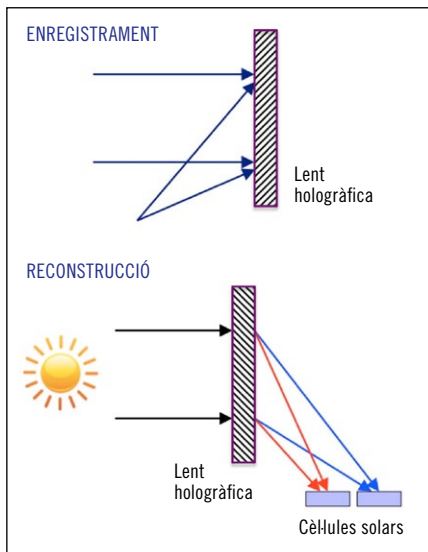
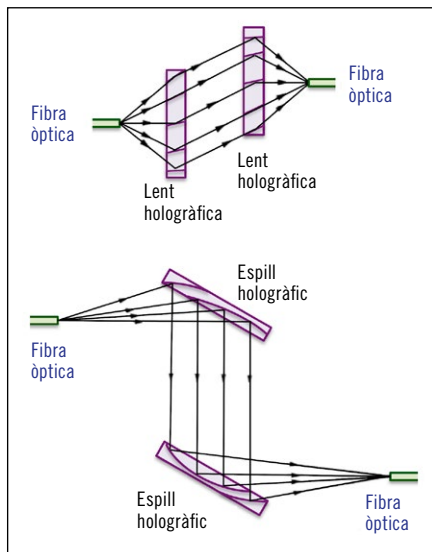
Una de les aplicacions de l'holografia que més s'ha desenvolupat és la fabricació d'elements òptics hologràfics com xarxes de difracció, lents, espills i altres dispositius més complexos, com els interconnectors de fibres òptiques o els concentradors solars.

També s'han utilitzat elements òptics hologràfics com a escàners per a la lectura dels codis de barres. Aquests escàners estan formats per un disc amb sectors, cadascun dels quals és una lent hologràfica que defleix el feix de llum incident en una determinada direcció.

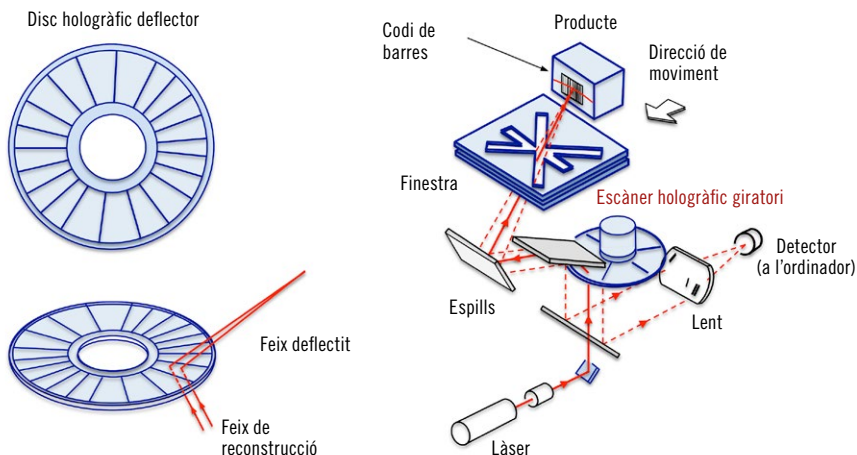
En la nostra societat, dominada per les tecnologies de la informació, la utilització de l'holografia en l'emmagatzematge d'informació és una de les aplicacions que en aquests moments



Estudi amb interferometria hologràfica de la distribució de temperatura a l'interior d'una bombeta (1984). Al llarg de les línies de l'interferograma la temperatura és constant.
Foto: Centre d'Holografia d'Alacant.



Elements òptics hologràfics utilitzats com a interconnectors de fibres òptiques usant tant lents com espills hologràfics (esquerra) i concentradors solars (dreta).



Elements òptics hologràfics utilitzats com a escàners per a la lectura de codis de barres.

presenten més interès. Amb el multiplexatge es pot enregistrar un gran nombre d'hologrames en una mateixa placa, i posteriorment és possible recuperar la informació separatament. Aquest és el principi de les memòries hologràfiques, en les quals es pot emmagatzemar en poc espai una gran quantitat d'informació. Encara que les majors dificultats tècniques per a portar-la a la pràctica han estat relacionades amb l'obtenció d'un material d'enregistrament adequat, ja s'han fabricat els primers prototips de sistemes d'emmagatzematge hologràfic amb discos hologràfics amb una capacitat d'emmagatzematge de 300 Gb, i fins i tot es parla ja de terabytes.

A més d'enregistrar-se hologrames amb un làser, és possible obtenir hologrames generats per ordinador, en els quals aquest s'utilitza per a calcular el diagrama interferencial sobre la superfície de l'holograma i es representa, per exemple, en un modulador espacial de llum. La possibilitat de fabricar píxels

cada vegada més xicotets en aquests moduladors ha fet que la qualitat i l'aplicabilitat d'aquests hologrames augmenti. Aquests hologrames són només una part d'un camp més ampli conegut com a holografia digital.

En 2014 es va publicar un article en la revista *Advanced Optical Materials* que demostrava la possibilitat d'utilitzar sensors hologràfics basats en les propietats dels hologrames per reflexió. En particular, quan s'illuminen aquests hologrames amb llum blanca, el color de la llum reflectida depèn de les variacions de gruix de l'holograma en canviar la separació entre les franges d'interferència emmagatzemades. S'ha proposat aplicar-los, per exemple, per a mesurar el pH o per al diagnòstic mèdic.

Els hologrames de seguretat són potser l'aplicació més important de l'holografia des del punt de vista comercial. La dificultat tècnica que té la realització d'hologrames i el fet que només amb mitjans complexos i sofisticats



Holograma en un bitllet de cinc euros. Foto: D. Gough (CC BY 2.0).

sigués possible produir en sèrie còpies d'un holograma original han fet de l'holografia una tècnica adequada per a sistemes de seguretat. És ben conegut que s'utilitzen hologrames en targetes de crèdit, bitllets de banc, documents d'identitat o etiquetes de productes comercials, però també s'han inclòs en alguns productes farmacèutics que es comercialitzen al sud-est asiàtic, on està molt estesa la venda de medicaments il·legals. En tots aquests casos, la utilització d'hologrames pretén evitar o, com a mínim, dificultar-ne la falsificació.

També és possible obtenir retrats fotogràfics. El primer va ser realitzat la nit d'Halloween de 1967 i va ser un autoretrat de Lawrence Siebert, de l'empresa Conductron, a Ann Arbor (Michigan, EUA).

Enregistrar hologrames de persones presenta dos problemes importants: en primer lloc, el model hauria d'estar completament quiet durant l'exposició i, en segon lloc, el subjecte tendeix a tancar els ulls quan s'exposa a la llum

del làser. Encara que la persona intenta estar completament en repòs, no pot deixar de respirar, els músculs no estan rígids i el cor continua bategant. Tot això produeix moviments i fa que l'holograma no pugui ser enregistrarat correctament.

Siebert va resoldre aquest problema utilitzant làsers per pulsacions, amb breus polsos de llum que duren uns pocs nanosegons (10^{-9} segons). Utilitzant aquesta mena de làsers és possible fer retrats fotogràfics, perquè l'alteració de l'escena que s'ha d'enregistrar és pràcticament nul·la durant el temps de duració del pols. Un retrat fotogràfic històric és el de Dennis Gabor, un holograma de transmissió realitzat en 1971 per R. Rhinehart, de la McDonnell Douglas Electronics Corporation, per a celebrar la concessió del Premi Nobel de Física.

L'holografia també s'utilitza en els museus per a substituir alguns objectes delicats i valuosos pels seus hologrames o per a substituir els objectes originals



Dennis Gabor al costat del seu retrat hologràfic. Imatge: MIT Museum.

en exposicions itinerants. Per exemple, en 1984 es van fer en la Universitat d'Alacant una sèrie d'hologrames de reflexió del Tresor de Villena, i en diversos països s'han utilitzat hologrames d'aquest tipus per a la conservació d'obres d'art considerades tresors arqueològics, a través d'un vast programa de col·laboració entre físics i museòlegs.

El problema dels hologrames enregistrats amb la llum d'un únic làser és que en reconstruir-los es veuen d'aquest mateix color. Tanmateix, es poden aconseguir hologrames en color si en el procés d'enregistrament s'utilitzen tres làsers: roig, verd i blau. La fidelitat en la reproducció de formes, colors i brillantor és tan espectacular que és difícil dir si el que es veu és l'objecte mateix darrere d'una finestra de vidre o es tracta d'una reproducció hologràfica.

L'any 1968 es va publicar en la revista *Leonardo* un article que assenyala la possibilitat d'utilitzar l'holografia

com una nova forma d'art, i de seguida alguns artistes es van endinsar en l'aventura hologràfica, com Salvador Dalí, que en 1972 va fer una exposició en la galeria Knoedler de Nova York que incloïa hologrames, a la qual va assistir el mateix Gabor.

L'holografia té un innegable interès com una de les tècniques més revolucionàries de creació d'imatges tridimensionals, i la seua capacitat d'atracció i fascinació és enorme. Davant de l'espai estàtic i constant de la pintura o la fotografia, l'espai hologràfic implica el moviment de l'espectador i una variació de la imatge mentre es produeixen angles de visió diferents en la percepció dinàmica de la imatge hologràfica. És important, però, no confondre l'holografia amb imatges estereoscòpiques, com les generades amb una piràmide de projecció 3D en els telèfons mòbils, que transmeten una sensació tridimensional a l'observador, però no tenen



Hologrames per reflexió del Tresor de Villena fets en el Centre d'Holografia d'Alacant en 1984.

tota la informació de l'ona d'un objecte tridimensional, com fa l'holografia.

Per acabar, cal assenyalar que l'holografia pot aplicar-se utilitzant una gran part de l'espectre electromagnètic, des d'imatges amb microones i radar fins als raigs X, passant pels infrarojos, l'espectre visible i la radiació ultravioleta. També es poden utilitzar feixos

d'electrons o neutrons i fins i tot ones sonores. Hi ha hologrames artístics, retrats fotogràfics i hologrames en color, i també podem trobar hologrames en les botigues de regals, en llibres, en museus, en targetes de felicitació o en segells de correus.

Els hologrames de seguretat són un gran negoci: targetes de crèdit, bitllets

de banc... fins i tot hi ha hologrames en les etiquetes de certs productes, com la roba esportiva, per a assegurar-ne l'autenticitat i distingir-la de les imitacions.

La interferometria hologràfica és una tècnica que s'aplica en àrees molt diverses, els elements òptics hologràfics s'utilitzen en sistemes òptics molt variats, i també s'utilitza l'holografia en l'emmagatzematge òptic d'informació i en la fabricació de sensors.

Veiem que l'holografia ha donat lloc a un gran nombre d'aplicacions i ha proporcionat tècniques que poden utilitzar-se en moltes àrees d'investigació pura o aplicada. Per això costa molt trobar un camp científic o tècnic en

el qual no es puguin aplicar mètodes hologràfics. De fet, no és fàcil buscar una activitat d'investigació en la qual no s'utilitzen tècniques hologràfiques per a alguns dels seus desenvolupaments, incloent-hi àrees aparentment tan allunyades com l'arqueologia o la paleontologia.

Volem acabar aquest breu recorregut que hem fet per l'holografia amb unes paraules d'Emmett Leith (1927-2005), un dels seus pioners, que l'any 1986 afirmava: «L'holografia pot semblar un camp d'investigació sense molta amplitud; ara bé, si la combines amb altres camps, aconseguiràs una àrea prou gran per a poder dedicar-li tota una vida».



Visor hologràfic, consistent en la projecció sobre un espill hologràfic d'informació que l'observador, sense necessitat de moure el cap, veu superposada sobre els objectes de l'exterior.

La fibra òptica

Daniel Puerto García

Inst. Univ. Física Aplicada a les Ciències i les Tecnologies

L'ús de senyals de llum codificats per a la transmissió d'informació no és una cosa nova. La llum procedent del foc d'una foguera ha sigut un mètode molt estès per diverses cultures i civilitzacions per a la comunicació entre punts distants. Una altra gran «bola de foc», com és el Sol, s'utilitzava en l'antiga Grècia com a font de llum, que era transmesa, de manera rudimentària, per mitjà d'espills a manera de senyals d'informació. Molt després, en 1792, Claude Chappe va dissenyar un sistema de telegrafia òptica a través d'un conjunt de torres distribuïdes entre Lilla i París, des de les quals s'enviaven senyals codificats que eren observats des d'altres torres per mitjà de telescopis o ulleres de llarga vista. Aquests missatges eren transmesos de torre en torre de tal manera que era possible enviar missatges codificats al llarg de 200 km, des de la torre origen fins a la torre destinació, en només quinze minuts.

No obstant això, l'autèntica esplendor de les comunicacions òptiques es va iniciar en el segle passat amb el desenvolupament de la fibra òptica. El guiatge de llum a l'interior d'un medi es basa en les equacions proposades per Willebrord Snel van Royen (1580-1626) en la coneguda com a llei de Snell, i que relacionen l'índex de refracció del medi pel

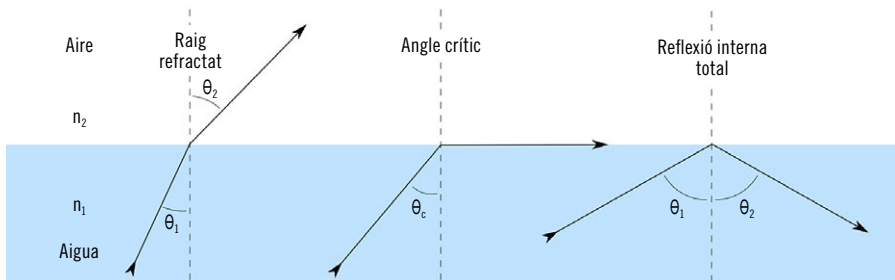
qual viatja el feix de llum (n_1) i l'angle d'incidència (θ_1) amb l'índex (n_2) i angle (θ_2) del material en el qual es refracta, tal com descriu l'equació:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

També, de forma més genèrica, per les equacions de Fresnel, proposades per Augustin-Jean Fresnel (1820).



Gravat d'un telègraf òptic de Chappe.
Foto: Musée des Arts et Métiers (París).



Llei de Snell. Fenòmens de refracció i reflexió. Imatge: Josell7 (CC BY-SA 3.0).

Tal com es dedueix de la llei de Snell, quan l'índex de refracció n_2 és menor que l'índex de refracció n_1 , hi ha un angle d'incidència θ_1 per al qual l'angle del raig refractat és de $\theta_2 = 90^\circ$. Aquest angle d'incidència es coneix com angle crític θ_c i ve donat per:

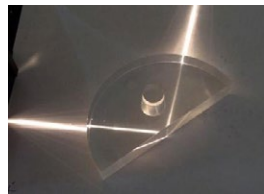
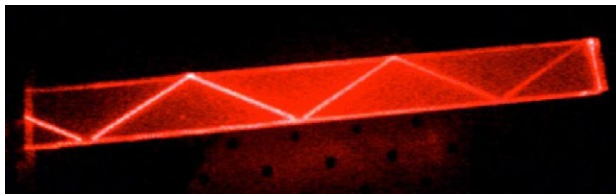
$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Atenent aquest fet, per a tot angle d'incidència superior a l'angle crític es produirà el fenomen conegut com reflexió total interna, pel qual tota la llum és reflectida de manera que queda confinada en el primer medi.

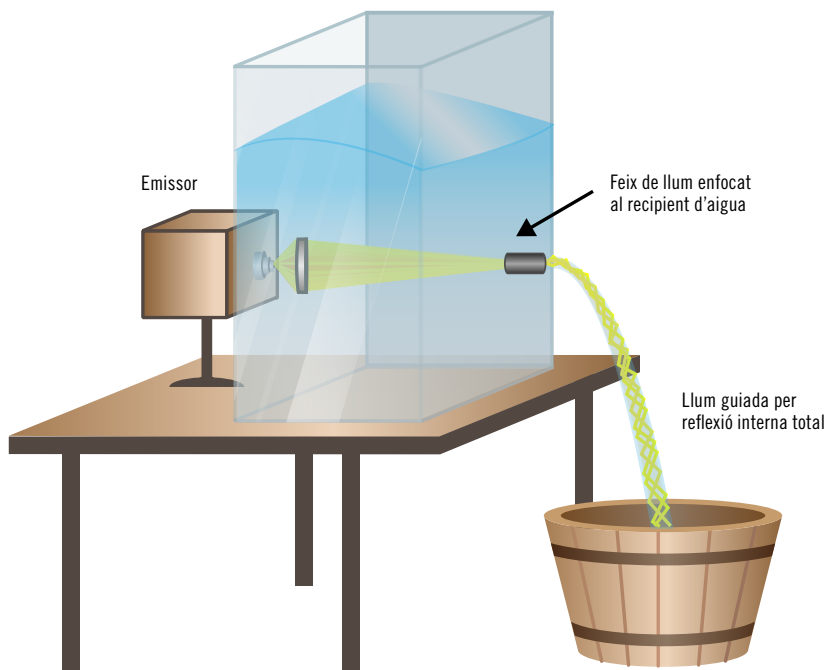
Basant-se en aquests fenòmens que experimenta la llum en canviar de medi, John Tyndall va fer en 1870 uns estudis sobre la propagació de la llum dins de l'aigua en els quals va observar

que la llum queda guiada a l'interior d'aquest material seguint la «corba» que aquesta hi fa per reflexió total interna. A partir d'aquests principis es van dur a terme una sèrie d'estudis en els quals es va demostrar el potencial dels materials transparents a la llum visible (dielèctrics) com a medis eficaços per a la transmissió d'informació a llarga distància. En són un exemple els cables de vidre obra de Demetrius Hondros i Peter Debye (1910) o les fibres de sílice de Lamb. No obstant això, la gran limitació d'aquestes primeres tècniques de transmissió i dels materials utilitzats era el baix rendiment de la transmissió de llum per les altes pèrdues i la inexistència de dispositius d'acoblament òptic.

Malgrat aquests desenvolupaments, no és fins a 1952 que el guiatge de llum



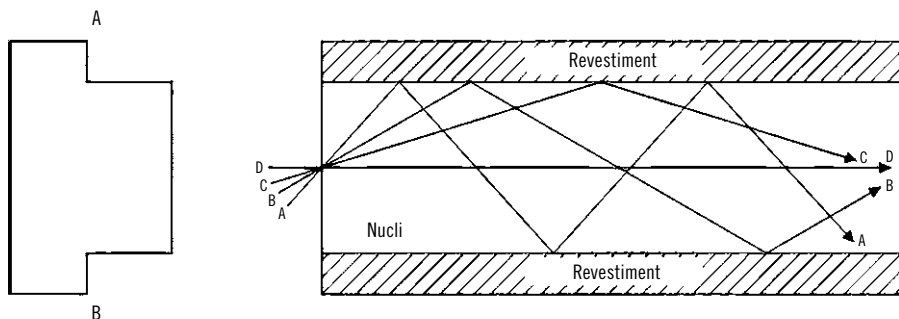
Exemples de reflexió total interna en un bloc de metacrilat i un vidre semicilíndric. Fotos: Sai2020 i Friedrich Graf (CC BY-SA 3.0).



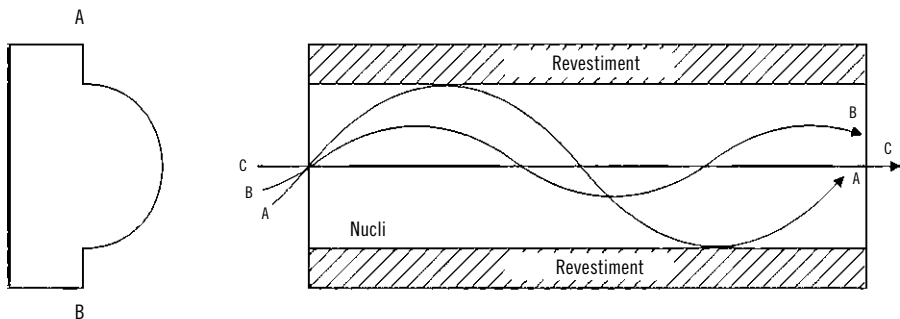
Font de llum de Jean-Daniel Colladon. Esquema: Carlos Jiménez (CC BY-SA 3.0).

a l'interior d'un material obté un impuls quasi definitiu a causa dels treballs de Narinder Singh Kapany, que donen origen a la invenció de la fibra òptica amb cobertes en 1959. Aquestes fibres

òptiques estan formades per un nucli cilíndric de material dielèctric envoltat per una coberta també dielèctrica que té un índex de refracció inferior al del nucli, cosa que permet el guiatge per



Esquema d'una fibra òptica de salt d'índex. Font: *Textoscientificos.com*.



Esquema d'una fibra òptica d'índex gradual. Font: *Textoscientificos.com*.

reflexió total interna. Aquestes fibres es coneixen com fibres de salt d'índex.

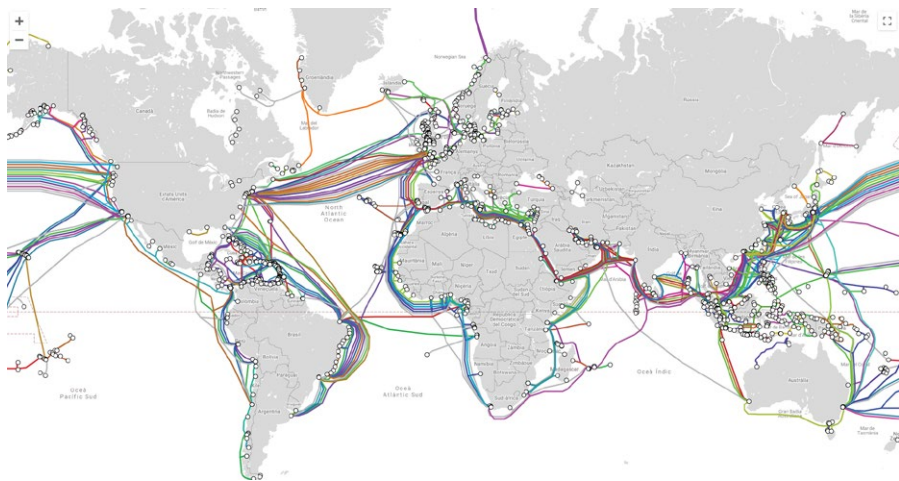
En les dècades següents, les investigacions sobre les comunicacions per fibra òptica van aconseguir avanços molt considerables associats a la reducció de pèrdues. Les pèrdues són degudes a impureses presents en el material i tenen l'origen en bona part en el procés de fabricació. Això ho van posar de manifest els treballs de Charles K. Kao (Premi Nobel de Física per l'impuls de les comunicacions òptiques per fibra) i G. A. Hockham (1966), en els quals es van obtenir valors d'atenuació de 1.000 dB/km. El desenvolupament de noves tècniques de fabricació en atmosfera controlada va contribuir enormement a la reducció d'impureses metàl·liques en el material durant la fabricació, i ràpidament, en 1979, es van obtenir valors de 0,2 dB/km.

Les primeres fibres desenvolupades permetien la propagació de diversos modes en el seu nucli, que viatjaven a diferents velocitats de grup, fet que dona lloc al que es coneix com *dispersió intermodal*. Per a reduir la dispersió intermodal es van proposar les guies d'índex gradual, on l'índex de refracció

a l'interior del nucli creix de manera gradual des de la vora fins al centre. No obstant això, amb el temps es van anar imposant les fibres monomode per a comunicacions d'alta velocitat i llarga distància. Aquestes fibres s'obtenen reduint el diàmetre del nucli ($< 10 \mu\text{m}$), i pel fet de ser monomode permeten evitar la dispersió intermodal.

L'aparició de noves fonts làser, com els làsers de semiconductors, va permetre el desenvolupament de la conversió de la informació d'elèctrica a òptica de forma més eficient i ràpida. L'últim impuls de la tecnologia es deu a l'aparició i desenvolupament de l'amplificador totalment òptic, que va fer possible la transmissió de senyals òptics a grans distàncies mitjançant la regeneració i amplificació de senyals sense necessitat de conversió intermèdia en senyal elèctric.

Hui dia, a causa de les baixes pèrdues i al menor cost respecte del desplegament de satèl·lits, la fibra òptica s'ha convertit en un dels principals mitjans de flux d'informació mundial, amb la formació de grans xarxes continentals i transoceàniques de comunicació amb cables de fins a 6.600 km



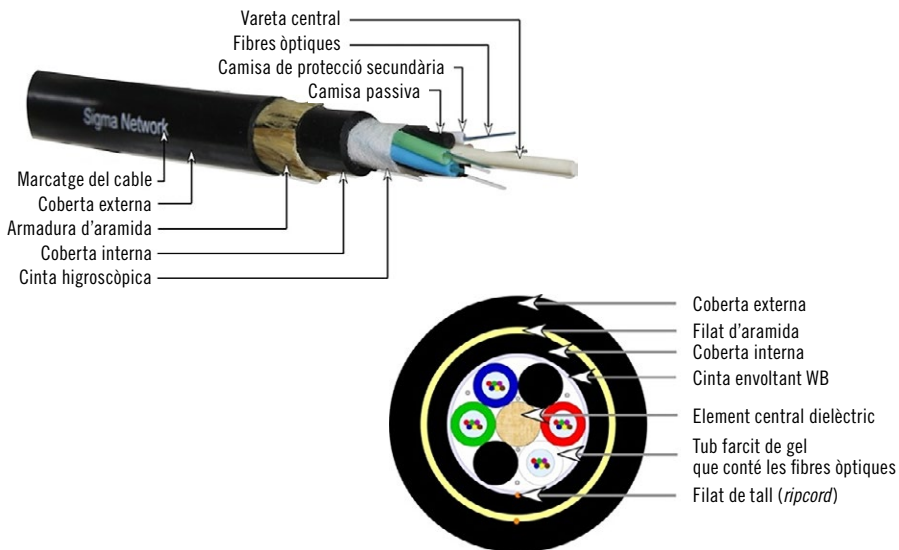
Mapa mundial de cables submarins. Font: *Submarinecablemap.com*.

de longitud i capacitats de fins a 160 TB/s. L'enorme amplada de banda que ofereix permet multiplexar en una fibra un gran nombre de senyals d'informació a través de la discriminació per longitud d'ona.

Aquests cables, de pocs centímetres de diàmetre, contenen al voltant de huit parells de fibra òptica i estan rodejats d'una sèrie de capes (acer, alumini, etc.) que els protegeixen davant de possibles trencaments i humitat, o, en el cas del coure, permeten proporcionar energia elèctrica als amplificadors que se situen al llarg de la línia per a regenerar el senyal òptic. El poc pes i volum que presenten aquests cables, al costat de la seua immunitat davant d'emissions electromagnètiques i de radiofreqüència, ha fet que hagen substituït quasi per complet el cable de coure en nombroses aplicacions.

L'impuls de les comunicacions òptiques a grans distàncies per mitjà de fibra òptica ha servit com a impuls per al

desenvolupament d'altres components òptics integrats en fibra i guia d'ona, més enllà de l'amplificador òptic, i que són essencials en les xarxes de comunicació. Dispositius com acobladors, filtres o xarxes de difracció òptica han sigut desenvolupats en les últimes dècades, basats en modificacions de fibres òptiques, per a facilitar l'assemblatge amb aquestes en els sistemes de comunicacions òptiques. A més, s'han desenvolupat nombrosos sensors de fibra òptica que s'utilitzen per a la detecció del moviment, la temperatura o la humitat. El seu ús en medicina també s'ha estès gràcies a la seua reduïda grandària. Així, a través de xicotetes incisions, els metges poden arribar a les vies aèries dels pulmons, als plects intestinals o a les cavitats del cor i fer-hi tasques com ara endoscòpies o laringoscòpies, però també per a cauteritzar vasos sanguinis, per a detindre hemorràgies o per a destruir plaques i coàguls de les artèries perifèriques.



Estructura d'un cable de fibra òptica. Font: *Sigmanetwork.es*.

De la comunicació òptica a la computació òptica: el xip òptic

Amb el desenvolupament de les comunicacions òptiques a grans distàncies de les últimes dècades ha aparegut un segon focus d'interès centrat en la generació de dispositius intermedis (commutadors, acobladors, etc.) i finals (emissors, receptors, computadors, etc.) purament òptics i de menys grandària que els basats en fibra. Els actuals dispositius, en els quals conviuen parts òptiques amb electròniques, presenten una limitació en la velocitat de processament a conseqüència de les conversions de senyal òptic a electrònic i viceversa.

El desenvolupament de dispositius purament òptics requereix la implementació de xips òptics que substituïsquen els electrònics. En aquest sentit,

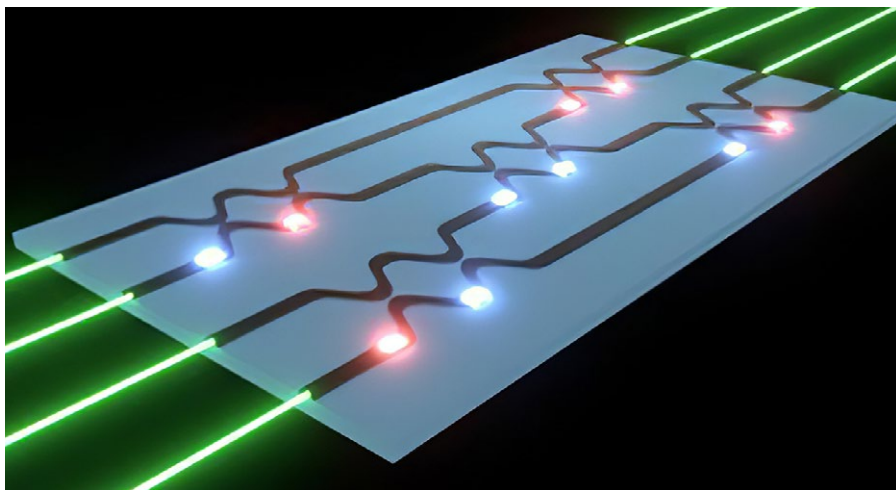
l'ús de tècniques molt madures pel seu ús en la fabricació de dispositius electrònics en semiconductors, com són la fotolitografia i la litografia per feix d'electrons, ha permès la generació de dispositius òptics integrats en semiconductors amb un gran nombre d'aplicacions en telecomunicacions, però també en l'elaboració de sensors, en la qual destaca el *lab on a chip* (LOC). Els LOC són dispositius que integren funcions pròpies d'un laboratori en un únic xip, amb unes dimensions que van des de només uns mil·límetres fins a uns pocs centímetres quadrats. Aquests xips permeten l'anàlisi i la síntesi de diferents substàncies utilitzant únicament xicotetes quantitats d'aquestes i són especialment interessants per a l'anàlisi clínica.

No obstant això, els dispositius basats en semiconductors no permeten fer molts processos òptics, per la qual

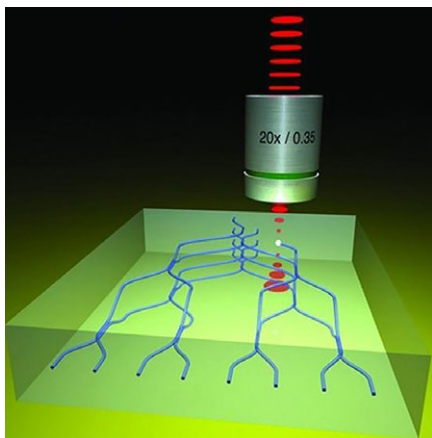
cosa cal utilitzar una altra mena de materials. En aquest sentit, en els últims anys s'han produït important avanços en el desenvolupament de nous materials òptims per a la fabricació de xips òptics i de tècniques de fabricació de dispositius òptics integrats, superficials o dins del material. Des del punt de vista del desenvolupament de nous materials, els esforços s'han centrat en dos aspectes. D'una banda, que siguin fàcilment dopats amb ions de terres rares que permeten usar-los per a l'amplificació del senyal. Exemples d'aquesta mena de materials són els vidres d'òxids de metalls pesants (HMO), els vidres de tellurits o els materials ceràmics transparents. D'una altra banda, que presenten propietats òptiques no lineals, com per exemple un alt índex de refracció no lineal, com els vidres de d'òxids de metalls pesants o de tellurits. Aquesta característica permet utilitzar-los per a generar dispositius òptics que aprofiten efectes

òptics no lineals, com l'efecte Kerr, per a aconseguir, per exemple, la commutació de senyals amb esquemes basats en acobladors direccionals no lineals o interferòmetres tipus Mach-Zahnder o Fabry-Pérot.

Pel que fa al desenvolupament de les tècniques de fabricació de dispositius òptics integrats (actius i passius), el processament no lineal de materials dielèctrics, en particular de vidres actius, amb tècniques de processament determinista (escriptura directa) amb polsos làser ultracurts s'ha convertit en una de les tecnologies emergents amb més potencial de futur. Aquest fet es deu a l'aparició de làsers de polsos ultracurts (de picosegons o femtosegons), que aporten altes densitats d'energia instantània. Si apliquem aquestes fonts a dielèctrics, obtenim una deposició controlada de l'energia en un volum xicotet al voltant del focus amb un reduït dany col·lateral per efectes tèrmics, de manera que aconseguim una



Esquema d'un circuit òptic. Font: *Optica*.

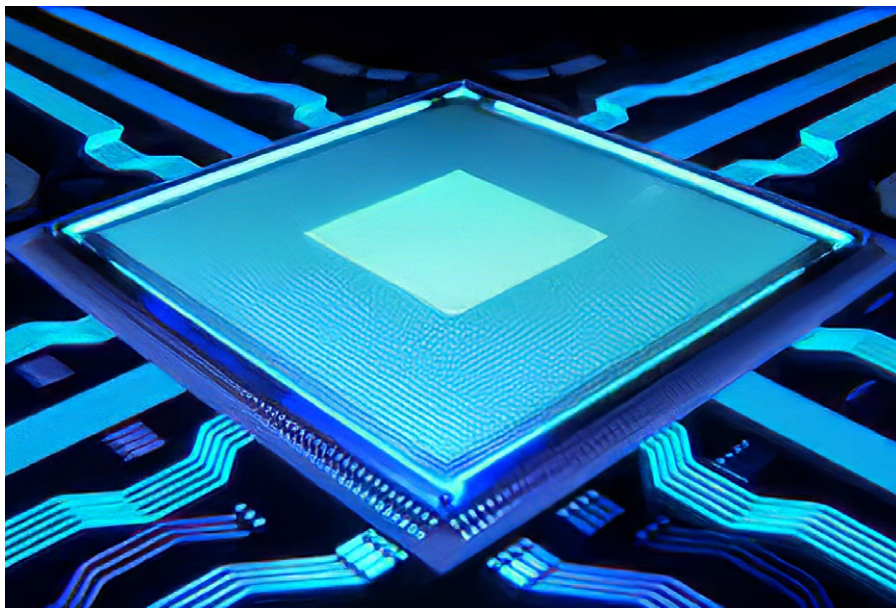


Escriptura per làser de guies d'ona.
Font: *Laser Photonics Reviews*.

precisió nanomètrica en el dipòsit d'energia. Tot això pot conduir a canvis estructurals o modificacions de l'índex

de refracció del material en un volum de poques micres cúbiques; així, movent la mostra durant la irradiació a una velocitat determinada es poden escriure guies d'ona i altres dispositius fotònics en configuració 3D. La primera demostració d'aquest principi va ser realitzada pel grup del professor Kazuyuki Hirao fa dues dècades. El conjunt de dispositius fabricats fins hui per mitjà d'aquesta tècnica inclou memòries òptiques 3D, guies d'ona passives, guies d'ona funcionals, amplificadors i làsers integrats en guia d'ona.

Malgrat totes les fites aconseguides en el desenvolupament de dispositius fotònics, encara queden passos per aconseguir el computador purament òptic, si bé el futur d'una comunicació i computació purament fotònica està cada vegada més pròxim.



Esquema del computador totalment òptic. Font: *Optics & Photonics News*.

La visió artificial

José García Rodríguez i Miguel Ángel Cazorla
Inst. Univ. Investigació en Informàtica

Podem definir la visió artificial com la ciència i la tecnologia que permeten a les màquines percebre l'entorn que els envolta, o, assimilant-ho a la visió natural, «veure». Això implica que la màquina és capaç d'extraure informació d'una imatge o conjunt d'imatges i utilitzar-la per a resoldre alguna tasca. Com a disciplina científica, la visió artificial, també anomenada visió per computador, estaria localitzada dins de la teoria dels sistemes que extrauen informació de les imatges, que en la majoria dels casos recolzen en la intel·ligència artificial. L'estructura de les dades que conformen una imatge pot prendre moltes formes, com seqüències de vídeo, vistes de múltiples càmeres o dades multidimensionals d'un escàner mèdic, per posar-ne alguns exemples.

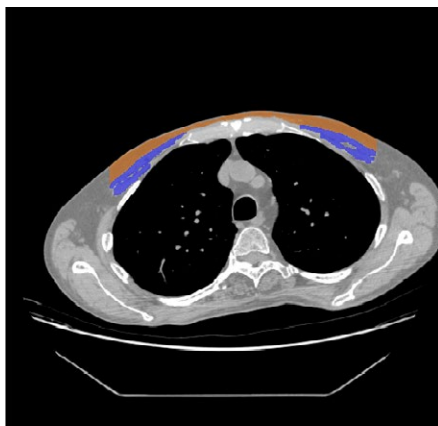
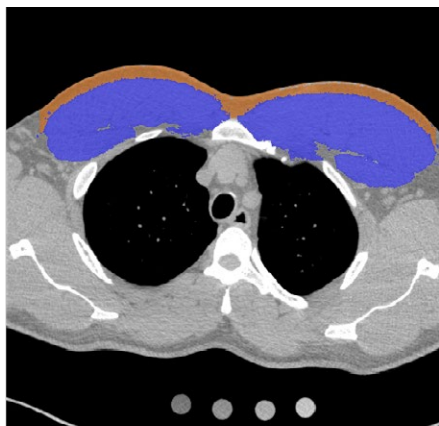
La visió per computador està estretament relacionada amb l'estudi de la visió biològica. El camp de la visió biològica està constituït pels processos fisiològics que regulen la percepció visual en humans i altres animals. En canvi, la visió artificial estudia i descriu els processos implementats en programari i maquinari necessaris perquè les màquines puguin veure. La relació entre les dues visions, l'artificial i la biològica, ha sigut molt rellevant i d'alguna

manera ha permès l'avanç significatiu dels dos camps en els últims temps.

Com a disciplina tecnològica, la visió per computador busca aplicar les seues teories i models a la construcció de sistemes de visió per computador. Exemples d'aplicacions de la visió artificial inclouen sistemes per a control processos (per exemple, un robot industrial o un vehicle autònom), reconeixement de patrons (localitzar i classificar objectes o persones en imatges o seqüències), detecció d'esdeveniments (per a vigilància visual o en entorns intelligents), organització de la informació (per a indexar bases de dades d'imatges i seqüències d'imatges), modelatge d'objectes o entorns (inspecció industrial, anàlisi d'imatges mèdiques, digitalització de patrimoni o modelatge topogràfic) o interacció (per exemple, en aplicacions d'interacció home-màquina).

Alguns subdominis de la visió per computador inclouen la reconstrucció d'escenes, la detecció d'esdeveniments, el seguiment d'objectes i individus en seqüències d'imatges, el reconeixement d'objectes, l'aprenentatge, la indexació, l'estimació del moviment i la restauració d'imatges, entre altres.

La visió artificial és un camp d'estudi divers i relativament nou. En els primers dies de la computació era difícil



Exemple de processament d'imatge mèdica. Tall transversal de l'abdomen d'una persona per a buscar el greix, que té una correspondència amb malalties cardíaques. Imatge: M. Á. Cazorla.

processar conjunts de dades d'imatge moderadament grans. No va ser fins a finals de la dècada de 1970 que va sorgir un estudi més centrat del camp. La visió per computador cobreix una àmplia gamma de temes que sovint estan relacionats amb altres disciplines i, per tant, no hi ha una formulació estàndard del «problema de la visió artificial o visió per computador». No obstant això, s'han plantejat un bon nombre

de mètodes per a resoldre problemes específics que rares vegades poden generalitzar-se.

Relació entre la visió artificial i altres camps

La visió artificial es relaciona amb multitud de camps. En particular, el seu avanç, recolzat en l'impuls que ha



Exemple d'interacció virtual: una mà robòtica és capaç d'agafar objectes amb formes diferents.

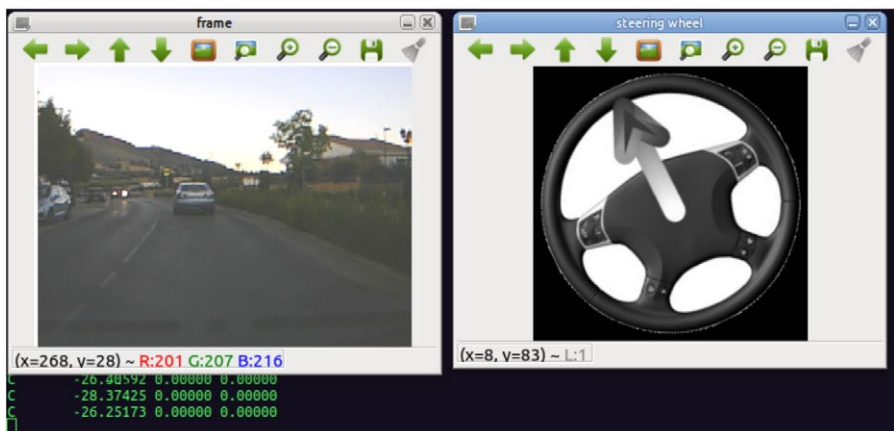
Imatge: J. García.

experimentat la intel·ligència artificial, està sent fonamental en el desenvolupament de moltes altres especialitats. La connexió entre aquestes dues disciplines és tan forta que la visió per computador es considera a voltes part del camp de la intel·ligència artificial. Tenim com a exemple la navegació autònoma de vehicles, en què la intel·ligència artificial és necessària per a guiar-los (cotxes, robots, drons...) per l'entorn. En aquest cas cal un coneixement detallat d'aquests entorns per a poder navegar-hi. La informació sobre el medi pot ser proporcionada per un sistema de visió artificial, que actua com un sensor de visió i proporciona informació d'alt nivell sobre l'entorn i sobre el vehicle. Aquestes disciplines també comparteixen altres camps, com el reconeixement de patrons o les tècniques d'aprenentatge.

La física està també estretament relacionada amb la visió artificial. Els sistemes de visió per computador es basen en sensors d'imatge que detecten la radiació electromagnètica, que normalment es presenta en forma de llum visible o infraroja. Aquests sensors estan dissenyats utilitzant física d'estat sòlid. El procés pel qual la llum es propaga i es reflecteix en les superfícies s'explica a través de l'òptica. Els sofisticats

sensors d'imatge recorren fins i tot a la mecànica quàntica per a proporcionar una comprensió completa del procés de formació de la imatge. D'altra banda, multitud de problemes de modelatge i predicció en física poden ser abordats utilitzant la visió per computador, per exemple el modelatge de fluids i la seua aplicació a la predicció d'impactes d'onades en ports.

Un altre camp altament relacionat amb la visió artificial és la neurobiologia, específicament l'estudi del sistema de visió biològica. Durant l'últim segle, s'han estudiat extensament els ulls, les neurones i les estructures cerebrals dedicades al processament d'estímuls visuals, tant en humans com en diversos animals. Això ha portat a una descripció tosca, però complicada, de com funcionen els sistemes de visió «reals» per a resoldre certes tasques relacionades amb la visió. Aquests resultats han portat a un subcamp dins de la visió artificial on els sistemes artificials estan dissenyats per a imitar el processament i el comportament dels sistemes biològics, en diferents nivells de complexitat. A més a més, alguns dels mètodes basats en l'aprenentatge desenvolupats dins de la visió per computador tenen els antecedents en la biologia.



Sistema de conducció autònoma basat en visió artificial. Captura de la càmera frontal del vehicle i gir del volant recomanat una vegada analitzada la imatge de la càmera. Imatge: M. À. Cazorla.

El processament de senyals és un altre camp molt relacionat amb la visió per computador. Molts mètodes de processament de senyals monovariables, típicament senyals temporals, poden estendre's de forma natural al processament de senyals de dues variables o de senyals multivariables en visió per computador. No obstant això, a causa de la naturalesa específica de les imatges, hi ha molts mètodes desenvolupats dins de la visió per computador que no tenen contrapartida en el processament de senyals univariables. Una característica distintiva d'aquests mètodes és que no són lineals, cosa que, juntament amb la multidimensionalitat del senyal, defineix un subcamp en el processament del senyal com a part de la visió per computador.

A més dels punts de vista abans esmentats sobre la visió per computador, molts dels temes de recerca relacionats també poden ser estudiats des d'un punt de vista purament matemàtic. Per exemple, molts mètodes de visió per

computador es basen en estadístiques, optimització o geometria.

Finalment, una part significativa del treball està dedicada a la implementació de la visió per computador: com els mètodes existents poden ser realitzats en diverses combinacions de programari i maquinari o com aquests mètodes poden ser modificats per a guanyar velocitat de processament sense perdre massa rendiment.

Aplicacions de la visió per computador

Un dels camps d'aplicació més destacats de la visió artificial és la visió mèdica per ordinador o el processament d'imatges mèdiques. Aquesta àrea es caracteritza per l'extracció d'informació de dades d'imatges amb la finalitat de fer un diagnòstic mèdic d'un pacient. Generalment, les dades d'imatge es presenten en forma d'imatges de microscòpia, de raigs X, d'angiografia, ultrasòniques o de tomografia. Un

exemple d'informació que es pot extraure d'aquestes dades d'imatge és la detecció de tumors, arteriosclerosi o altres canvis malignes. També poden fer mesuraments de la grandària dels òrgans, del flux sanguini, etc. Aquesta àrea d'aplicació també dona suport a la recerca mèdica, proporcionant nova informació, per exemple, sobre l'estructura del cervell o sobre la qualitat dels tractaments mèdics.

Una segona àrea d'aplicació de la visió per computador és la indústria, en la qual la informació s'extrau amb el propòsit de donar suport a un procés de fabricació. Un exemple d'això és el control de qualitat, en el qual els detalls o productes finals s'inspeccionen automàticament per a trobar-hi defectes. Un altre exemple és el mesurament de la posició i orientació dels detalls que ha d'arreglar un braç robot. La visió artificial també s'utilitza molt en els processos agrícoles per a eliminar elements indesitjables en productes alimentaris a granel, un procés anomenat classificació òptica.

Les aplicacions militars són probablement una de les àrees més àmplies per a la visió per computador. Els exemples obvis són la detecció de soldats o vehicles enemics i la guia de míssils. Els sistemes més avançats d'orientació de míssils no dirigeixen el projectil a un objectiu específic, sinó a una zona més o menys àmplia, i la selecció de l'objectiu es fa quan el míssil ha arribat a la zona, sobre la base de dades d'imatges obtingudes localment. Els conceptes militars moderns, com la «consciència del camp de batalla», impliquen que diversos sensors, inclosos els sensors d'imatge, proporcionen un ric conjunt d'informacions sobre una escena de

combat que pot utilitzar-se per a oferir suport a les decisions estratègiques. En aquest cas, el processament automàtic de les dades s'utilitza per a reduir la complexitat i fusionar la informació de múltiples sensors per a augmentar la fiabilitat.

Una de les noves àrees d'aplicació són els vehicles autònoms, que inclou els submergibles, els vehicles terrestres (petits robots amb rodes, cotxes o camions), els vehicles aeris i els vehicles aeris no tripulats (UAV). El nivell d'autonomia varia des de vehicles totalment autònoms (no tripulats) fins a vehicles en els quals els sistemes basats en la visió per computador donen suport a un conductor o a un pilot en diverses situacions. Els vehicles totalment autònoms solen utilitzar la visió per ordinador per a la navegació, és a dir, per a saber on són o per a elaborar un mapa del seu entorn (ESLAM) i per a detectar obstacles. També es pot utilitzar per a detectar certs esdeveniments específics de la tasca, per exemple un vehicle aeri no tripulat a la recerca d'incendis forestals. Exemples de sistemes de suport són els sistemes d'alerta d'obstacles en els automòbils i els sistemes per a l'aterratge autònom d'aeronaus.

Diversos fabricants d'automòbils han mostrat sistemes per a la conducció autònoma de vehicles, però aquesta tecnologia encara no ha aconseguit un nivell que en permeta la comercialització. Hi ha nombrosos exemples de vehicles militars autònoms, que van des de míssils avançats fins a vehicles aeris no tripulats per a missions de reconeixement o orientació de míssils. L'exploració espacial ja s'està duent a terme amb vehicles autònoms que utilitzen la visió

per ordinador, per exemple, el Mars Exploration Rover de la NASA i l'ExoMars Rover de l'ESA.

Tasques típiques de la visió per computador

Cadascuna de les àrees d'aplicació descrites anteriorment utilitza una sèrie de tasques de visió per ordinador, amb problemes de mesurament o de processament més o menys ben definits, que poden resoldre's utilitzant una varietat de mètodes. A continuació presentem alguns exemples de tasques típiques de visió artificial.

Reconeixement

El problema clàssic en la visió per computador és determinar si les dades de la imatge contenen algun objecte, característica o activitat específica o no. Aquesta tasca normalment pot ser resolta sense esforç per un humà, però encara no s'ha aconseguit resoldre satisfactòriament en visió artificial per al cas general: objectes arbitraris en situacions arbitràries. Els mètodes existents per a tractar aquest problema poden, en el millor dels casos, resoldre-ho només per a objectes específics, com ara objectes geomètrics simples (per exemple, poliedres), rostres humans, caràcters impresos o escrits a mà o vehicles, i en situacions específiques, típicament descrites en termes d'illuminació ben definida, fons i posició de l'objecte en relació amb la càmera.

En la literatura es descriuen diferents varietats del problema de reconeixement:

- *Reconeixement d'objectes*: es poden reconèixer un o diversos objectes o classes d'objectes preespecificats o apresos, normalment amb les seues posicions 2D en la imatge o 3D en l'escena.
- *Identificació*: es reconeix una instància individual d'un objecte, com per exemple la cara o l'empremta dactilar d'una persona específica o un vehicle específic.
- *Detecció*: les dades de la imatge s'escanegen per a una condició específica, com ara possibles cèl·lules o teixits anormals en imatges mèdiques o un vehicle en un sistema de peatge automàtic. La detecció basada en càlculs relativament simples i ràpids s'utilitza de vegades per a trobar regions més xicotetes de dades d'imatge interessants que poden ser analitzades més a fons amb tècniques més exigents des del punt de vista computacional per a produir una interpretació correcta.

Hi ha diverses tasques especialitzades basades en el reconeixement, com ara:

- *Recuperació d'imatges basada en el contingut*: trobar, dins d'un conjunt més gran d'imatges, totes les que presenten un contingut específic. El contingut pot ser especificat de diferents maneres, per exemple en termes de similitud relativa a una imatge objectiu («dona'm totes les imatges similars a la imatge X») o en termes de criteris de cerca d'alt nivell donats com a entrada de text («dona'm totes les imatges que contenen moltes cases, que estan preses durant l'hivern i en què no hi ha cotxes»).

- *Estimació de la posició*: estimació de la posició o orientació d'un objecte específic en relació amb la càmera. Un exemple d'aplicació per a aquesta tècnica seria ajudar un braç robòtic a recuperar objectes d'una cinta transportadora en una situació de línia de muntatge.
- *Reconeixement òptic de caràcters* (OCR): caràcters d'identificació en imatges de text imprés o manuscrit, generalment amb la finalitat de codificar el text en un format susceptible d'edició o indexació (per exemple, ASCII).

Anàlisi de moviment

Hi ha diverses tasques relacionades amb l'estimació del moviment quan es processa una seqüència d'imatges per a determinar la velocitat en cada punt de la imatge o en l'escena tridimensional, o fins i tot de la càmera que produeix les imatges. Exemples d'aquestes tasques són:

- *Egomotion*: determinació del moviment rígid 3D (rotació i translació) de la càmera a partir d'una seqüència d'imatges produïda per la càmera.
- *Rastreig*: seguiment dels moviments d'un conjunt (generalment) més xicotet de punts o objectes d'interés (per exemple, vehicles o persones) en la seqüència d'imatges.
- *Flux òptic*: per a determinar, per a cada punt de la imatge, com es mou aquest punt en relació amb el pla de la imatge, és a dir, el seu moviment aparent. Aquest moviment és el resultat tant de com es mou el punt

3D corresponent en l'escena com de com es mou la càmera en relació amb l'escena.

Reconstrucció d'escenes

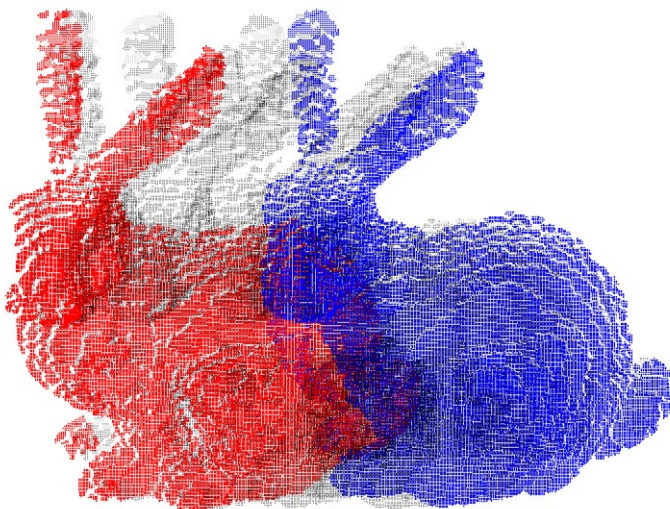
Donada una o (típicament) més imatges d'una escena o un vídeo, la reconstrucció de l'escena té com a objectiu calcular un model tridimensional de l'escena. En el cas més simple, el model pot ser un conjunt de punts 3D. Hi ha mètodes més sofisticats que poden produir un model de superfície tridimensional complet.

Restauració d'imatges

L'objectiu de la restauració d'imatges és l'eliminació del soroll (del sensor, moviment borrós, etc.) de les imatges. L'enfocament més simple possible per a l'eliminació del soroll són els diversos tipus de filtres, com els filtres de pas baix o els filtres mitjans. Els mètodes més sofisticats assumeixen un model de com es veuen les estructures d'imatge locals, un model que les distingeix del soroll. Analitzant primer les dades de la imatge en termes de les estructures locals de la imatge, com ara línies o vores, i després controlant el filtrat basat en la informació local del pas d'anàlisi, s'obté un millor nivell d'eliminació del soroll en comparació amb els enfocaments més simples. Un exemple en aquest camp és la pintura d'interiors.

Sistemes de visió artificial

L'organització d'un sistema de visió artificial depèn en gran mesura de



Reconstrucció tridimensional d'un objecte.

l'aplicació. Alguns sistemes són aplicacions autònomes que resolen un problema específic de mesurament o detecció, mentre que altres constitueixen un subsistema de disseny més ampli que, per exemple, també conté subsistemes per al control d'actuadors mecànics, planificació, bases de dades d'informació, interfícies home-màquina, etc. La implementació específica d'un sistema de visió per computador també depèn del fet que la seua funcionalitat estiga preespecificada o que alguna part d'aquesta pugui ser apresada o modificada durant el seu funcionament. Amb tot, hi ha funcions típiques que es troben en molts sistemes de visió artificial.

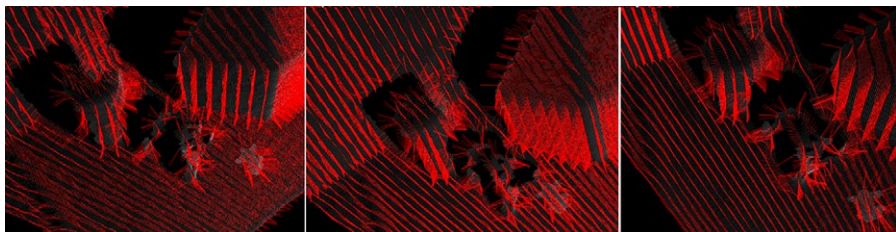
Adquisició d'imatges

Una imatge digital és produïda per un o diversos sensors d'imatge que, a més

de diversos tipus de càmeres sensibles a la llum, poden incloure sensors d'abast, dispositius de tomografia, radar, càmeres ultrasòniques, etc. Depenent del tipus de sensor, les dades d'imatge resultants són una imatge bidimensional normal, un volum tridimensional o una seqüència d'imatges. Els valors dels píxels corresponen típicament a la intensitat de la llum en una o diverses bandes espectrals (imatges grises o imatges en color), però també poden estar relacionats amb diverses mesures físiques, com la profunditat, l'absorció o la reflectància de les ones sonores o electromagnètiques, o la ressonància magnètica nuclear.

Preprocessament

Abans que un mètode de visió per computador pugui ser aplicat a les dades d'imatge per a extraure'n alguna



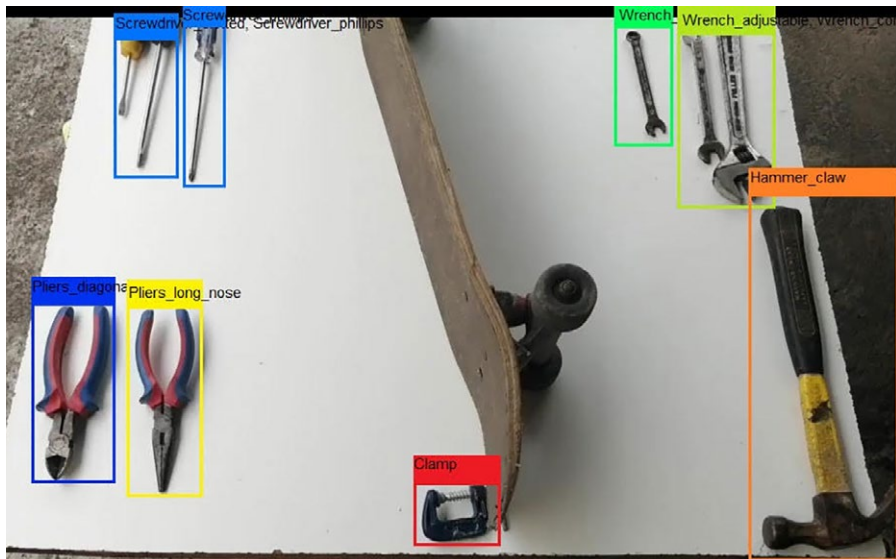
Estimació de normals en una imatge.

informació específica, normalment cal processar les dades per a assegurar que satisfan certes suposicions implícites pel mètode. Alguns exemples són:

- *Remostreig*, per a assegurar que el sistema de coordenades de la imatge és correcte.
- *Reducció de soroll*, per a assegurar que el soroll del sensor no introdueix informació falsa.
- *Millora del contrast*, per a assegurar que la informació rellevant pugui ser detectada.
- *Representació d'escala-espai*, per a millorar les estructures de la imatge a escales localment apropiades.



Segmentació semàntica en què es distingeixen quatre categories: peluix, rosa, got i fons.



Detecció i classificació de objectes en diferents categories.

Extracció de característiques

Les característiques de la imatge en diversos nivells de complexitat s'extrauen de les dades de la imatge. Exemples típics d'aquestes característiques són:

- Línies, vores i crestes.
- Punts d'interés localitzats, com cantons, taques o punts.

Les característiques més complexes poden estar relacionades amb la textura, la forma o el moviment.

Detecció/segmentació

En algun moment del processament es pren una decisió sobre quins punts o regions de la imatge són rellevants per al processament posterior. Alguns exemples són:

- Selecció d'un conjunt específic de punts d'interés.
- Segmentació d'una o diverses àrees d'imatge que contenen un objecte d'interés específic.
- Tractament d'alt nivell. En aquest pas, l'entrada és típicament un petit conjunt de dades, com ara un grup de punts o una regió de la imatge que se suposa que conté un objecte específic. La resta del tractament s'ocuparia, per exemple, de:
 - Verificar que les dades satisfan els supòsits específics de cada model i aplicació.
 - Estimar paràmetres específics de l'aplicació, com la posició o la grandària de l'objecte.
 - Classificar un objecte detectat en diferents categories.

Més informació

Llibres

Benjamín Alonso i Carlos Hernández, *El làser: La luz de nuestro tiempo*, Ediciones Universidad de Salamanca, 2011.

Diversos autors, *I i II certàmens d'experiències científiques (2015-2016)*, Publicacions Universitat d'Alacant, 2017, <http://hdl.handle.net/10045/91529>.

María Viñas *et. al.*, *Descubriendo la luz: Experimentos divertidos de óptica*, CSIC, Madrid, 2018.

Articles

Augusto Beléndez, «La unificació electromagnètica: 150 aniversari de les equacions de Maxwel», *Mètode*, 3/2/2015, <https://cutt.ly/EbuCGDa>.

Miguel Ángel Criado, «Una jerarquía casi universal de los cinco sentidos», *El País*, 24/1/2015, <https://cutt.ly/mbuCMKT>.

Vicent J. Martínez, «Més ràpid que la llum», *Mètode*, 13/6/2017, <https://cutt.ly/abuC85g>.

Carles Pucho, Ricard Guerrero i Mercè Berlanga, «Vida de la llum, llum per a la vida», *Mètode*, 22/7/2015, <https://cutt.ly/tbuVtxa>.

Blogs i webs

Julio Asunción, *Rutas arqueológicas en Alicante*, <https://cutt.ly/1buVWLj>.

Augusto Beléndez, *Física para todos*, <https://cutt.ly/JbuVYfQ>.

Sincrotró Alba, «Recursos educatius», <https://cutt.ly/vbuVDTT>.

UNESCO, «International Day of Light», <https://cutt.ly/cbuVLif>.

Vídeos

Augusto Beléndez, «La llum que ens envolta», <http://vertice.cpd.ua.es/150765>.

Sergi Gallego i Inmaculada Pascual, «Dones i llum: Investigadores amb llum pròpia», <https://vertice.cpd.ua.es/239205>.

