

25 anys d'òptica. Què podem veure que no veïem abans?

Santiago Vallmitjana Rico

Departament de Física Aplicada i Òptica, Universitat de Barcelona. Carrer de Martí i Franquès, 1. 08028 Barcelona
santi.vallmitjana@ub.edu

1 Introducció. 25 anys d'òptica

Ara fa uns vint-i-cinc anys, concretament entre el 4 i el 6 de setembre de 1985, va tenir lloc a Maó la primera Trobada Científica de la Mediterrània. En aquest article procurarem fer una mirada retrospectiva en l'àmplia matèria de l'òptica i n'assenyalarem alguns avenços i millores durant aquest lapse de temps.

Realment, en aquest camp de la ciència i de la tècnica han succeït molts esdeveniments i han aparegut grans invents i aplicacions tecnològiques que han fet avançar el coneixement de la natura cap a nous nivells, impensables fa 25 anys. Un primer indicatiu del desenvolupament de les tecnologies òptiques el tenim en el terme *fotònica* que, tot i que va ser definit per Pierre Aigran (1924-2002) el 1967, era pràcticament desconegut, mentre que ara se'n fa un ús continuat i constant per designar les aplicacions tecnològiques de la llum. També cal tenir en compte que, com que l'òptica és una disciplina transversal, ha participat activament en diversos camps de la recerca, n'ha ampliat la visió del conjunt i ha fregat les fronteres del coneixement fins a nous límits. Aquestes noves tecnologies, a més d'augmentar el saber científic, han contribuït a fer-nos la vida més fàcil, més còmoda i més intercomunicada (i també, a vegades, més accelerada), i una bona part d'elles han intervingut especialment en el camp de les tecnologies de la informació i de les comunicacions.

En aquest article es repassen les novetats que han aparegut en aquest temps en els camps de la visió, de la tecnologia per a la visió del microcosmos, i per a la recerca en l'espai profund del macrocosmos amb els telescopis. Es revisen alguns nous components i noves tecnologies per fer imatges que es concreten en el circuit CCD i en els sensors per a les imatges tèrmiques, sense entrar en les imatges mèdiques, tema d'un altre article. També es passa revista als avenços d'algunes tecnologies relacionades amb el làser, amb la informació i les comunicacions, totes basades en la llum, com ara els discos òptics, les memòries hologràfiques i les fibres òptiques. Finalment, es revisen els premis Nobel que han estat relacionats amb l'òptica.

2 Visió. Hi veiem millor i més clar

Sense cap mena de dubte, ara hi veiem amb més comoditat que fa 25 anys. Si fixem la mirada en les ulleres de correcció visual, tenim més facilitat en la vista de prop, ja que s'eviten les bifocals i trifocals, gràcies al desenvolupament de les lents progressives, que, tot i que es van descobrir els anys cinquanta, en aquest últim període s'han perfeccionat i popularitzat. En general, les lents ara estan compostes de materials més lleugers i tenen recobriments més eficients i duradors. També les lents de contacte han millorat perquè tenim materials de més qualitat, són més permeables i fins i tot es poden portar lents d'un sol ús i llençar-les. La cirurgia associada a la visió ha millorat el tractament de les cataractes amb cristal·lins artificials, ara es té més experiència en el tractament de les retinopaties amb làser, s'ha avançat molt en la recerca sobre l'ull humà i es coneixen millor les aberracions gràcies a l'ús de sensors de front d'ona.

Però potser l'avenç més important i més extens ha estat el tractament de les ametropies per làser a base de retocar la curvatura de la còrnia, amb la qual cosa s'han assolit precisions de fins a mitja diòptria. De fet, tenim un precedent el 1950 amb les idees del barceloní Josep Barraquer, que inventà el microqueràtom. Encara que el 1978 s'aplicà la queratomia radial, que consistia a fer incisions radials, no donà resultats gaire satisfactoris. Així l'any 1970 aparegueren les primeres idees i el 1987 els primers prototips de la tècnica LASIK (*laser-assisted in situ keratomileusis*). La tècnica consisteix a fer una incisió circular de 270 graus en la còrnia, cosa que permet aixecar-la (com si fos una tapa d'una llauna de conserva) i, acte seguit, s'aplica un làser robotitzat comandat per ordinador que modela la forma adequada que prèviament s'ha programat per variar la curvatura. Finalment es recol·loca la tapa de còrnia aixecada, com es veu en la figura 1. Aquest mètode té el gran avantatge que deixa intacta la part frontal de la còrnia i, per tant, no hi queden cicatrius. Hi ha diverses variants, com la PRK (*photorefractive keratotomy*), apareguda el 1995, el LASEK (*laser epithelial keratomileusis*), el 1996, i l'intraLASIK, el 2003, que no necessita retallar la tapa perquè emprà un làser de femtosegons que focalitza amb gran precisió per dins de

la còrnia i la deixa intacta per fora.

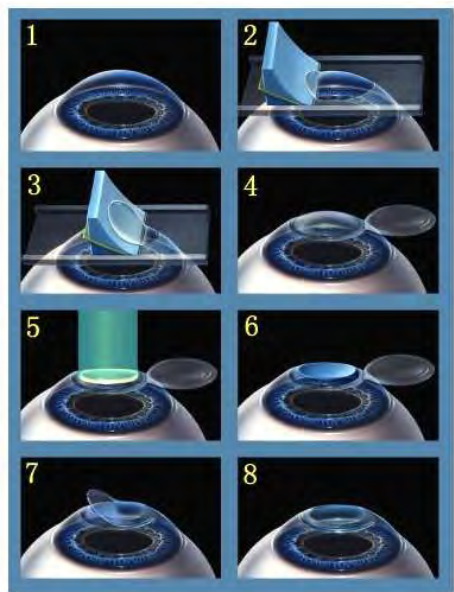


Figura 1: Fases successives de la tècnica Lasik. El làser actua en la cinquena fase.

(http://laservisioncenter.net/image/lasik_zyoptix.jpg)

3 Microscòpia. Sondes per palpar la matèria: cap a la nanoscòpia

En el segle XIX es va desenvolupar notablement la millora de la qualitat dels objectius de microscopi i, a finals del segle, gràcies a la conjunció de Zeiss, Abbe i Schott (l'industrial, l'expert en òptica i l'expert en vidres, respectivament), s'obtenen objectius quasi exempts d'aberracions i només limitats per la difracció.

Aquest límit ve donat, tal com es veu en l'equació adjunta, per l'obertura numèrica i la longitud d'ona. Com que és impossible reduir la primera, la idea de disminuir la segona magnitud va donar peu al desenvolupament de la microscòpia electrònica (la longitud d'ona associada a l'electró és força més petita), i el 1931 aparegué el primer microscopi electrònic, gràcies a Ernst Ruska i Max Knoll.

$$R = \frac{1,22\lambda}{2 \times N.A.} = \frac{1,22\lambda}{2n \sin \theta}$$

Com a curiositat, l'any 1973 a Espanya hi havia 83 microscopis electrònics, dels quals 47 eren a Madrid, 7 a Barcelona, i la resta en diferents ciutats de l'Estat espanyol. En la figura 2 es pot veure un microscopi electrònic Philips EM 301, que va ser el quart adquirit per la Universitat de Barcelona el 1974.

Els últims 25 anys han aparegut nous sistemes per microscòpia, gràcies als avenços en la micro- i nanomecànica i electrònica, tots basats en la idea de sondes nanomètriques per «palpar» la matèria i, d'aquesta



Figura 2: Microscopi electrònic Philips EM-301

manera, oferir la imatge de sortida d'una superfície tridimensional de la mostra escombrada o rastrejada per la sonda, tal com es veu en la figura 3. Aquestes sondes es basen en fenòmens d'equilibri entre les forces en els àtoms superficials en presència de camps elèctrics, o d'equilibri basat en la interacció entre radiació i matèria.

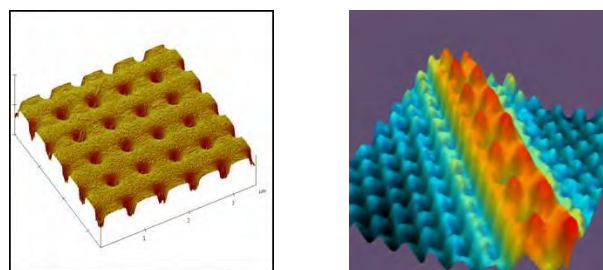


Figura 3: Imatge de sortida d'un microscopi modern: resultat del rastreig i informació de l'alçada en fals color.

(<http://www.intel.com/design/quality/pix/afm.gif>)
(<http://www.liv.ac.uk/Electrochem/research/stm.gif>)

Els antecedents d'aquests sistemes es troben el 1971, any en què Russell Young demostra les possibilitats d'un perfilòmetre sense contacte, i el 1981, quan científics d'IBM van aplicar el mètode i van crear el microscopi d'efecte túnel. El primer microscopi d'escombratge per efecte túnel (STM) el va desenvolupar Gerd Binnig i Heinrich Rohrer, que van ser guardonats amb el Premi Nobel de Física el 1986, ara fa 25 anys. Justament el mateix 1986, Binnig, Quate i Gerber desenvoluparen el microscopi de forces atòmiques (AFM).

El microscopi d'efecte túnel (STM, *scanning tunneling microscopy*) mesura corrent creat per efecte túnel entre una punta carregada i una mostra (que cal fer-la conductora mitjançant un recobriment) en donar un voltatge.

Una variant posterior, el microscopi de forces atòmiques (AFM, *atomic force microscope*), es basa en la repulsió entre els electrons superficials dels àtoms i la punta carregada, de manera que en desplaçar nanomètricament la punta amb un sistema piezoelèctric XY, va seguint les diferents alçades Z i, per tant, el perfil de la superfície. La posició Z es mesura per les variacions que fa un feix làser reflectit en el suport (tipus *cantilever*) de la punta, com es representa en la figura 4. Una sèrie d'escombratges reconstrueixen la superfície perquè tenen per cada punt les coordenades XYZ. Respecte a l'anterior té l'avantatge que no implica conducció de la mostra i se n'eviten, per tant, recobriments i manipulacions prèvies.

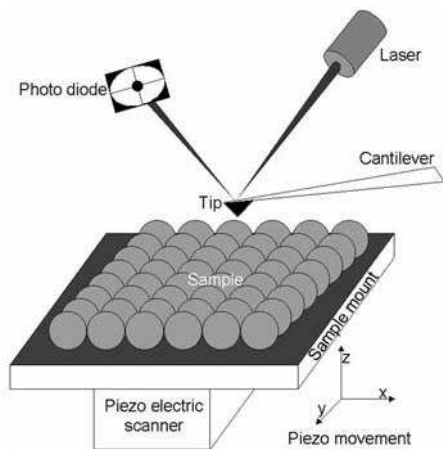


Figura 4: Esquema del funcionament d'un microscopi de forces atòmiques.
(<http://sahussain.wordpress.com/2007/11/03/>)

Una altra variant per seguir el perfil d'una superfície es basa en la detecció de les ones evanescents derivades del fenomen de la reflexió total. En aquesta tècnica, microscòpia de camp pròxim o SNOM (*scanning near-field optical microscopy*), apareguda el 1984, una punta recull la intensitat de les ones evanescents, seguint el perfil superficial. L'avantatge sobre la microscòpia òptica és que aquestes ones evanescents que constitueixen el camp pròxim no tenen la limitació de la difracció, de manera que permeten deteccions en fondàries d'uns quants nanòmetres. En la figura 5 es veu un esquema que compara la microscòpia òptica, l'electrònica de transmissió, la de rastreig i les tres esmentades.

A partir d'aquestes bases han anat sorgint multitud de variants, com ara les següents, que enumero només en anglès:

AFM, *atomic force microscopy*. BEEM, *ballistic electron emission microscopy*. EFM, *electrostatic force microscope*. ESTM, *electrochemical scanning tunneling microscope*. FMM, *force modulation microscopy*. KPFM, *kelvin probe force microscopy*. MFM, *magnetic force*

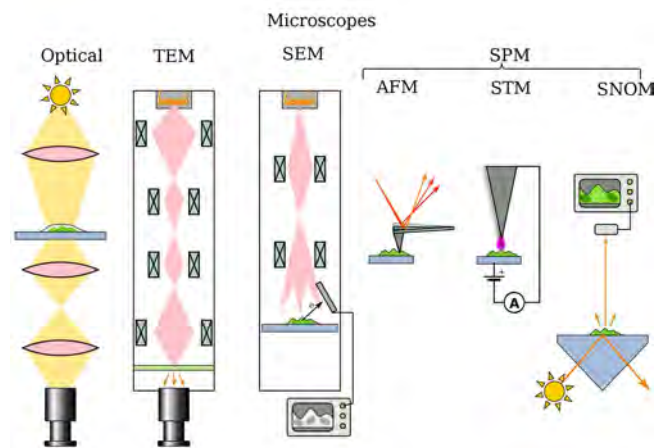


Figura 5: Esquema comparatiu de diferents tipus de microscòpia.
(<http://en.wikipedia.org/wiki/File:MicroscopesOverview.svg>)

microscopy. MRFM, *magnetic resonance force microscopy*. NSOM, *near-field scanning optical microscopy* (o SNOM). PFM, *piezo force microscopy*. PSTM, *photon scanning tunneling microscopy*. PTMS, *photothermal microspectroscopy/microscopy*. SAP, *scanning atom probe*. SCM, *scanning capacitance microscopy*. SECM, *scanning electrochemical microscopy*. SGM, *scanning gate microscopy*. SHPM, *scanning hall probe microscopy*. SICM, *scanning ion-conductance microscopy*. SNOM, *scanning near-field optical microscopy*. SPSM, *spin polarized scanning tunneling microscopy*. SSM, *scanning SQUID microscope*. SThM, *scanning thermal microscopy*. STM, *scanning tunneling microscopy*. SVM, *scanning voltage microscopy*.

4 Telescopis. Una major penetració en l'Univers profund

Cal recordar que en el millor dels casos —en què la correcció de les aberracions d'un objectiu d'un telescopi sigui òptima—, el límit de resolució imposat per la difracció és:

$$\rho = \frac{1,22\lambda f}{D},$$

on ρ és el radi de la figura de difracció generada per la imatge (disc d'Airy) d'un punt il·luminat; λ , la longitud d'ona; f , la distància focal i D és el diàmetre de l'obertura del telescopi. Al llarg del segle XIX es van anar augmentant les obertures dels objectius dels telescopis fins que es va arribar als seus límits, ja que el gran pes de l'objectiu fa que el vidre vibri i es flecteixi, i les imatges perdin qualitat. El telescopi refractor de major obertura és el de Yerkes (situat a Wisconsin, depenent de la Universitat de Chicago) amb 40 polsades (1,02 m) i es va posar en funcionament el 1897. A partir d'aquestes dates es va dirigir la recerca tecnològica vers els telescopis reflectors perquè

el mirall es pot fer més gruixut i admet major estructura de suport. Així aparegueren el telescopi *Hale*, al Mount Palomar, amb 5 m, el 1949 i el *Bolshoi*, a Zelenchukskaya, amb 6 m, el 1966. Tècnicament és molt difícil fer miralls més grans sense que siguin sensibles a canvis per vibracions, esforços i dilatacions, i es pot dir que els anteriors estan al límit, ja que cal recordar que les variacions superficials han de ser menors que la longitud d'ona. Durant aquests 25 anys ha aparegut com a solució la construcció de grans miralls a base d'un mosaic de miralls menors, solució coneguda com a òptica segmentada o facetada. En la figura 6 s'aprecia la forma d'aquests tipus de miralls.

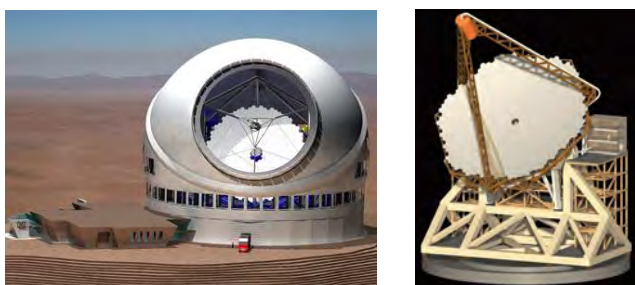


Figura 6: Un gran telescopi amb mirall segmentat. Mirall segmentat.

(<http://www.circuloastronomico.cl/imagenes/observ/tmt.jpg>)
 (<http://www.aao.gov.au/instrum/ELT/Workshop/gsm.jpg>)

Un altre problema que dificulta l'observació de les imatges estel·lars és el de les turbulències atmosfèriques, que fa que la imatge del disc d'Airy vagi oscil·lant en el temps, tal com ja estem acostumats a veure els estels, amb el seu centelleig característic. La dificultat prové del fet que en l'atmosfera l'índex de refracció depèn de la temperatura, de la pressió i d'altres factors que canvien segons l'alçada, segons el clima i les condicions meteorològiques, i també depèn de les diferències a l'interior i a l'exterior de l'observatori, en el tub, etc. La solució aportada durant aquest lapse de temps (inici de la dècada dels noranta) és l'òptica activa o adaptativa, que consisteix que la superfície dels miralls pugui admetre lleugeres deformacions, comandades per mitjà d'ordinador i actuator en temps real segons l'estat de les turbulències, corregint en cada moment la trajectòria dels feixos de llum. Això és possible gràcies al centelleig, que no és gaire ràpid (de l'ordre de desenes de Hz). Quan el telescopi capta una estrella, un sistema de sensor de front d'ona conjuntament amb un ordinador detecta les desviacions de l'ona perfecta o ideal respecte a la captada (variacions degudes al centelleig), calcula la quantitat i els punts a enviar la correcció i uns microactuadors sobre diferents parts del mirall deformable. Tot aquest procés es fa en centèsimes de segon, mentre que el centelleig és de dècimes de segon, de manera que la deformació permet minimitzar l'efecte del centelleig. Quan en el camp visual no hi ha una estrella veïna d'intensitat suficient per detectar el front d'ona

es pot crear una «estrella artificial» enviant un feix adequat d'un làser que excita la línia de 589 nm dels àtoms de Na en la mesosfera (zona situada a uns 90 km), tal com s'esquemmatitza en la figura 7.

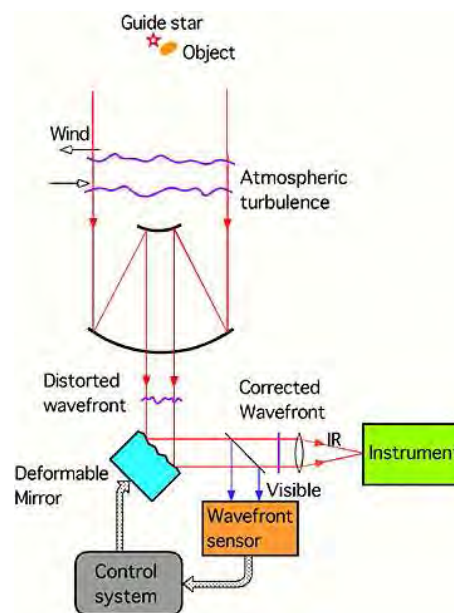


Figura 7: Funcionament esquemàtic de l'òptica adaptativa

(<http://www.naoj.org/Pressrelease/2002/01/16/fig1-e.jpg>)

Cal recordar que també s'ha experimentat en aquests temps una altra solució aportada per evitar la turbulència atmosfèrica, que ha estat l'enviament d'un telescopi en òrbita, fora de l'atmosfera. És el cas del telescopi *Hubble*, que rebé el nom en honor a l'astrofísic Edwin Hubble (1889-1953), famós principalment per haver demostrat l'expansió de l'Univers mesurant el desplaçament cap al roig de les galàxies distants. Aquest telescopi ha estat una gran idea però ha tingut una sèrie d'ensurts. El 1985, ara fa 25 anys, se'n va acabar la construcció, però el llançament, previst pel 1986, es va retardar a causa del desastre de l'accident del *Challenger*. No va ser fins el 25 d'abril del 1990 que fou llançat i situat en òrbita. Va ser llavors quan es detectaren defectes en la col·locació del mirall primari, i de resultes d'això el telescopi era «miop». El desembre del 1993 se'n va fer la reparació a través de la posada en òrbita de l'*Endeavour*; el 1997 hi ha una segona missió de manteniment i substitució d'aparells, i el novembre del 1999 se'n va reparar un giroscopi. La figura 8 mostra l'aspecte del telescopi orbital *Hubble*.

Però un fet molt destacable, en el període considerat, ha estat l'increment de la construcció de grans telescopis. Si els ordenem pel diàmetre dels miralls (resultants del conjunt de miralls segmentats o facetats) tenim la següent llista de telescopis de més de 5 m:

Gran Tecan (Gran Telescopio de Canarias), en el Roque de los Muchachos, illa de La Palma, posat en fun-



Figura 8: El telescopi Hubble en òrbita

(<http://www.darkgovernment.com/news/wp-content/uploads/2008/07/hubble-in-space.jpg>)

cionament el 2009, amb 10,4 m. *Keck I*, al Mauna Kea de Hawaii, el 1993, amb 10 m. *Keck II*, al Mauna Kea de Hawaii, el 1996, amb 10 m. SALT (*Southern African Large Telescope*), Sutherland, Sud-àfrica, el 2005, amb 10 m. HETDEX (*Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment*), Texas, 1999, amb 9,2 m. *Large Binocular Telescope*, Arizona, 2008, amb dos miralls de 8,4 m. *Subaru*, al Mauna Kea, Hawaii, el 1999, amb 8,3 m. *Cerro Paranal*, Xile, des del 2004 s'hi estan posant quatre telescopis de 8,2 m. *Gemini North (Gillet)*, al Mauna Kea, Hawaii, el 1999 amb 8,1 m. *Gemini South*, al Cerro Pachón, Xile, el 2000 amb 8,1 m. MMT (*Multiple Mirror Telescope*), a Arizona, el 1977. Es va millorar el 1998 amb 6,5 m. *La Serena*, Xile, amb dos telescopis, des del 1975, amb 6,5 m.

També es pot citar el LZT (*Large Zenithal Telescope*) en la British Columbia, Canadà, amb un mirall líquid amb mercuri en rotació per mantenir la forma parabòlica, amb 6 m de diàmetre, posat en funcionament el 2003.

Es pot concloure la llista dels telescopis més grans de 5 m amb els que hem esmentat abans de mirall d'una sola peça (d'abans dels 25 anys): el *Bolshoi Telescope* rus, del 1966, de 6 m, i el *Hale*, del Mount Palomar, del 1949, amb 5 m de diàmetre.

Actualment, els projectes relatius als grans telescopis o VLT (*very large telescope*) estan en un moment d'expansió per la necessitat d'aprofundir en l'espai i, en concret, per la cerca d'exoplanetes. N'hi ha diversos, entre els quals, el més destacat és el projecte E-ELT (*European Extremely Large Telescope*), amb les característiques bàsiques següents: captació en l'espectre visible i l'infraroig, amb un diàmetre total de 42 m format per 1000 miralls hexagonals d'1,42 m cadascun, amb una àrea total de 1300 m² (equivalent a 66 miralls del Monte Palomar). Ara està pendent de les decisions finals, entre d'altres la ubicació, que sembla que serà Xile, i amb una previsió de construcció fins el 2018. La figura 9 mostra una maqueta

de l'E-ELT.



Figura 9: Maqueta del projecte E-ELT.

(http://www.denebola.org/wp-content/uploads/2010/02/ELT_vlt.jpg)

5 Noves imatges, nous components

5.1 Les noves fotos. Del rodet a la CCD

Sense cap mena de dubte, un gran pas endavant en el món de les imatges ha estat la introducció massiva de la fotografia digital, gràcies al desenvolupament del circuit integrat CCD (*charge-coupled device*). La gran importància d'aquest element rau en les aplicacions que ha generat relatives a la captura d'imatges, amb unes prestacions i uns preus que eren inimaginables no fa gaire temps. D'aquesta manera s'ha endegat el naixement de la fotografia i del vídeo digitals, cosa que ha tingut grans repercussions tant en l'entorn professional com en el social. El CCD ha generat importants indústries i mercats i això ha permès una àmplia gamma de productes en diferents camps de la ciència i de la tècnica.

El 1969, Boyle i Smith (premiats amb el Nobel del 2009) van concebre el disseny com a dispositiu per transferir càrrega al llarg de la superfície d'un semiconductor, amb la principal aplicació de l'emmagatzematge de càrrega, és a dir, el CCD va néixer inicialment com un dispositiu de memòria. El 1981 va aparèixer al mercat la Sony Mavica (figura 10), primera càmera comercial amb sensor CCD de 570 × 490 (0,280 MP), les imatges en blanc i negre eren en format analògic, que es guardava en discos magnètics; les imatges en color s'havien de veure en un monitor de televisió.

Des d'aleshores es va anar abandonant el vidicó com a element captador d'imatges de televisió i el CCD es va convertir en el principal sensor per a càmeres de vídeo i, més recentment, de fotografia. El 1991 apareix la primera càmera de vídeo digital Logitech Dycam 376 × 240; el 1992, la primera càmera SLR digital KODAK DCS 200 d'1,5 MP; el 1994, la primera càmera en color digital co-



Figura 10: La primera càmera digital: Sony Mavica.

mercial, l'Apple Quicktake i, el 2000, el primer telèfon mòbil amb càmera digital incorporada (Sharp). A partir d'aquí, el desenvolupament és espectacular, tant en prestacions com en resolució. Actualment, les càmeres domèstiques utilitzen sensors de 12 MP. Quant a les càmeres fotogràfiques professionals d'alta gamma, disposen de CCD de 50 MP. Recentment s'ha anunciat un sensor CCD de 196 MP destinat a la fotogrametria aèria. En la figura 11 es veu una de les primeres càmeres digitals comercials de l'any 1995 al costat de models posteriors per a laboratori.



Figura 11: Evolució de les càmeres digitals.

Durant aquests anys s'ha millorat un dels principals problemes en els detectors, que és el soroll, especialment en aplicacions científiques (principalment en astronomia) o en càmeres fotogràfiques d'alta gamma. També s'aconsegueix la detecció de raigs X, malgrat que l'espectre captat pels detectors de silici està limitat entre 400 i 1100 nm. La solució consisteix a dipositar una capa de material centellejador sobre del CCD que absorbeix la radiació

de raigs X d'energies al voltant de 10 keV i produeix una luminescència amb un pic de 550 nm, detectable perfectament per un CCD de silici. Actualment s'està expandint el consum de les càmeres amb sensor CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) com a alternativa de menys cost. La figura 12 mostra l'evolució del mercat els últims cinquanta anys, on es veu la inflexió fa vint-i-cinc anys amb l'aparició dels CCD i on s'aprecia l'increment del CMOS.

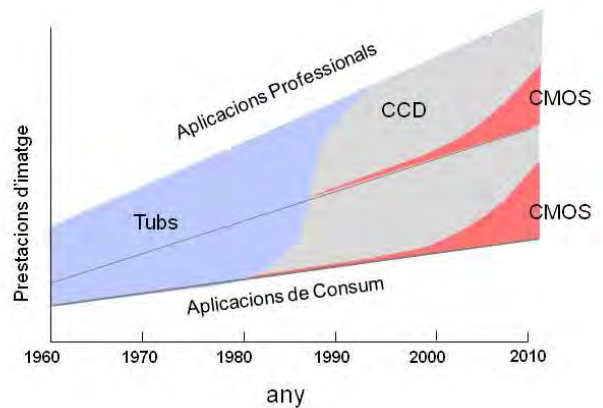


Figura 12: Evolució del mercat de dispositius de captura d'imatges, segons A. Theuwissen (*CMOS Image Devices, FSRM Course*).

5.2 Noves imatges

La recerca en la tecnologia dels sensors bolomètrics ha tingut també un gran desenvolupament. De fet, els anys seixanta ja es feia recerca en imatges infraroges, però amb aplicacions exclusivament militars, i va ser els anys noranta quan es van iniciar altres aplicacions (en part, a causa, també, d'una disminució en el cost) com ara la detecció de focs, el control de punts calents en maquinària i circuits o en seguretat. Així s'han produït sensors en la banda entre 7 i 15 micres, que, segons la intensitat detectada, donen informació de la temperatura, ja que estan basats en la llei de Stefan-Boltzmann (que diu que la intensitat d'emissió és proporcional a la potència quarta de la temperatura absoluta). Al mateix temps s'han desenvolupat materials transparents a aquesta banda (vidres amb components de germani) per produir les òptiques que formen les imatges. En la figura 13 es veu una d'aquestes imatges, sempre mostrades en fals color, d'acord amb una escala de temperatura.

No podem passar per alt el camp de les imatges mèdiques, que aquests 25 anys ha experimentat un progrés inimaginable. Malgrat que ja ens hem acostumat a les ecografies, tomografies, ressonàncies (figura 14), etc., es tracta de tot un món que ha estat exposat en una altra secció d'aquest conjunt.



Figura 13: Imatge termogràfica.

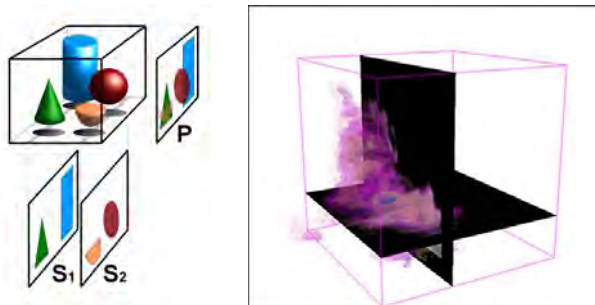


Figura 14: Esquemes de les imatges tomogràfiques, com a seccions d'un volum tridimensional.

(http://en.wikipedia.org/wiki/File:TomographyPrinciple_Illustration.png)

5.3 Nous components

Associats al camp de l'òptica també cal citar tot un conjunt de components que han evolucionat d'una manera insospitada, tots prou importants per dedicar-los un capítol a cadascun, però les limitacions d'espai obliguen a fer-ne una enumeració molt breu.

a) Els recobriments òptics, que milloren les actuacions de la llum en els vidres òptics, segons la transmissió i reflexió controlades selectivament en funció de la longitud d'ona, gràcies als avenços en l'òptica de capes fines i als nous materials adients per les bandes extremes de l'espectre visible, principalment en l'infraroig.

b) Els panells per a pantalles. Els progressos en la tecnologia de cristall líquid aplicats a pantalles (LCD o *liquid crystal displays*) han propiciat la gran expansió que trobem dia a dia en minipantalles en els telèfons mòbils o en molts aparells domèstics, en automòbils, aparadors i anuncis, en els canons de projecció o en les pantalles planes de televisió, que després han derivat en TFT (*thin film transistors*) i posteriorment en les de plasma, amb les variants de SED (*surface-conduction electron-emitter display*) i FED (*fields emission display*). I finalment, en les OLED (*organic light emitting diode*) o simplement, LED.

Les primeres matrius de cristall líquid van aparèixer el

1972 i es van anar incorporant als rellotges i a les calculadores, però no va ser fins el 1985 (fa 25 anys) quan Seiko-Epson van llançar el primer aparell de televisió de butxaca, de 2" (ja apareixen diferents tonalitats de gris), i va començar, així, una nova etapa per a les pantalles de cristall líquid. També el cristall líquid ha estat responsable de l'aparició dels SLM (*spatial light modulators*) i després, dels LCOS (*liquid crystal on silicon*), és a dir, moduladors espacials de llum que permeten el control dels fronts d'ona, amb aplicacions importants en el camp de l'emmagatzemament òptic, en les pinces òptiques i en altres camps punters de la recerca òptica adaptativa, així com en espectacles, com és el cas de les ulleres per a certs tipus de cinema en 3D.

c) Importants avenços en materials relacionats amb l'òptica no lineal han permès el desenvolupament de nous làsers, nous components per a fibres òptiques i nombroses aplicacions de nous materials. Entre aquests cal ressaltar els cristalls fotònics, desenvolupats a partir del treball clau publicat per Yablonovitch el 1987 sobre l'estructura fotònica de bandes.

6 Avenços d'algunes tecnologies fotòniques relacionades amb el làser

Fa cinquanta anys, el mes de maig de 1960, Theodore Maiman, investigador dels Hughes Research Laboratories, encenia el primer làser de la història de la humanitat. El desenvolupament del làser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) va ser possible gràcies a la confluència d'una sèrie de fites històriques al llarg de la primera meitat del segle XX. Des d'aquelles dates, la llum làser s'ha establert com una de les eines científiques, tecnològiques i industrials més versàtils que existeixen, amb un impacte molt transversal, des del més aplicat fins a les fronteres del coneixement.

Durant aquests anys no han cessat els avenços en diverses branques de la ciència i de la tècnica, que, gràcies al làser, s'han beneficiat de nous descobriments i aplicacions. La gran diversitat amb què diferents tipus de tecnologies han adoptat la llum làser fa que les seves aplicacions incloguin molts camps, entre els quals podríem citar la medicina —tant per a ús quirúrgic com per a ús terapèutic—, les telecomunicacions, la indústria —en el processament, tall i soldadura de materials, o en les etapes d'inspecció i control de producció—, la visió artificial i robòtica, la metrologia, la perfilometria en 3D, la teledetecció, l'holografia artística i els espectacles, l'holografia interferencial, l'anàlisi atmosfèrica i medi ambient i seguretat. També en instrumentació per a la investigació en diversos camps: espectrometria, microscòpia, fotònica, òptica no lineal i altes energies. Actualment, el làser entra en els límits de la recerca de fenòmens ultracurts, amb polsos ultraintensos, però cal no oblidar que a l'altra banda de les aplicacions el trobem dia a dia en els nostres ordinadors i impresso-

res, en lectors de codis de barres, etc. Últimament, els esforços en la recerca es dirigeixen cap als làsers de polsos ultracurts amb aplicacions biomèdiques i en nanofotònica.

Es faria interminable l'enumeració dels avenços en cadascun dels camps i subcamps al llarg d'aquests 25 anys, però es poden ressaltar tres aplicacions del làser que han experimentat profitoses evolucions tecnològiques, totes relacionades amb les TIC (tecnologies de la informació i les comunicacions). Concretament, els discos compactes, la recerca en memòries òptiques-hologràfiques i les fibres òptiques.

6.1 Els discos compactes. Del CD al blu-ray

El CD o disc compacte es va crear per la conjunció de les empreses Philips i Sony el 1979: la part òptica la va desenvolupar Philips i la part de lectura i codificació, Sony. Es va presentar el 1980 i es va anar estenent de mica en mica, de manera que el 1983 la firma americana CBS (absorbida els anys noranta per Sony Records) fa els primers discos compactes de música i el 1984 els discos compactes s'estenen al mercat informàtic, fins a arribar a emmagatzemar 700 MB. La demanda de més capacitat, principalment per la necessitat de mostrar pel·lícules en format digital (en aquell moment només en format analògic de vídeo VHS) va propiciar que a meitat dels anys noranta s'unifiquessin criteris i normes per crear el DVD (inicialment *digital video disc* i després *digital versatile disc*). El 1998 es comencen a expandir en el mercat les unitats amb capacitat de reproduir i gravar DVD, que després, el 2001, acaben convertint-se en estàndards. El 2003, un cop més, creix la necessitat de més capacitat i es considera el projecte de noves millores, entre les quals hi ha el canvi del làser de lectura de 650 nm a una de menor longitud d'ona (405 nm), de manera que s'aconsegueix una menor focalització i, per tant, més densitat de bits gravats. A més, gravant a doble cara i doble capa i amb millores en els algorismes de codificació i compressió, apareix el projecte de l'HD DVD (*high definition DVD*), de la mà de Toshiba. Al mateix temps, Sony inicia un projecte basat també en un format de làser blau de 405 nm batejat com a *blu-ray*. Així doncs, aquestes dues companyies protagonitzen una «guerra de formats» fins el 2008, quan s'imposa aquest últim format. La figura 15 mostra l'evolució de la focalització dels làsers, que ha permès aconseguir més densitat d'informació.



Figura 15: Evolució de la focalització dels làsers, aconseguint més capacitat d'emmagatzematge

6.2 Memòries hologràfiques. La promesa d'una gran capacitat d'emmagatzemament

Els anys seixanta, gràcies al làser, hi hagué un gran desenvolupament de l'holografia. El 1971, el seu descobridor, Denis Gabor, rebé el Premi Nobel. El 1974, Stephen Benton inventà uns tipus d'hologrames en colors, coneguts com a hologrames tipus *rainbow*, i uns anys més tard es desenvoluparen les tècniques de transferència, de manera que el 1984 (justament fa 25 anys) aparegué el primer holograma d'aquest estil en forma d'àliga amb les ales desplegadas en la portada de la revista National Geographic. El mateix any, l'empresa Visa va incorporar aquest tipus d'holograma, que mostrava el conegut colom, en les targetes de crèdit, tal com es mostra en la figura 16.

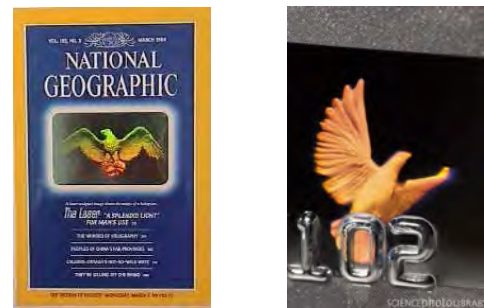


Figura 16: Holograma a la portada del National Geographic i holograma de les targetes Visa, apareguts l'any 1984.

(<http://www.holophile.com/images/NatGeo.jpg>)
(<http://www.sciencephoto.com/>)

Però el que els últims anys ha experimentat un notable interès ha estat la recerca en les memòries òptiques hologràfiques a causa de l'enorme possibilitat d'emmagatzemar informació en volum. Hi ha prototips amb resultats molt prometedors, però la seva expansió i comercialització de moment està aturada, ja que suposaria nous dispositius de gravació, reproducció i emmagatzemament. Ara resulten més comercials els dispositius actuals en disc (CD, DVD, etc.) en suport plàstic metal·litzat i amb l'estructura dels bits com a nanoexcavacions de lectura i gravació òptica, o bé en suport de tipus memòria amb connexió USB. En un futur proper, però, la memòria hologràfica pot ser una gran alternativa a una demanda creixent de memòria, ja que la capacitat d'informació per unitat de volum és superior.

6.3 Fibres òptiques. Els tubs de llum es fan més llargs

A principis dels anys seixanta, malgrat que ja es coneixien les fibres òptiques i s'havia provat d'enviar senyals amb el làser (que s'havia descobert recentment), l'excés d'absorció en feia inviable l'ús per a les telecomunicacions. El 1966, Charles Kuen Kao mostrà la possibilitat de la comunicació en trobar la causa de l'absorció en la pròpia fabricació de la fibra i va demostrar que, en millors condicions tècniques, la llum podria viatjar grans distàncies.

Aquest fet desencadena una sèrie imparabile de millores i avenços tecnològics, s'inicia el naixement d'una nova era en la història de les telecomunicacions. La informació digitalitzada (imatge, so) s'introdueix en fibres òptiques mitjançant un làser que modula els bits (figura 17).



Figura 17: Dos exemples de gran avenç tecnològic en aquest període: els làsers i les fibres òptiques

(<http://imer.gob.mx/programas/clucballeros/files/2009/04/laser-025.jpg>)
 (http://www.bel.utcluj.ro/rom/Pagini_Personale/Ramona_Galatus/)

Pel que fa als avenços en aquests 25 anys, a part d'una millora constant en la capacitat de transmissió d'informació (es parla de la llei de Moore òptica, en què la capacitat pot duplicar-se en pocs mesos), es pot remarcar que el 1986 apareixen els amplificadors de fibra dopada amb erbi (*erbium doped fiber amplifier*, EDFA), desenvolupats per la Universitat de Southampton per als Bell Laboratories. Aquests amplificadors reduïen el cost de sistemes de fibra de llarga distància pel fet d'eliminar els mecanismes repetidors de conversions òptiques a electròniques, amplificació electrònica i nova conversió electrònica a òptica. Els EDFA van fer possible el desenvolupament de la tècnica DWDM (*dense wavelength-division multiplexing*) i, en general, una major distància de transmissió. Així, el 1988 entrava en funcionament el primer cable telefònic transatlàntic.

Per fer-nos una idea de la gran expansió de les comunicacions per fibra, entre 1998 i 2002 s'havien instal·lat, en total, 523.000 km de cable submarí; el 2005, mig milió (500 milions) de persones usava regularment Internet i el 2008 ja eren 1.000 milions. Pel que fa a la velocitat de transmissió, Bell Laboratories anuncia una capacitat de transmetre l'equivalent de 400 DVD per segon al llarg de 7.000 km, sobrepasant els cables submarins comercials per un factor 10. En la figura 18 es pot veure un mapamundi de la firma ALCATEL que mostra els diversos cables submarins de comunicació.

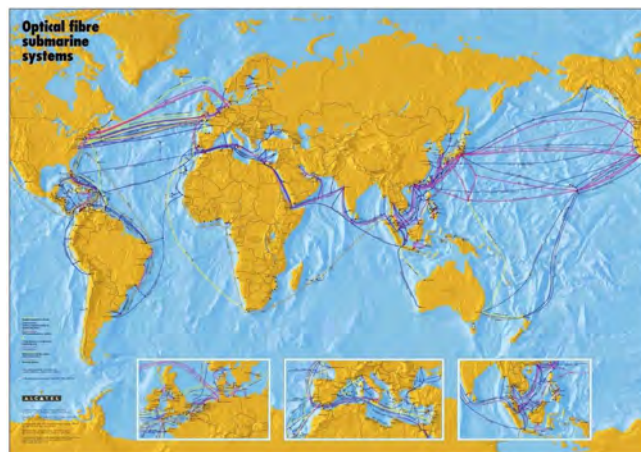


Figura 18: Mapamundi de la firma ALCATEL mostrant els diversos cable submarins de comunicació

7 L'òptica i els premis Nobel

Del centenar i escaig d'edicions dels premis Nobel de Física des de la seva creació, aproximadament una tercera part estan relacionats amb l'òptica. Concretament, aquests 25 anys podem observar el fet en quatre ocasions, sense tenir en compte premis d'altres camps com ara la química, la medicina o la biologia, en què, d'alguna manera, ha estat present l'òptica en alguna tècnica d'anàlisi.

El 1986 va ser compartit entre Ernst Ruska (1/2) pel seu treball fonamental en òptica electrònica i pel disseny del primer microscopi electrònic, i Gerd Binnig (1/4) i Heinrich Rohrer (1/4), pel seu disseny del microscopi d'efecte túnel.

El 1997 es va repartir a parts iguals entre Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji i William D. Phillips pel desenvolupament de mètodes per refredar i atrapar àtoms amb llum làser.

El 2005 es va distribuir entre Roy J. Glauber (1/2) per la seva contribució a la teoria quàntica de coherència òptica i entre John L. Hall (1/4) i Theodor W. Hänsch (1/4) per les seves contribucions al desenvolupament de l'espectroscòpia de precisió basada en làser, incloent-hi la tècnica de pintura de freqüència òptica.

El passat 2009 van ser guardonats Charles K. Kao (1/2) pels assoliments innovadors relatius a la transmissió de la llum en fibres per a les comunicacions òptiques, i Willard S. Boyle (1/4) i George E. Smith (1/4) per la invenció d'un circuit semiconductor per captar imatges: el sensor CCD.