



UNIVERSITAT

on and similar papers at core.ac.uk

bro

provided by Repositori Institucion

Un breu recorregut per l'Òptica

Vicent Climent Jordà

Lliçó inaugural del curs 2007/08

VICENT CLIMENT JORDÀ

Un breu recorregut per l'Òptica

*(Viatge, a la velocitat de la llum, des dels seus inicis
fins a les fronteres actuals)*

**Lliçó inaugural
del curs 2007/08**

Castelló de la Plana, 21 de setembre de 2007

Producció del Servei de Comunicació i Publicacions
Campus del Riu Sec. Rectorat i serveis centrals
12071 Castelló de la Plana
Tel. 964 72 88 19. Fax 964 72 88 32
<http://www.uji.es/publ> · publicacions@uji.es

Dipòsit legal: CS 22-2007



*Benvolgut Adso –va dir el mestre–, durant tot el viatge
he estat ensenyant-te a reconèixer les empentes per les
quals el món ens parla com per mitjà d'un gran llibre
Umberto Eco (El nom de la rosa)*

A manera d'introducció (o... per on començar?)

Fa diverses setmanes em van requerir per telèfon el títol de la lliçó inaugural. Com que no en disposava, encara acordarem un termini, que a mi em va semblar excessivament curt, i al meu interlocutor molt llarg (mai plou a gust de tots i més en aquest país, en el qual –com canta Raimon– la pluja hauria d'anar a escola¹).

En penjar el telèfon, pensant en la lliçó, vaig reflexionar que m'hauria agradat poder emular Fray Luis de León, amb allò de «com dèiem ahir...»; obviant, d'aquesta manera, el que ja ha passat un any des de la darrera lliçó d'obertura de curs, i poder donar un sentit de continuïtat a aquella lliçó i a aquesta. Vaig recordar, llavors, que havia versat sobre estètica i disseny; la qual cosa m'obligaria a començar la meua dissertació comentant aspectes sobre els quals no tinc excessives nocions; i em veuria obligat a escollir (i projectar) imatges d'algunes icones o mites estètics reconeguts i acceptats per tots; com per exemple, el de Norma Jeane; o a comentar, partint d'alguna fotografia antiga, certs aspectes tecnològics relacionats amb el funcionament i el disseny d'alguns artefactes, per exemple, d'enginyeria hidràulica que trobem disseminats per sèquies de l'horta i la marjal, ja abandonats i quasi migsoterrats, i que fa anys que han deixat de ser útils.

Ambdós exemples –«vius», ja sols, en les nostres memòries– eren imatges que havien sigut enregistrades per un sistema dissenyat per a captar la llum. Va ser aleshores quan en van venir a la memòria molts altres sistemes i tècniques òptiques que ens permeten escodrinyar la realitat, no sols per a poder gaudir-nesinó per a poder penetrar en el coneixement i la comprensió d'aquesta, i donar satisfacció a la curiositat humana. També em vaig adonar que, parafrasejant el cantant i poeta cubà Silvio Rodríguez, «li devia una lliçó a l'Òptica», pel paper que ha jugat, que juga, i que jugarà en el desenvolupament de la ciència en general, i en el de la física en particular. Per això aquesta lliçó inaugural duu per títol:

Un breu recorregut per l'Òptica

(Viatge, a la velocitat de la llum, des dels seus inicis
fins a les fronteres actuals)

En aquest recorregut pretenc mostrar, i comentar, alguns fets i fites de l'òptica que han sigut rellevants per la repercussió i l'aportació dins de la física, per a, després de recórrer-los a una velocitat vertiginosa, guaitar —com xiquets curiosos que apeguen els nassos a la gran peixera de l'univers— algunes de les fronteres que actualment té l'Òptica.

Sobre la importància de l'Òptica o els «10 Most Beautiful Physics Experiments»

La importància, o el pes, que l'Òptica ha tingut en la física, es pot veure, a manera d'exemple, en el següent fet. Robert P. Crease, expert en història de la ciència i vinculat al Departament de Filosofia de la Universitat de l'estat de Nova York, va realitzar al maig de 2002 una enquesta sobre quin havia sigut, segons el parer de la comunitat científica de físics, l'experiment «més bonic» de la física. La consulta es dugué a terme a través de la coneguda revista *Physics World*, de gran difusió als Estats Units de Nord Amèrica, i els resultats es varen publicar en el número de setembre[1]. L'enquesta també va tenir ressò en *The New York Times* i, per efecte dòmino, en infinitat de periòdics internacionals (en particular, a Espanya es van donar a conèixer a l'octubre de 2002 al diari *El País*)[2].

La classificació dels 10 experiments més votats pel col·lectiu de físics, ordenats de major pel nombre de vots aconseguits, era la següent:

- 1) La difracció d'electrons per una doble esclatxa (Claus Jönsson –1961–)
- 2) L'experiment de la caiguda lliure de cossos (Galileu Galilei –1600–)
- 3) La determinació de la càrrega de l'electró amb gotes d'oli (Robert Millikan –1909–)
- 4) La descomposició de la llum solar per un prisma (Isaac Newton –1665–)
- 5) L'experiment de la interferència de la llum (Thomas Young –1801–)
- 6) La mesura de la força gravitatòria amb una balança de torsió (Henry Cavendish –1798–)
- 7) La mesura de la circumferència terrestre (Eratòstenes –segle III–)
- 8) La caiguda de cossos per un pla inclinat (Galileu Galilei –segle XVII–)
- 9) El descobriment del nucli atòmic (Ernest Rutherford –1911–)
- 10) L'experiència del pèndol de Foucault (Jean Foucault –1851–)

Resulta significatiu que, en el *Top ten* dels experiments de la física, hagueren sigut seleccionats dos experiments i mig d'òptica³.

En quart lloc apareix la famosa experiència sobre la descomposició espectral de la llum blanca del Sol, amb un prisma de vidre[3], que va dur a terme el tan admirat (com igualment temut) Isaac Newton, considerat el físic més gran de tots els temps.

En la cinquena posició trobem l'experiment de la doble esclatxa, de Thomas Young[4], sobre la interferència de la llum que posava de manifest la seua naturalesa ondulatoria. A més, aquest experiment va ser el que, posteriorment, va donar lloc a la versió del considerat el «més bell» experiment de física (d'aquí que el considere com mig a mig experiment d'òptica): l'experiment de la interferència d'electrons en passar a través d'una doble esclatxa⁴ [5]; que ara servia, curiosament, per a posar de manifest el comportament ondulatori però, en aquest cas, no de la llum, sinó de partícules elementals, com els electrons; es consolida d'aquesta manera la mecànica quàntica, una de les dues teories més rellevants de la física formulades en el segle XX⁵.

A pesar de l'origen de l'enquesta, entre els autors del *Top-ten* només apareix un nord-americà (Millikan); la resta són tres anglesos (Newton, Young i Cavendish), un francès (Foucault), un grec (Eratóstenes), un alemany (Jönsson) i dos italians; bé, un –Galileu– que valia per dos.


L'enquesta, doncs, no va ser sectària ni xovinista; i que en ella aparegueren dos experiments i mig d'òptica, és a dir una quarta part del total, posa de manifest –de forma prou evident– la importància que ha tingut l'òptica en el desenvolupament de la física.

Una breu passejada

Per aquest motiu, intentaré fer ara un breu recorregut per l'Òptica abordant el que han sigut les «pedres angulars» més importants en el seu desenvolupament, així com en la recerca simultània de la naturalesa de la llum[6-10].

El primer període

No es coneixen amb molta precisió les nocions que es tenien d'òptica en l'antiguitat, encara que s'han trobat alguns elements òptics en excavacions arqueològiques. Així, es té constància del descobriment d'un espill, en la piràmide de Sesostri II (1900 ac) a la vall del Nil, que probablement era utilitzat per a desviar els rajos del Sol. En qualsevol cas, les primeres no-



cions que sobre la llum tenien les cultures primitives eren de naturalesa religiosa[11].

Van haver de ser els filòsofs i els matemàtics grecs, els que es qüestionaren i intentaren explicar quina era la naturalesa de la llum que, evidentment, van vincular estretament amb el fenomen de la visió.

El geòmetra Euclides d'Alexandria (300 aC) va ser el primer a establir un nombre d'idees importants sobre la llum, que encara avui, d'una manera més elaborada, persisteixen; com ara la propagació rectilínia dels rajos de llum i la llei de la reflexió. I també va ser el primer que les va compendiar per escrit en el seu tractat de «Catòptrica» .


Si combinem els principis establerts per Euclides, amb els d'Hero d'Alexandria (100 dC), que va establir que els rajos de llum recorren el camí més curt, i amb la llei de la refracció estudiada (encara que no formulada) per Ptolemeu (170 dC), tenim quasi en essència les bases del que es coneix com a òptica geomètrica. No obstant això, durant aquella època no es va avançar en el descobriment del mecanisme responsable de la visió, ja que predominava la idea que aquesta es produïa perquè els rajos de llum emergien des dels ulls fins a abastar els objectes⁶.

Pel que es refereix a la civilització romana, tan sols cal assenyalar que Sèneca (3 a 65 dC) va ser el primer a mencionar la capacitat amplificadora de les lents convergents en descriure com es veien les coses a través d'un globus de vidre ple d'aigua. Amb la caiguda de l'imperi Romà (475 d.c.), (que marca l'inici de l'edat mitjana) l'estudi de l'òptica, així com el d'altres ciències bàsiques, va caure durant diversos segles en la més absoluta foscor⁷.

En l'edat mitjana només els àrabs van realitzar estudis sobre òptica. Va ser un científic de gran talla, Alhazen (1000 dC)⁸ qui, definitivament, va resoldre el dilema de la visió, en descriure detalladament l'anatomia de l'ull⁹ basant-se en les disseccions que va realitzar. Contradient la teoria d'Hero i Ptolemeu, Alhazen va mantenir que la visió es produïa perquè la llum es reflectia en els objectes i arribava fins als ulls.

Així mateix va treballar en la llei de la reflexió i també va estudiar els espills esfèrics i parabòlics. I el més important: la traducció llatina del seu tractat «Opticae» va ser la millor obra de referència per als estudiosos occidentals fins al segle XVII.

Aquest tractat va permetre que frares de l'edat mitjana desenvoluparen les anomenades «pedres per a llegir», tallades en forma de mitja esfera; i que Roger Bacon (1210 -1292), frare d'origen anglès, comprovava que les persones adultes podien tornar a veure les lletres si utilitzaven vidres tallats: es diu que aconsellava lús d'aquests als ancians i a les persones de vista dèbil[12]. Per aquest motiu se'l considera l'inventor de les ulleres.¹⁰



En el segle XV, Leonardo da Vinci (1452-1519) també aprofundí en l'estudi de l'estructura i el funcionament de l'ull, el qual va comparar amb una cambra fosca: una simple caixa ortoèdrica tancada, que posseeix un xicotet orifici en una de les cares, per la qual pot penetrar la llum, i formar en la cara oposada una imatge invertida, i ben definida, del món exterior. És molt probable que, igual que altres pintors de l'època, Leonardo utilitzara una cambra fosca per a incorporar a la seua pintura els principis de la perspectiva; i va ser la primera persona que va parlar de la possibilitat d'usar lents de contacte per a corregir problemes visuals.

Tots aquests avanços, majoritàriament modestos, constitueixen el que es podria dir el primer període de l'Òptica.


Des del segle XVII

El telescopi refractor va ser el primer «instrument» òptic que revolucionaria l'esdevenir de la física. L'origen se situa en la botiga d'un fabricant d'ulles danès, Hans Lippershey, l'any 1600, qui combinant dues lents, convenientment muntades en un suport cilíndric, aconseguia que els objectes observats a través d'elles paregueren més pròxims (i es venen augmentats). Es té constància als arxius de la Haia, que Lippershey, el 1608, va sol·licitar una patent per al telescopi, però que el govern danès, veient l'interés militar del dit instrument, en compte d'atorgar-li-la, va adquirir els seus drets a l'inventor. La notícia d'aquest instrument es va difondre ràpidament per tot Europa.

Pareix que el senat de Venècia, tenint coneixement de les qualitats del telescopi, va consultar Galileu Galilei, el científic de més prestigi en aquells temps, qui segons la informació recopilada, no sols es va fabricar el seu telescopi, (emprant dues lents simples, una de convergent –l'objectiu– i una altra de divergent –l'ocular–), sinó que ho va descriure. Així doncs, en certa manera, es considera que «Galileu va reinventar el telescopi».

Però la grandesa de Galileu (1609) radica que va ser el primer a donar-li un ús científic: va començar a fabricar els seus propis instruments (amb els quals aconseguia més de 30 augmentos) per a observar el cel.

El 1610, Galileu va publicar *Sidereus Nuncius*, una descripció de les seues observacions del cel nocturn, i encara que era molt breu (només 24 pàgines) arrellegava coses com que la Lluna no tenia una superfície «suau» com es pensava, sinó que era rugosa; que la Via Làctia estava composta de milions d'estrelles, i que (i aquest va ser el resultat més rellevant) Júpiter tenia quatre llunes girant al seu voltant: per tant, no tot girava al voltant de la Terra! Galileu es va recolzar en aquestes observacions per a revolucionar la ciència, reinven-



dicant el model copernicà (heliocèntric) del nostre sistema planetari, enfront el model ptolemaic (geocèntric), que era l'acceptat per les autoritats acadèmiques i religioses d'aleshores¹¹. Un altre mèrit de Galileu és que li va enviar un dels seus primers telescopis al cèlebre astrònom Kepler¹².

Johannes Kepler (1571-1630) que, a la vegada, va dissenyar un nou telescopi en què l'objectiu i l'ocular, eren lents convergents, el va utilitzar per a compilar les taules de dades sobre el moviment dels planetes que van ser la base de les seues transcendents lleis –les lleis de Kepler– sobre el moviment planetari. El seu llibre *Dioptrice* (1611), que es va convertir en un text per als estudiosos de l'òptica durant molts anys, on a més d'establir la llei de la refracció per a angles petits: la proporcionalitat entre l'angle refractat i el d'incidència, també va desenvolupar un tractament de l'òptica de primer ordre (òptica paraxial), i va establir els principis del funcionament d'una lent prima i de la combinació d'aquestes.

També són deguts a Kepler dos descobriments de gran importància:


- Que la imatge visual es forma en la retina, i està invertida amb relació a l'objecte i que el cervell és l'encarregat de tornar-la a invertir i posar-la dreta.
- L'existència d'un nou fenomen òptic: el de la reflexió total interna. A partir d'un angle límit d'incidència, el raig incident no es refracta en el segon medi, sinó que pateix una reflexió total i retorna al medi inicial¹³.

Sobre la teoria corpuscular de la llum

Que la llum podria estar constituïda per partícules materials és una teoria que tindria els seus orígens en els filòsofs atomistes seguidors de Demòcrit. Aquesta teoria va guanyar impuls amb les idees mecanicistes de Descartes (1596-1650) [13] i amb el treball de Newton (1642-1727)[3].

Descartes, utilitzant una analogia mecànica, va considerar que la llum, igual que el so, es podia interpretar com una pressió transmesa a través d'un medi elàstic que ompliria tot l'espai: –l'èter–, i partint d'aquesta hipòtesi va ser el primer a formular, en termes de sinus, la llei de la refracció.

No obstant açò, aquesta llei, la de la refracció, porta el nom del científic que l'havia estudiada empíricament, el 1621, el matemàtic i astrònom Willebrord Snell (1591-1626), professor de Leyden; qui va aconseguir mesurar els angles que formen els rajos incidents i refractats a la superfície de separació de dos medis. A partir d'aquestes mesures va formular la llei de la refracció, no sols per a angles petits, com havia fet Kepler, sinó també per a angles grans. Snell va obrir, així, la porta a l'òptica aplicada.



La precocitat i la superioritat de Newton (1642-1727)¹⁴ en l'estudi de l'Òptica, ho demostra el fet que als 18 anys ja havia fabricat un telescopi petit i poc potent, però amb una novetat revolucionària: va utilitzar espills esfèrics, en comptes de lents, per evitar el molest problema de l'aberració cromàtica, que dona lloc a imatges afectades d'esborronament cromàtic. Es tracta del telescopi reflector, que posteriorment (amb modificacions i millores) va ser d'ús estès en astronomia i astrofísica¹⁵.

Després va realitzar una sèrie de magnífics experiments amb la intenció de desvetllar la naturalesa i el comportament de la llum. El més conegut és el que hem comentat sobre la dispersió de la llum per un prisma; per la qual cosa conclou que la llum blanca està constituïda per llum de diversos colors i que aquests tenen distinta refrangibilitat¹⁶.


Newton va proposar per a la llum un model corpuscular. Considerava que la llum blanca estava constituïda per un conjunt de petites partícules, en el qual el color és una propietat inherent –la mida–, que es propaguen en un medi material que omple tot l'espai: «l'èter»; i que l'atracció que els cossos transparents exercien sobre les diferents partícules ocasionava el fenomen de la refracció. Newton va resumir els seus experiments en el seu cèlebre llibre *Opticks*[3].

Com a conseqüència de l'autoritat científica de Newton, pocs van dubtar de la naturalesa corpuscular de la llum¹⁷.

Sobre la naturalesa ondulatoria de la llum

En plena hegemonia de la ciència de Newton, Francesco M. Grimaldi (1665) va ser el primer a observar la desviació de la propagació rectilínia que pateix la llum quan aquesta es veu obstruïda o interceptada per un obstacle, veient que la zona d'ombra geomètrica consistia en una successió de bandes fosques i brillants acolorides¹⁸. Grimaldi va batejar aquest fenomen amb el nom de *difracció*[14], i encara que va arribar a especular sobre el caràcter ondulatori de la llum, finalment rebutjà aquesta possibilitat.

Però l'holandès Christian Huygens (1629-1695) creia en la naturalesa ondulatoria de la llum, i va considerar que aquesta es propagava com a petites ones esfèriques que se superposaven geomètricament per a formar-ne una d'envolvent, o front d'ona, la qual, posteriorment, actuava com una nova font d'ones secundàries[15]. Una repetició successiva d'aquest fenomen bastava per a explicar la propagació de la llum, així com els fenòmens de la reflexió i la refracció. La seua teoria ondulatoria li va permetre explicar fins i tot el fenomen de la birefringència que presentaven els cristalls de calcita. Però un fet crucial en la seua teoria era que la velocitat de la llum havia de ser in-



ferior en els medis transparents de més densitat òptica (major índex de refracció), la qual cosa entrava en contradicció amb el que postulava la teoria corpuscular de Newton¹⁹. La comprovació d'aquesta dada era impossible en aquella època.

Va ser a finals del segle XVIII, quan va aparèixer el més ferm oponent de la teoria corpuscular: Thomas Young (1773-1829).

Metge anglès que es va dedicar preferentment al funcionament de l'ull humà, i que va establir que hi ha tres tipus de receptors cadascun d'ells sensible a un dels colors primaris²⁰, i va descobrir com canvia la curvatura del cristal·lí per a enfocar objectes a diferents distàncies i l'origen de l'astigmatisme.

Basant-se en el principi d'interferència de les ones, Young va explicar els colors que es formen en pel·lícules fines, com les bombolles, i també va aconseguir explicar el fenomen dels anells de Newton que es formen en pel·lícules d'aire primes (que el mateix Newton no va poder interpretar). Va estudiar diversos fenòmens d'interferència amb la llum, incloent-hi l'experiència que porta el seu nom, i que forma part de la llista dels «10 experiments més bells» que hem vist anteriorment. I que consistia a fer passar la llum que procedia d'una única font, a través de dues esclatxes estretes molt pròximes, i observar llavors que es formaven unes bandes brillants que s'alternaven amb altres de fosques²¹[4].

Young creia que les vibracions lluminoses s'efectuaven en direcció paral·lela a la propagació de les ones lluminoses (ones longitudinals). Açò li va impedir tenir la capacitat per a donar una explicació satisfactòria dels fenòmens de polarització.²²

Les bases teòriques per a la teoria ondulatoria de la llum van ser formulades pel físic francès Augustín Fresnel (1788-1827)[16], que va realitzar nombrosos experiments sobre interferències i sobre la difracció produïda per molts obstacles. Va considerar que la llum es propagava com a suma –analítica, no geomètrica– de les ones secundàries de Huygens, i que donava lloc als efectes d'interferència i difracció. Així doncs, la gran aportació d'Auguste Fresnel per al rescat de la teoria ondulatoria de la llum va ser la seua formulació matemàtica²³ que va donar rigor al model ondulatori. I amb l'ajuda de Young, d'Arago, i de L. E. Malus, també va explicar teòricament els fenòmens de la polarització en considerar que la llum es comportava com un moviment ondulatori transversal.²⁴

Però va ser l'escolès James Clerk Maxwell (1831-1879) qui, seguint els treballs de Faraday, i valent-se de la seua gran formació matemàtica i teòrica, va unificar l'electricitat i el magnetisme i va establir un conjunt d'equacions matemàtiques, que avui es coneixen, en el seu honor, amb el nom d'equacions de Maxwell[17].

Maxwell va ser un paradigma per als físics teòrics posteriors: establir lleis, el més senzilles possible, simètriques, i que condensaren el major nombre de fets empírics possibles.

A partir del seu estudi Maxwell demostrà, teòricament, que les perturbacions electromagnètiques es propagaven com a ones transversals, en el medi que es considerava el seu suport mecànic: l'èter. Quan Maxwell calculà la velocitat d'aquestes ones va obtenir un resultat numèric que coincidia amb el de la velocitat de la llum en el buit; per la qual cosa va concloure, definitivament, que la llum era una ona electromagnètica que es propagava a través de l'èter.

En contra del que poguera parèixer, la monumental contribució de Maxwell no va despertar gran entusiasme en la comunitat científica. Va fer falta un experimentador per fer a de Maxwell una llegenda.

La formulació senzilla, que es coneix avui com a equacions de Maxwell, és obra de Heinrich Hertz, un exemple, poc comú, d'algú que va ser més que el típic experimentador que de la teoria només sap el «just per a anar tirant»[18]. La tasca d'Hertz va consistir, en bona mesura, a posar ordre i claredat al treball de Maxwell, i a comprovar, sintetitzar i divulgar la seua teoria²⁵.

L'òptica del segle XX i la concepció actual de la llum

E finalitzar el segle XIX la naturalesa ondulatòria (i electromagnètica) de la llum pareixia un fet ben establert i indiscutible. En la física regnava un ambient d'eufòria i autocomplaença, i semblava que la física ja havia aconseguit el seu objectiu primordial: explicar les lleis de la natura (mecànica, termodinàmica i electromagnetisme); ja no quedava res per fer excepte estendre les mesures a unes poques xifres decimals més. Sembla que la història té el seu origen en un comentari fet pel físic experimental Michelson, durant una conferència impartida a la Universitat de Chicago[19]:

...pareix probable que la majoria dels grans principis subjacents hagen sigut fermament establerts i que els avanços posteriors hauran de buscar-se principalment en la rigorosa aplicació d'aquests principis a tots els fenòmens de què tinguem notícia... Un eminent físic²⁶ ha comentat que les futures veritats de la Ciència física hauran de buscar-se en la sexta xifra decimal

Però les coses canviarien molt ràpidament, i també en això va jugar un paper rellevant l'Òptica²⁷.

Max Planck (1858-1947), hereu de la tradició de la termodinàmica alemanya, estudiava un tema que es trobava en el *borderline* entre la llum i la matèria; Planck intentava reconciliar la teoria clàssica electromagnètica amb



els resultats experimentals de l'espectre de radiació emès per un cos negre a una determinada temperatura²⁸. Anteriorment a ell altres grans físics termodinàmics havien intentat resoldre la qüestió sense èxit²⁹.

Com que no podia donar una solució satisfactòria des dels models de la física clàssica, Planck es va limitar a buscar una funció matemàtica, que s'ajustara a les dades experimentals conegudes. Però per a justificar la seva proposta, des del punt de vista físic, Planck havia d'acceptar que els oscil·ladors, que constituïen les parets del cos calent (cos negre), havien d'emetre i absorbir energia radiant en forma discreta i no contínua.

La introducció de la quantització va suposar per a tota la física un punt d'inflexió. Si bé ni Planck ni els seus col·legues van comprendre la transcendència i conseqüències que se'n derivaren. A Planck (com posteriorment li va succeir a Einstein) l'incomodava que la seva pròpia teoria atemptara contra l'edifici de la física clàssica (que ell tenia en tan alta estima), però finalment va arribar a afirmar[18]: «hem de viure amb la teoria quàntica»; i afegia: «l creieu-me, creixerà. No serà només en òptica. Entrarà en tots els camps».


El que posa de manifest com un germen, que s'havia desenvolupat en l'àmbit de l'òptica, va servir de pedra angular per a la resta del que es donaria en anomenar: física Moderna³⁰.

El 1905, Einstein (1879-1955), intentant explicar l'efecte fotoelèctric (i que consistia en l'emissió d'electrons per una superfície metàl·lica quan s'il·lumina), descobert per Hertz, proposà un model en què la llum estava constituïda per petits paquets o «quants» d'energia, d'igual magnitud als proposats per Planck, en el seu model. Així doncs, Einstein va proposar l'equació per a la llum $E = h\nu$; en la qual formulava que un quant de llum transportava una energia proporcional a la seva freqüència ν ; on h és la constant de Planck[6].

Així doncs, després del treball d'Einstein, es considerava que la llum es propagava com una ona, i interaccionava amb la matèria com si es tractara de corpuscles, sense massa, que portaven una energia discreta donada per l'equació anterior. Aquests quants de llum serien batejats més tard, amb el nom de «fotons», per G.N. Lewis en 1926[20].

Amb l'establiment de la mecànica quàntica, a poc a poc, es va fer evident que els conceptes de corpuscle i ona, que en el domini macroscòpic semblaven mútuament excloents, havien de coexistir en el domini submicroscòpic.

La imatge mental d'una partícula atòmica (electró, neutró, etc.) com una porció localitzada de matèria ja no satisfà; especialment després de comprovar, amb l'experiment «més bell» de la física, que les partícules podien generar patrons d'interferències (i difracció) igual que la llum. Fotons, electrons..., tots tenen ambdues manifestacions: com a corpuscle i com a ona.



D'altra banda, l'experiència de Michelson i Morley per a detectar el «vent de l'èter», va conduir Einstein a postular la seua no-existència, i a establir, a partir del seu principi de relativitat, que la velocitat de la llum era (igual que succeïa amb el quant d'acció « h ») una constant universal; i, posteriorment va mostrar l'afinitat existent entre la massa i l'energia en la seua famosa equació $E=mc^2$. El que pareixien dues magnituds quasi confrontades –matèria i energia– ara resultaven equiparades per aquesta equació[6].

A més, amb la formulació posterior, el 1915, de la teoria de la Relativitat General, establia la deflexió dels rajos de llum (o dels quants de llum) davant de la presència de camps gravitatoris intensos (grans masses). Si la doble naturalesa, ondulatòria i corpuscular, ja li confereix un caràcter certament enigmàtic a la llum, que a més, perceba els efectes de l'acció gravitatòria, mostra, més encara, el seu caràcter complex i obert (encara que siga explicada per la modificació de la geometria de l'espai).

La segona meitat del segle XX, ha sigut per a l'òptica aplicada, una espècie de renaixement, o etapa d'eclosió.

En 1948, l'hongarès Dennis Gabor[21], va establir els principis de l'holografia, a l'estudiar com registrar i reconstruir el front d'ones d'un objecte (puntual); el que significaria, en un futur –quant es varen desenvolupar els làsers– la capacitat per poder registrar, emmagatzemar i reproduir imatges d'objectes en tres dimensions.

D'altra banda, i després de l'establiment per Einstein, al 1916, del fenomen de l'emissió estimulada, el 1960, fruit dels treballs de Townes, Prokhorov i Basov, sobre el MÀSER[22], i de Townes i Schawlow[23] que establien les condicions per a generar llum amplificada, Theodore H. Maiman va construir el primer LÀSER –el làser de rubí–[24], que va constituir una fita en la consecució d'un nou tipus de font de llum. Durant la primera dècada, i les posteriors es van desenvolupar làsers en totes la longituds d'ona, i de tot tipus (de gasos, de colorants, d'estat sòlid...), que varen revolucionar la tecnologia òptica: i van obrir les portes al descobriment de nous fenòmens d'interacció llum-matèria. El seu ús es va estendre a la indústria i la medicina, i també en les nostres vides quotidianes: lectors de codis de barres, lectors de DVD; comunicació per fibra òptica, etc. La combinació d'aquesta nova òptica amb l'electrònica ha donat lloc al naixement del que s'ha anomenat en Fotònica[25].

Però aquest ràpid repàs, en el qual necessàriament hem hagut de deixar moltes llacunes, hem vist com els avanços en la concepció de la llum, i la seua tecnologia, han anat sorgint lentament: hem recorregut més de 3000 anys! En l'àmbit conceptual no s'ha avançat massa, a pesar que en les últimes dècades els avanços tecnològics s'estan produint a un ritme vertiginós.

Com assenyala Eugene Hecht[6], autor d'un dels llibres introductoris sobre Òptica, més difós en els primers cursos d'universitat,



«resulta sorprenent i meravellós observar que la resposta va canviant subtilment, mentre que la pregunta, què és la llum? roman immutable i tenint vigència».

Les fronteres actuals de l'òptica són molt extenses: la computació òptica, la teleportació i l'encriptació quàntica (que aprofiten la naturalesa quàntica de la llum), les noves propietats òptiques dels materials (els nous metamaterials o materials esquerrans), l'òptica ultraràpida i ultraintensa i els nous fenòmens d'interacció llum-matèria, les comunicacions òptiques i les fibres de cristalls fotònics i microestructurades, etc. De totes elles voldria destacar-ne dues: l'Òptica ultraràpida i l'Òptica adaptativa.

L'Òptica ultraràpida


S'anomena així l'òptica relacionada amb els polsos làser de molt curta durada. Un pols de llum ultracurt és un pols electromagnètic amb una duració temporal compresa entre el femtosegon (10^{-15} s) i el picosegon (10^{-12} s). Els polsos làsers ultracurts són els esdeveniments més petits mai generats per la tecnologia desenvolupada per l'home. Per a fer-nos una idea de la seua menudesa, basta adonar-nos que un femtosegon és a 1 minut, com 1 minut és a tota l'edat de l'univers³¹[26].

Aquesta és una de les raons per les qual els polsos làser ultracurts són de gran importància, ja que ens permeten mesurar esdeveniments molt curts i tenir accés a regions, de l'estudi de la matèria (o de la interacció radiació-matèria) que fins ara resultaven inaccessibles.

Un poc d'història sobre la tecnologia ultraràpida

Pareix que tot va començar amb una aposta de 25.000\$, realitzada el 1872, a Palo Alto, Califòrnia, entre Leland Stanford, (magnat del ferrocarril, exgovernador de Califòrnia i posteriorment fundador i mecenes de la prestigiosa Stanford University), i el seu soci (Frederick MacCrellich), sobre si «*Poden les potes d'un cavall al galop, en algun instant, no estar tocant terra?*».

Per a resoldre aquesta qüestió Stanford va contractar les habilitats fotogràfiques de l'anglès Eadweard Muybridge (1830-1904). Aquest va col·locar diverses càmeres paral·leles al recorregut de l'equi, i equidistants entre si, que s'accionaven automàticament gràcies als fils que el cavall anava trencant al seu pas. La sèrie de fotografies obtingudes el 1873 va demostrar que existia un instant en què les quatre potes del cavall estaven en l'aire³².



Muybridge, amb les seues càmeres, va aconseguir fragmentar el moviment i mostrar el món ocult del *temps detingut*[27]. Va ser el primer a dividir el segon: en aquest cas es necessitava obtenir fotografies (o fotogrames) a intervals d'1/60 de segon, per a dilucidar que, efectivament, hi havia un instant en què el cavall «volava» sense tocar el terra; i és que «per a mesurar un esdeveniment en el temps es necessiten un altre la duració del qual siga encara menor».


A partir d'aquest instant va començar la curiositat per «registrar» (o veure) com succeïen esdeveniments que podien ser molt, molt ràpids. I així, el 1942, l'enginyer nord-americà Harold E. Edgerton del MIT (Massachusetts Institute of Technology) es va dedicar a desenvolupar fonts de llum estroboscòpiques: làmpades que generaven flaixos intensos i repetitius, amb intervals de l'ordre de microsegons (10^{-6} s). Amb aquests va aconseguir donar un salt quantitatiu, però també qualitatiu perquè va ser el primer a aplicar aquestspolsos a un interès científic, com és l'estudi dels motors elèctrics síncrons (tema de la seua tesi doctoral); encara que també els va aplicar a registrar les conegudes, i inoblidables, sèries fotogràfiques d'esdeveniments com: l'impacte d'una gota sobre una superfície líquida, projectils en vol, o moviments humans ràpids[28].

Després de les làmpades estroboscòpiques, ja van ser els làsers els que van prendre el relleu en la consecució de polsos de llum encara més curts.

Des de la construcció del primer làser de rubí, el 1960 per Theodore Maiman[24], ja es va veure la possibilitat tècnica dels làsers per a aconseguir feixos de llum de potències elevades. Per la pròpia definició de potència³³, açò requeria aconseguir majors energies (per mitjà del procés d'amplificació) i concentrar-la en un interval temporal més curt: generació de polsos.

En un làser, el medi actiu dóna lloc a l'amplificació de la llum, i això com a conseqüència del fenomen d'*emissió estimulada* descobert per Einstein el 1916. En el procés d'emissió estimulada, un àtom excitat a l'interaccionar amb un fotó incident, d'una freqüència apropiada, emet un altre fotó d'aquestes característiques, i s'obté, com a resultat, una amplificació coherent del feix incident (entra un fotó i n'ergeixen dos). Aquest procés repetit al llarg del medi actiu (a mesura que avancen els fotons) origina un efecte d'emissió de fotons en allau: és a dir, l'emissió de radiació lluminosa amplificada (d'elevada intensitat, per a entendre'ns). Però per a no haver d'utilitzar un medi actiu molt extens, aquest es tanca en una cavitat longitudinal limitada per dos espills (un amb un coeficient de transmissió molt petit, per tal que pugui sortir a l'exterior la radiació amplificada). De manera que la llum va i ve passant moltes vegades pel medi amplificador.

De totes les radiacions generades per *emissió estimulada*³⁴, la cavitat «selecciona» i tan sols permet el manteniment i amplificació d'aquelles longituds d'ona que satisfan la condició d'ona estacionària (o modes longitudinals) en la



cavitat³⁵. Aquestes, a més de tenir una longitud d'ona diferent, oscil·len amb diferències de fase aleatòries —o sense acoblament. Per a transformar una cavitat làser en un làser polsat necessitem introduir dos mòduls més: un que aconseguisca l'ancoratge, o sincronia, de les diferents ones estacionàries (Mode-Locked)[29,30], i un altre que realitze una compensació de la dispersió del pols.

Depenent de la separació dels modes³⁶, de com es realitza l'ancoratge, i del disseny dels mòduls anteriors podem aconseguir polsos de llum làser molt curts³⁷.

Amb el pas del temps l'òptica ha avantatjat l'electrònica en la capacitat d'aconseguir «polsos» o esdeveniments més breus. En l'actualitat ja no s'espera que l'electrònica (els processos de transport electrònics) pugui millorar l'òptica, pel que fa a la resolució temporal, perquè encara que la tecnologia electrònica ha anat avançant en les últimes dècades, l'òptica ho ha fet molt més ràpidament.

Aplicació dels polsos ultracurts

Micromecanitzat

S'apliquen i es volen continuar aplicant a processos de tall i micromecanitzat. Com més curta siga la duració dels polsos, per a una mateixa energia, els efectes de difusió calorífica seran menors, i els «talls» o mosses produïts en les superfícies dels materials, més nítids, i menys irregulars[31].

Biomedicina

En el cas d'emprar bisturís làser amb tecnologia de femtosegon, els efectes tèrmics no apareixerien en el teixit que envolta la zona de tall, la qual cosa comportaria una cicatrització molt més ràpida. Actualment alguns làsers ultraràpids comencen a aplicar-se en oftalmologia, concretament en operacions de cirurgia corneal[32].

Microscòpia confocal multifotó

El principal inconvenient dels microscopis convencionals és la seua incapacitat per a formar imatges nítides quan treballen amb objectes tridimensionals,

ja que estan afectades d'esborronament per captar llum de plànols diferents al d'enfocament en la mostra; especialment quan analitzem mostres biològiques.

Les bases de la microscòpia confocal van ser proposades el 1960 per Marvin L. Minsky (1927-), pare de la intel·ligència artificial i cofundador de l'Institut d'Intel·ligència Artificial del MIT. Davant les dificultats que va trobar per a cartografiar les connexions neuronals del cervell³⁸, es va adonar de la incapacitat que posseïen els microscopis convencionals per a col·lectar, únicament, llum d'un únic pla (l'objectiu d'un microscopi convencional arreplega llum procedent de diversos plans de la mostra, amb la qual cosa obtenia imatges molt difuses i amb poca definició). Minsky va proposar focalitzar la llum sobre la mostra a través del mateix objectiu, i l'ús d'un «*pinhole*» (o orifici petit), degudament ubicat, per a eliminar la llum difusa procedent d'aquells plans distints al de focalització[33].

Per a fer visibles les mostres biològiques, se solen tintar amb un fluorocrom –substància fluorescent– que emet llum quan s'il·lumina amb llum ultraviolada.

En aquest cas la microscòpia confocal –per fluorescència a un fotó– presenta tres inconvenients per a l'anàlisi de mostres biològiques.

- La fototoxicitat: es genera llum fluorescent en regions contigües a la d'observació que poden produir contaminació lumínica en la mostra (un con de llum fluorescent).
- El blanqueig del fluorocrom en les zones fora d'enfocament. Que l'inutilitza per a observacions posteriors.
- Les radiacions que generen fluorescència se situen en la regió ultraviolada, i esta posseeix poca capacitat de penetració en les mostres biològiques.

En canvi, la microscòpia multifotònica, que utilitza polsos làser ultracurts, es basa en l'excitació d'un fluorocrom per la incidència simultània de 2 (o més) fotons, depenent de la duració del pols (picosegons –dos fotons–, femtosegon –més de dos fotons–); i és interessant en diferents aspectes[34]:

- Pel fet que la mostra només s'excita en el punt on es produeix la suma de dos fotons, només hi ha excitació en el punt on es focalitza el pols de femtosegons, per això, no és necessària la presència del *pinhole*.
- L'excitació amb làser infraroig possibilita, per l'absorció de més d'un fotó, l'excitació de fluorocroms ultraviolats sense la utilització d'un làser específic per a això.
- A més el blanqueig i la fototoxicitat de la mostra es troben limitats només al pla focal.
- L'alta capacitat de penetració dels fotons de baixa freqüència (l'infraroig), possibilita l'estudi de mostres de certa grossària, la qual cosa aporta l'avantatge d'evitar realitzar talls de les mostres biològiques.

Femtoquímica

L'òptica ultraràpida s'h mostrat com una eina molt útil per a la química, ja que permetrà, en un futur no molt llunyà, tenir un control sobre les reaccions químiques. En química resulta habitual tractar de controlar (maximitzar o minimitzar) determinats productes d'una reacció química per mitjà de l'ús de variables macroscòpiques: temperatura, pressió, concentració; però en fer-ho d'aquesta manera (un mode macroscòpic), la naturalesa quàntica que governa el curs microscòpic d'una reacció química no és manipulable³⁹.

Podem utilitzar la llum procedent d'un làser per a controlar les reaccions químiques? Aquesta va ser la pregunta que es van formular alguns científics a finals dels anys 60, després de l'aparició del primer làser.

Els àtoms que constitueixen una molècula, en un model mecànic simplista, es poden considerar com unitats per ressorts que oscil·len amb una determinada freqüència, i fer que els àtoms vibren entorn d'unes posicions d'equilibri. Per això es va pensar que un làser que emetera una radiació (intensa) amb una freqüència igual a la freqüència amb què vibra un enllaç, produiria un efecte de ressonància i podria arribar a trencar el dit enllaç, i generara un producte específic; dit d'una altra manera: podríem controlar una reacció. Desgraciadament, tots els enllaços de la molècula interaccionen entre si, i els experiments van mostrar que l'energia aportada per la radiació làser a un determinat enllaç es redistribueix ràpidament entre els enllaços restants de la molècula, i calfa el sistema sense aconseguir, en la majoria dels casos, cap control. El control quàntic pareixia relegat a una quimera teòrica.

Uns trenta anys després els làsers que emeten polsos de femtosegon han fet emergir el somni del control quàntic. En una reacció química, el viatge complet dels nuclis atòmics ocorre en un interval temporal d'uns pocs centenars de femtosegons. Per això, si volem produir una pel·lícula a càmera lenta des dels reactius als productes, és necessari obtenir «instantànies» almenys a la mateixa velocitat a què es mouen els àtoms, és a dir en una escala de femtosegons.

Aquesta tècnica és la que va emprar Ahmet H. Zewail, egipci de naixement, en l'Institut Tecnològic de Pasadera (EUA), que el 1999 va obtenir el Premi Nobel de Química en 1999, i va establir així una nova «ciència»: la femtoquímica [35].

Però si és possible observar àtoms en moviment utilitzant polsos làser de femtosegons, també hauria de ser possible governar microscòpicament una reacció amb aquests polsos.

A causa de la brevetat dels polsos i a la seua intensitat, la interacció amb un enllaç molecular determinat resulta ser tan breu que no es produeixen efectes de dissipació d'energia en la resta d'enllaços de la molècula, per la qual

cosa es pot produir una acció concreta, i intencionada, sobre un enllaç determinat de la molècula sense afectar la resta.

Es tracta de la primera fita en l'establiment de com interaccionen els polsos làser òptics ultracurts amb la matèria, però de moment són necessaris molts més resultats per aconseguir el control quàntic i convertir-lo en una nova eina que permeti manipular les reaccions químiques que es produeixen en els sistemes biològics i farmacològics.

Òptica adaptativa


L'Òptica adaptativa (AO) és una tecnologia per a corregir les «aberracions» òptiques associades a un instrument o sistema òptic, amb la finalitat d'aconseguir imatges de més qualitat. Es tracta d'un dels camps fronterers de l'òptica per la seua potencialitat. En l'actualitat s'està aplicant, amb èxit, a diversos àmbits de l'òptica i la ciència. Ací em centraré en dos: l'astronomia (l'àmbit en què va sorgir) i la visió humana: les grans dimensions cosmològiques i les petites dimensions de l'home.

L'òptica adaptativa en astronomia

Des de la seua invenció, fa uns 400 anys, el telescopi ha passat de ser un petit instrument manual per a realitzar senzilles observacions visuals, a un sistema sofisticat i d'enormes dimensions, computeritzat i dotat de posicionadors i sensors de gran qualitat i precisió, imprescindible per a la recerca en astronomia i astrofísica.

Durant la seua evolució, dos paràmetres han sigut particularment rellevants en el seu disseny: la seua capacitat col·lectora de llum (que permet l'observació de cossos celests encara que siguin poc lluminosos, i la seua resolució angular (relacionada amb la capacitat per a detectar objectes petits i/o molt distants, i relacionada amb la nitidesa de les seues imatges). En el cas d'un telescopi perfecte, tots dos paràmetres augmenten quan ho fa el seu diàmetre.⁴⁰

El front d'ona procedent d'una estrella molt llunyana (a efectes pràctics en l'infinit), es pot considerar pla, i quan abasta l'espill —o objectiu— del telescopi, aquest l'hauria de convertir en una ona esfèrica perfecta que focalitzara en un punt, donant lloc, així, a la imatge de la estrella. En el cas ideal, és a dir sense la presència de cap defecte addicional, la imatge formada sols estaria limitada pel fenomen de la difracció, i coincidiria amb el disc d'Airy: el que havia de ser un punt, seria una taca de difracció extensa, però ben coneguda.⁴¹



Newton ja va posar en evidència que la resolució d'un telescopi no millorava en augmentar el seu diàmetre per damunt, d'aproximadament, una desena de centímetres, per òptims que foren el disseny i la qualitat òptica dels seus components. Va ser ell qui va atribuir aquesta limitació als moviments continus que es produïen en les capes atmosfèriques. Fins i tot va arribar a concloure que només existia una solució: ubicar els observatoris astronòmics en llocs on l'aire estiguera especialment en calma, com als deserts o als cims de les muntanyes (Newton 1652).⁴²

I és que mirar el cel des de la Terra és com mirar a l'exterior des del fons d'un estany ple d'aigua. La deformació i la pèrdua de definició que pateix la imatge observada a través de l'aigua és semblant a l'efecte que té l'atmosfera terrestre sobre la llum que ens arriba des de l'espai exterior.

L'atmosfera és un medi turbulent que afecta a la llum que es propaga com una ona d'ella a través. Les variacions de temperatura i, en menor mesura, de pressió i humitat, produeixen canvis en l'índex de refracció de l'aire. Aquests canvis fan que els rajos de llum no segueixen un camí recte sinó que es desvien i que, en conseqüència, cada un segueixca un camí òptic ben distint (uns es retarden i uns altres s'avancen) fins a arribar a l'obertura del telescopi. D'aquesta manera la turbulència atmosfèrica deforma el front d'ona i la conseqüència és evident: una degradació important de les imatges capturades pel telescopi.

En general, un telescopi (terrestre) no es comporta com un sistema òptic perfecte per tres raons:

- Les imperfeccions pròpies dels elements òptics i mecànics del telescopi.
- El límit de resolució imposat pel fenomen de la difracció.
- Les aberracions aleatòries induïdes per les pertorbacions atmosfèriques.

Les primeres es poden eliminar millorant el disseny, la qualitat i el procés de fabricació de tots els seus components (òptics i mecànics). El límit teòric de resolució difraccional és inamovible; i quant a les distorsions generades per l'atmosfera, l'inconvenient principal és que varien contínuament amb el temps. Si no fóra així, es podrien corregir amb elements òptics estàtics.⁴³

Encara en les millors ubicacions (les aconsellades per Newton), els grans telescopis terrestres observant en les longituds d'ona del rang visible (també podem considerar com a visibles les regions d'ultraviolat i infraroig pròxim) no poden, tan sols pels efectes de la turbulència atmosfèrica, aconseguir resolucions millors que la de telescopis prou més modestos: de diàmetres de 10 a 20 cm!

Vegem-ne un exemple. Els telescopis Keck (I) i (II), dos dels més grans del món, de 10 m de diàmetre cada un, situats al cim del volcà extingit Mauna Kea,

ales illes d'Hawaii, a uns 4000 m d'altura, teòricament podríem resoldre estrelles separades angularment en 0,01 segons d'arc (0,01"); però, a conseqüència de les pertorbacions de l'atmosfera, la seua resolució rares vegades supera 1 segon d'arc (1").⁴⁴

Així, que les imatges de dos estrelles separades per un angle inferior a 1" es veuran solapades, i no les podrem distingir (a pesar de treballar amb telescopis de 10 m de diàmetre). És el que succeïa amb *Gamma Perseus*, una estrella binària que subtendeix 0,2"

Per a salvar aquesta limitació en el camp de l'astronomia, s'han presentat dues solucions: la utilització de telescopis que no sofrisquen les pertorbacions atmosfèriques (el que coneixem com a telescopis espacials), i la utilització de l'Òptica adaptativa.

En efecte, la principal raó per la qual el 1990 el Telescopi Espacial Hubble (HST)⁴⁵ va ser posat en òrbita, a uns 600 km d'altura de la superfície terrestre, tenia un doble propòsit: obtenir imatges que no estigueren degradades per les turbulències atmosfèriques, i evitar l'absorció que l'atmosfera exerceix en la regió de l'ultraviolat, de manera que ja es podien examinar les estrelles («joves»).


El HST,⁴⁶ amb un espill primari de sols 2,4 m de diàmetre, és capaç d'aconseguir imatges amb més resolució que els grans telescopis instal·lats en la Terra: d'acord amb el seu diàmetre, posseeix una resolució en el rang visible (500nm), d'uns 0,05 segons d'arc (0,05"). És a dir, una resolució que resulta ser 20 vegades millor que la dels grans telescopis terrestres. [36].⁴⁷

No obstant el fet que els telescopis espacials suposen un alt cost de fabricació, així com la delicada i elevada complexitat de la seua posada en òrbita, i l'elevat cost de manteniment⁴⁸ (100 vegades més que si estiguera instal·lat en terra), no els fan sempre viables.

L'altra alternativa que queda és conèixer el comportament de l'atmosfera, mesurar el seu efecte sobre la llum que arriba de l'espai, i compensar-lo. Aquesta tècnica rep el nom d'Òptica adaptativa, i en la darrera dècada, la majoria dels descobriments importants en astrofísica han estat associats a grans telescopis terrestres que disposen d'aquest sistema de compensació; i el futur de l'observació en astronomia i astrofísica requereix d'aquesta tècnica.

Com treballa l'òptica adaptativa?

Un sistema d'AO treballa mesurant, en primer lloc, les distorsions que produeixen les turbulències atmosfèriques sobre el front d'ona de la llum que captura el telescopi. A continuació, utilitzant la dita informació, modifica el front d'ona, tornant-li la seua condició primitiva, com si no haguera travessat l'atmosfera.



Per a entendre la tasca que desenvolupa un sistema d'AO, hem de ser conscients que el front d'ona que emergeix d'una estrella llunyana arribarà a l'atmosfera, pràcticament, com un front d'ona pla. A mesura que aquest va recorrent els més de 100 km de la capa gasosa que rodeja a la Terra, pot acumular en la porció capturada per un gran telescopi, errors de fase d'unes poques micres, això suposa que (geomètricament) hi haurà parts del front d'ona que s'hauran avançat o retardat (és a dir sofreix desfasaments) de diverses longituds d'ona,⁴⁹ i el front d'ona en compte de ser una superfície plana, passa a ser una superfície ondulada molt irregular.

La mesura de les perturbacions del front d'ona que arriba al telescopi, es du a terme amb un sensor de front d'ona, que mesura, de forma molt precisa, eixes «ondulacions» introduïdes per l'atmosfera i els tramet al computador del telescopi.


Si introduïm unes ondulacions —o variacions de fase— de signe oposat serem capaços de compensar les perturbacions i reconstruir el front d'ona pla de l'estrella llunyana. Açò es realitza amb una superfície reflectora elàstica, o espill deformable, que es pot deformar molt ràpidament i de manera molt precisa gràcies a l'actuació de milers de microactuadors, de naturalesa piezo-elèctrica⁵⁰ que operen davall de la superfície especular; governats tots ells pels senyals elèctrics que envia el computador, l'espill es deforma adquirint una configuració oposada a la del front d'ona (els ixents del front d'ona incideixen en les depressions de l'espill deformable, i viceversa; reflectint finalment (en el cas que ens ocupa: el d'una estrella llunyana) un front d'ona pla.

D'aquesta manera l'ona que finalment captura el telescopi adoptarà la seua forma primitiva: com si mai no haguera travessat l'atmosfera. A més tot aquest procés (bucle de mesura-correcció) ha de realitzar-se amb una precisió aproximada d'1/50 de micró,⁵¹ i cada milisegon aproximadament.⁵²

En el cas de l'AO en astronomia, hi ha una dificultat afegida, i és que sempre necessitem que en la zona d'observació existisquen «estrelles guia»,⁵³ amb suficient lluminositat, com per a conformar l'espill deformable en cada instant perquè elimine els efectes de la perturbació atmosfèrica.

Però, la probabilitat de trobar una estrella guia en la zona d'observació sol ser molt baixa. En aquest cas la tècnica d'AO ha de valdre's d'estrelles de referència «artificials» generades per radiació d'un feix làser; tècnica coneguda com LGS (Làser Guide Star), i que consisteix a generar un punt lluminós (o traça lluminosa) emprant el raig d'un làser potent que ix en la mateixa direcció de l'eix del telescopi.

L'estrella guia més utilitzada és la de sodi, que consisteix a utilitzar un làser molt intens sintonitzat a la longitud d'ona de 589nm,⁵⁴ i focalitzar-ho en part alta de la mesosfera (a uns 90 km d'altura, molt per damunt de la zona de turbulències atmosfèriques). A causa de l'abundància de sodi en aquesta



regió, el làser origina un punt brillant, estrella artificial o «balisa» groga, que sempre se situa en el camp d'observació.

Les proves que s'estan realitzant actualment amb aquestes tècniques, han començat a donar resultats prometedors pel que es refereix a la implantació[37], la millora i la consolidació de l'AO en els futurs Grans Telescòpis⁵⁵.

Els registres recents de les imatges obtingudes pels grans telescòpis de la Terra, quan utilitzen AO, presenten una notable millora respecte a les obtingudes sense emprar AO. S'ha observat, a més, com alguna d'aquestes imatges són equiparables, o millors, en qualitat, a les obtingudes pel telescòpi espacial Hubble.

Detecció d'exoplanetes amb Òptica adaptativa


A més, l'AO en els grans telescòpis, representarà una gran ajuda en la detecció i l'observació d'objectes de lluminositat molt tènues, com és el cas de planetes pertanyents a altres sistemes solars llunyans al nostre: els exoplanetes.⁵⁵ I és que la seua brillantor resulta tan feble, respecte a l'estrella al voltant de la qual orbiten, que no són observables sense AO.

De fet, fins ara s'han detectat utilitzant tècniques indirectes com són: l'efecte Doppler que presenta l'estrella (Sol) —a la qual pertany el planeta— per trobar-se orbitant al voltant del centre de masses del sistema estrella-planeta; o bé la disminució de lluminositat de l'estrella com a conseqüència del trànsit de l'exoplaneta per davant aquesta; (encara que esta situació és molt poc freqüent, ja que han de quedar alineats la l'estrella, l'exoplaneta i la Terra).

L'AO, junt amb tècniques interferencials entre grans telescòpis connectats, possibilitarà registrar la llum d'exoplanetes i analitzar la seua composició; la qual cosa ens permetria avançar en la detecció i l'establiment d'un cens de sistemes planetaris pròxims al nostre durant la propera dècada. Açò ens permetrà aprofundir en la comprensió de la formació i l'evolució dels sistemes solars, com el nostre, i en la recerca i la localització d'alguna forma de vida en altres planetes[38]. El que era una quimera, tenir potencialitat per a cercar vida en altres llocs, diferents al nostre sistema planetari serà una realitat en les properes dècades.

Aplicació de l'òptica adaptativa a l'oftalmologia

Veurem ara com l'AO, a més d'aplicar-se per a realitzar estudis en la ciència bàsica i sobre objectes tan distants del nostre hàbitat quotidià —com ara-



les galàxies i els exoplanetes—, també es pot aplicar a un àmbit, més quotidià, relacionat amb el nostre entorn pròxim i de dimensions més humanes; em referisc a la millora i l'estudi de la visió humana (l'oftalmologia).

En efecte, l'ull humà no és, ni de bon tros, un sistema òptic perfecte, posseeix defectes en els diferents elements que el constitueixen i que són responsables d'introduir alteracions addicionals en el front d'ona de la llum que prové de l'escena observada. Els dits defectes es denominen aberracions, i la seua conseqüència és que l'ull genera imatges en la retina que no són tan nítides com podrien arribar a ser si es tractara d'un sistema òptic perfecte. Aquest esborronament o deformació en les imatges imposa el primer límit físic a la visió (prou més important que el límit teòric de la difracció, governat pel diàmetre de la pupil·la).

El multidisciplinari Helmholtz, un dels grans personatges de la ciència del segle XIX⁵⁶ i investigador de la visió humana, va arribar a la conclusió que l'ull, respecte a altres sistemes òptics artificials, era d'una qualitat pèssima. A ell s'atribueix la cèlebre frase[39]:

si un fabricant d'instruments tractara de vendre'm un aparell d'òptica amb una qualitat tan roïna com la de l'ull, el rebutjaria directament i el reprendria per la seua poca cura (Helmholtz, 1881)

Els defectes de desenfocament i d'astigmatisme, denominats aberracions de baix ordre (que seria un equivalent d'aberracions elementals), són molt coneguts i es corregeixen de manera rutinària en la pràctica clínica. La correcció del desenfocament, causant de la miopia, la hipermetropia i la presbícia (aquesta última fonamentalment associada amb l'edat) es realitza des del segle XIII, mentre que l'astigmatisme va ser corregit, per primera vegada, a principis del segle XIX per Thomas Young (1801), científic anglès que ja hem mencionat, pel seu famós experiment que demostrava la interferència de la llum. L'existència d'altres aberracions d'alt ordre en l'ull, distintes del desenfocament i de l'astigmatisme, van ser ben conegudes a partir de la segona meitat del segle XIX.

A pesar que els científics eren totalment conscients de la presència d'aquestes aberracions en l'ull, potser per no tractar-se d'un camp de ciència bàsica, i estar a cavall entre la física (òptica) i la medicina, el tema no va despertar excessiva atenció, i es va quedar en alguns pocs laboratoris d'investigació durant la major part del segle XX[40].

No obstant això, recentment, i fonamentalment em referisc a la darrera dècada, aquesta situació ha canviat de manera espectacular. En aconseguir posar a punt nous mètodes, més precisos i còmodes, per a mesurar les aberra-

cions de l'ull, diversos laboratoris d'investigació han demostrat el potencial de l'Òptica adaptativa en la correcció de les aberracions de l'ull.

Si som capaços de mesurar les aberracions oculars, resultarà possible corregir-les col·locant un corrector de front d'ona davant l'ull, de manera que introduïska justament les aberracions contràries. En un cas ideal, el sistema «Òptica adaptativa + ull»⁵⁸ es veuria lliure de manera permanent d'aberracions, i arrivaria a produir imatges «perfectes» en la retina. Aquestes tècniques s'han començat a aplicar en l'ull emprant com a sistemes correctors tant espills deformables, com en astronomia[41] –correcció per reflexió–, com moduladors espacials de la llum de cristall líquid[42] –correcció per transmissió.


Conseqüència de tot això és que els conceptes d'aberracions òptiques estan passant de ser una cosa exclusiva dels laboratoris d'investigació a estar presents en molts aspectes aplicats i clínics, i són idees ja familiars en Oftalmologia.

Així, la realització de cirurgia refractiva per foto-ablació corneal (LASIK: Láser in situ Keratomileúsis), dissenyada a partir de mesures d'aberració oculars prèvies permetrà millorar els resultats obtinguts. D'igual manera succeirà amb la cirurgia d'implantació de lents intraoculars (LIO) que podria realitzar-se amb lents personalitzades a les aberracions oculars que presenta el pacient.

Cap a les ulleres o sistemes de visió intel·ligents

D'altra banda, en el cas del seu ús en visió, en temps real, aquests dispositius són l'equivalent a unes ulleres optoelectròniques d'Òptica Adaptativa[43]. Aquesta és la manera més adequada de realitzar una correcció de les aberracions oculars, però de moment requereix instrumentació molt costosa i només pot utilitzar-se en molt pocs laboratoris en el món.

Tot i que l'aplicació comercial de l'AO, en tota la seua potencialitat, encara està per implantar-se i estendre's, ja han començat a desenvolupar-se alguns prototips senzills. Així, l'any 2001, un equip d'investigadors de la Universitat d'Arizona dirigit per N. Peyghambarian,⁵⁹ en col·laboració amb investigadors de l'Institut Tecnològic de Geòrgia, i amb la indústria privada, va iniciar el desenvolupament d'unes noves lents de cristall líquid, planes i commutables que poden canviar el seu enfocament de manera adaptativa. Es tracta d'un petit però important pas, per a aquells usuaris afectats de presbícia, que precisen lents bifocals. S'obre d'aquesta manera el camí cap al que s'ha anomenat les «ulleres intel·ligents». De moment el prototip desenvolupat sols commuta les lents a *on* i *off* per a canviar d'enfocament gràcies a un microxip; però l'ob-



jectiu que es persegueix és que el sistema actue com ho fa una càmera fotogràfica amb autoenfocament: les lents sabran on enfocar. Però es pretén anar encara més enllà: desenvolupar ulleres que corregiran de manera automàtica, i en cada instant, les aberracions que afecten els dos ulls, de manera que s'aconsegueixi una visió òptima[44].

Es podrien programar les nostres ulleres per a una visió fins i tot millor que la d'un observador normal; és a dir, superar la seua agudesa visual (l'angle més petit que ha de subtendir un detall perquè puguem veure'l), però ens trobaríem amb el problema que la nostra retina té un cert límit per trobar-se *pixelada* pel mosaic de fotoreceptor.⁶¹


En una direcció semblant a la del grup d'Arizona, encara que en un aspecte complementari, un equip d'investigadors de la Universitat de Santiago de Compostel·la, de l'Applied Optics Institute de Varsòvia i el Grup de Recerca d'Òptica de l'UJI, al què pertany, hem desenvolupat un sistema d'òptica adaptativa, basat en pantalles de cristall líquid comercials tipus TNLCD (Twisted Nematic Liquid Cristal Display), semblants a les que s'utilitzen en els video-projectors, la qual cosa abarateix en gran manera els costos del dispositiu d'Òptica adaptativa (almenys si es compara amb els sistemes d'AO basats en espills deformables continus).

La característica singular del nou sistema d'AO, consisteix que es tracta d'una tecnologia capaç de mesurar i compensar les aberracions d'un front d'ona, en general, i de les aberracions oculars, en particular,⁶² i que s'utilitza com a únic element optoelectrònic la pantalla LCD, per a mesurar i corregir no sols les aberracions de primer ordre (miopia, hipermetropia...) sinó també les petites aberracions (conegudes com a aberracions d'ordre superior)[45].

Aquest nou sistema, a diferència del presentat anteriorment, no precisaria emmagatzemar amb antelació les dades dels defectes visuals de l'observador en el microxip, sinó que per tractar-se d'un sistema d'AO, en el nostre cas el microxip registraria, en cada moment, l'estat aberrat del sistema visual de l'observador i, per mitjà d'un senyal elèctric, configuraria la pantalla de cristall líquid per a obtenir la millor compensació de les aberracions i, per tant una visió òptima –i això pràcticament en temps real.

Finalment cal assenyalar que una altra de les grans expectatives dipositades en l'aplicació d'aquest sistema a la compensació de les aberracions oculars és la de millorar la inspecció física del fons ocular, la qual cosa posseeix un elevat interès des del punt de vista clínic.

Com a conclusió, podem dir que aquesta nova tecnologia per a la mesura i la correcció de les aberracions oculars, ha permès avançar molt, en els darrers anys, en el coneixement dels mecanismes de formació d'imatges de l'ull en la retina i en el de processos biològics com l'acomodació i la presbícia, l'en-



velliment del sistema ocular i el desenvolupament de la miopia. L'AO està tenint gran repercussió en la pràctica clínica de l'oftalmologia i l'optometria pel seu caràcter no invasiu. A més, l'AO resulta de gran utilitat per a avaluar (i corregir) els resultats de la cirurgia de cataractes amb implant de lents, o en la diagnosi de patologies oculars. Aquesta correcció d'aberracions mitjançant l'AO, obre la possibilitat no sols d'una millora de la qualitat visual, també la millora de la resolució i el contrast de les imatges del fons ocular. Així, la previsible visualització de l'estructures retinianes de *in vivo*, fins ara aconseguides sols en mostres histològiques, permetrà avançar en el diagnòstic precoç de certes patologies i en una millor monitorització de possibles teràpies[46]; al remat: *l'ull veurà molt millor, i veurem millor l'ull.*

En tots dos casos que he exposat, l'AO ens ajuda a millorar la visió a través de les finestres que utilitzem per a escrutar l'univers i el món que ens envolta: les grans finestres dels telescopis, i les petites finestres dels nostres ulls. Si som capaços de veure millor els fenòmens que es desenvolupen al nostre voltant, de segur que tindrem més facilitat per a entendre les lleis que els governen; el que serà un guany per a la física en particular i per la Ciència en general.

I amb açò done per conclosa aquesta lliçó d'inici de curs, confiant que la velocitat de vertigen a la que hem viatjat per l'Òptica, no us haja incomodat. Espere que, encara que el paisatge de l'òptica haja travessat ràpidament per davant dels vostres ulls, algunes de les seues imatges hagen quedat gravades en la vostra consciència, i hagen respost a allò que us heu preguntat alguna vegada, o... el que és encara més interessant, que hagen servit per a despetar la vostra curiositat, i us hagen fet plantejar-vos noves qüestions.

Moltes gràcies per la vostra atenció.

Castelló de la Plana, a 21 de setembre de 2007

Referències

- [1] R.P. Crease, «The most beautiful experiment», *Physics World* **15**(9), 19 (2002).
- [2] M.L. Lozano, «De Arquímedes a Einstein. Los diez experimentos más bellos de la física», DeBolsillo (Random House Mondadori, S.A.), Barcelona (2003).
- [3] I. Newton «Optics», Dover Publications, New York (1952). També existeix la traducció de C. Solis: I. Newton, «Óptica», Ed. Alfaguara, S.A., Madrid (1977).
- [4] T. Young, *Phil. Trans. Roy. Soc.* **12**, 387, London (1802).
- [5] C. Jönson, «Electron diffraction at multiple slits». *Am. J. Phys.* **42**, 4 (1974) versió anglesa de l'article: C. Jönsson, *Zeit. Physik* **161**, 454 (1961).
- [6] E. Hecht, «Óptica», Addysson Wesley Iberoamericana, Madrid (2000).
- [7] V. Ronchi, «The nature of light», Heinemann, London (1970).
- [8] M. H. Shanon (ed.), «Great experiments in Physics», Dover, New York (1987).
- [9] B. Vohnsen, «A short history of optics», *Physica Scripta* **T109**, 75 (2004).
- [10] M. Born and E. Wolf, «Principles of Optics», Pergamon Press, Oxford (1989).
- [11] A. Zajonc, «Catching the light: the Entwined history of light and mind», Oxford University Press, Oxford (1995).
- [12] D. Park, «The fire within the eye», Princenton University Press (1999).
- [13] R. Descartes, «Dioptrique. Météores», Leyden (1637).
- [14] F. M. Grimaldi, «Physico-Mathesis de lumine, coloribus, e iride», Bolonia (1665).
- [15] C. Huyguens, «Traité de la lumière», Leyden (1690).
- [16] H. Crew (ed.), «The wave theory of lighth, memoirs by Huyguens, Young and Fresnel», American Book Company, New York (1900).
- [17] J. C. Maxwell, «A treatise on electricity and magnetisme», Dover, New York (1954).
- [18] L. Lederman, «La partícula divina», Crítica, Barcelona (1996).
- [19] S. Weinberg, «El sueño de una teoría final», Crítica, Barcelona (2004).
- [20] G. N. Lewis, «The conservation of photons», *Nature* **118**, 874 (1926).
- [21] D. Gabor, «A new microscopic principle», *Nature* **161**, 777 (1948).
- [22] P. Gordon, «The MASER», *Sci. Am.* **199**, 42 (1958).
- [23] A. L. Schawlow and C. H. Townes, «Infrared and optical masers», *Phys. Rev.* **112**, 1940 (1958).
- [24] T. H. Maiman, «Stimulated optical radiation in ruby», *Nature* **187**, 493 (1960).
- [25] L. Roso, «Dispositivos fotónicos», *Revista Española de Física* **17**(1), 51 (2003).
- [26] <http://www.physics.gatech.edu/frog>

- [27] E. Muybridge, «Muybridge's Complete Human and Animal Locomotion» Vol. III, (1887).
- [28] <http://docedgertonvideo.techtv.mit.edu/>
- [29] M. Didomenico, «Small-signal analysis of internal (coupling type) modulation of lasers», *J. Appl. Phys. Lett.* **35**, 2870 (1964).
- [30] L. Hargrove et al., «Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation», *Appl. Phys. Lett. A*, **5**, 4 (1964).
- [31] S. Nolte, «Micromachining» in *Ultrafast optics: technology and applications*, Marcel and Dekker, (2003).
- [32] T. Juhasz et al., «The femtosecond blade: new developments in corneal surgery», *Optics and Photonics New. Optics & Photonics News*, Jan, 24 (2002).
- [33] J. W. Lichtman, «Microscopía confocal», *Investigación y Ciencia. Temas* **29**, 32 (2002).
- [34] W. R. Zipfel, «Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences», *Nature Biotechnology*. **21**, 1369 (2003).
- [35] A. H. Zewail, «Femtochemistry», *Journal of Physical Chemistry*. **97**, 12427 (1993).
- [36] S. Arribas, «El telescopio espacial Hubble y su sucesor», *Revista Española de Física*. **17**(4), 17 (2003).
- [37] L. A. Thomson, «Adaptive optics in astronomy», *Physics Today* **47**, 24 (1994).
- [38] R. Rebolo, «Exoplanetas», *Revista Española de Física*. **17**(4), 29 (2003).
- [39] von Helmholtz. Popular scientific lecturers (1881).
- [40] P. Artal, «Hacia las fronteras de la óptica visual: soluciones para ver mejor», Discurso de ingreso como académico numerario a la Real academia de las Ciencias de la Región de Murcia, Murcia (2003).
- [41] J. Liang, D. R. Willians and D. T. Milleer, «Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics», *J. Opt. Soc. Am. A*, **14**, 2884 (1997).
- [42] F. Vargas-Martin, P. Prieto and P. Artal, «Correction of the aberrations in the human eye with liquid crystal spatial light modulators: limits and performance», *J. Opt. Soc. Am. A*, **15**, 2552 (1998).
- [43] E. J. Fernández, I. Iglesias and P. Artal, «Closed-loop adaptive optics in the human eye», *Opt. Lett.* **26**, 746 (2001).
- [44] T. Feder, «Goodbye, bifocals», *Physics Today* **59**(8), 27 (2006).
- [45] V. Durán, V. Climent, E. Tajahuerce, Z. Jaroszewicz, J. Arines and S. Bará, «Efficient compensation of Zernike modes and eye aberration patterns using low-cost spatial light modulators», *J. Biomed. Opt.* **12** 014037 (2007).
- [46] S. Marcos, «Calidad óptica del ojo», *Investigación y Ciencia*, junio, 66 (2005).

Notes

1. Després dels incendis d'aquest estiu de 2007, també el foc hauria d'haver anat a escola.

2. El 23 d'octubre de 2002.

3. Si considerem la necessitat de la llum solar i la importància que en la seua elaboració posseeixen les ombres geomètriques, l'experiment d'Eratòstenes es podria entendre, en certa mesura, vinculat a l'òptica.

4. En honor a la veritat, cal dir que durant molt de temps aquest va ser un «*gedankenexperiment*» –un experiment mental– que Feynman es va dedicar a interpretar de manera exhaustiva, però no es va realitzar fins molt de temps després, el 1961, per Claus Jönsson a Tubingen.

5. L'altra va ser la teoria de la relativitat general d'Einstein.

6. Hero d'Alexandria i Ptolemeu sostenien aquesta hipòtesi.

7. Es va produir un parèntesi d'aproximadament vuit segles a Occident, en els que l'òptica va quedar sumida, diguem-ne, en la més absoluta «fosc».

8. D'origen iraqüà, Al-Haitham (965-1039), va ser conegut en el món occidental com Alhazen.

9. Va introduir termes que empram encara avui per a identificar parts de l'ull: retina, còrnia, humor aquós...

10. A les darreries del segle XIII, es té coneixement de la fabricació de lents de vidre, per part d'artesans del nord d'Itàlia (en aquesta zona estava molt desenvolupada la tecnologia del poliment dels vidres), les quals eren utilitzades com a ulleres de llarga vista, per a corregir la pèrdua de visió deguda a la presbícia (la pèrdua del poder d'acomodació del cristal·lí, com a conseqüència de l'edat).

11. El que li va costar, a pesar de la renúncia pública de les seues idees, el càstig de la Santa Inquisició. Es comenta que tot just abjurar-ne, va murmurar, quasi de manera imperceptible, allò de «*eppur si muove*» (i no obstant això, es mou). 350 anys ha tardat l'Església Catòlica a reconèixer, davall el papat de Joan Pau II, l'errada per haver-lo comenat.

12. També és cert que en va vendre un altre al senat de Venècia ja que era una eina molt útil en les batalles navals per a veure abans les naus enemigues en l'horitzó: transferència de tecnologia!

13. Aquest resultat seria de gran importància en molts sistemes òptics dissenyats posteriorment i, especialment, en el desenvolupament del que havien de ser els elements de comunicació òptica per excel·lència: les fibres òptiques.

14. Curiosament Newton va néixer el mateix any en què va morir Galileu.

15. Fonamentalment per dos motius, perquè, evidentment, s'eliminen les aberracions cromàtiques, i perquè quan es requereix un telescopi amb un diàmetre considerable, resulta molt difícil aconseguir un objectiu (lent) de vidre que no presente inhomogeneïtats que devaluen la seua qualitat (per no parlar del cost de polir de la lent, del seu pes...).

16. Al fenomen de dependència de l'índex de refracció amb la longitud d'ona se'l coneix amb el nom de dispersió.

17. El motiu principal de Newton per a rebutjar la teoria ondulatòria, tal com s'entenia llavors, era el descoratjador problema d'explicar la propagació rectilínia de la llum; ja que les ones es propaguen en totes les direccions.

18. Les bandes resulten acolorides si la font de llum és blanca (o policromàtica); al contrari, el patró de franges passa a ser monocromàtic (bandes brillants i fosques) si la font és monocromàtica o quasimonocromàtica).

19. A pesar d'açò, ambdues teories explicaven la llei de la refracció.

20. Avui se sap que aquests receptors són els tres tipus de cons S, M i L, que junt amb els bastons constitueixen els quatre tipus de receptors, sensibles a la radiació visible, que conformen la retina.

21. El patró d'interferències que va obtenir li va permetre estimar la longitud d'ona de la llum, i va obtenir, en el cas de la llum roja, una longitud d'ona de $\sim 0,71$ micròmetres, i en el cas de la llum blava $\sim 0,42$ micròmetres. Es considera que el rang visible va dels 0,40 als 0,70 micròmetres.

22. No obstant això, finalment va ser ell qui va proposar a Fresnel que considerara el moviment ondulatori transversal.

23. Resulta curiós recordar una anècdota que es va produir respecte d'açò. Aleshores l'Acadèmia de les Ciències Francesa, havia convocat un concurs sobre treballs que ajudaren a dilucidar la naturalesa de la llum. Fresnel va remetre el seu treball a la mencionada competició, va guanyar el concurs, i va posar punt i final a la descripció corpuscular de la llum. Una anècdota curiosa, respecte al citat esdeveniment, va ser que Poisson, que formava part del comitè d'avaluació, com a bon membre del comitè, va estudiar a fons la teoria proposada per Fresnel, i va arribar a la conclusió que si el model de Fresnel era cert, llavors quan un feix il·luminara un disc pla opac, a una certa distància d'ell, en el centre del que havia de ser la seua ombra geomètrica, hauria d'aparèixer un punt brillant; per la qual cosa va considerar que el model de Fresnel era erroni. Quan posteriorment es va realitzar l'experiència, un punt petit però brillant va aparèixer en el centre de l'ombra geomètrica, la qual cosa va permetre consolidar la naturalesa ondulatòria de la llum i el nou model de Fresnel que la sostenia. Curiosament, en l'actualitat el dit fenomen esconeix amb el nom de *spot de Poisson*, en honor de qui per primera vegada va parlar-ne, encara que amb completa incredulitat.

24. Junt amb Arago, va realitzar experiències en què després de fer incidir un feix de llum sobre un vidre de calcita (que a causa de la seua anisotropia presentava el fenomen de la birefringència), feia interferir els dos feixos que emergien d'aquest (el feix ordinari i l'extraordinari), sense trobar interferències, per la qual cosa va concloure que ambdues ones presentaven una polarització de caràcter transversal i, a més, una respecte a l'altra es trobaven polaritzades ortogonalment.

25. Lederman assenyalava, amb sorna, que els estudiants de física haurien hagut de fer pesos per a portar samarretes tres vegades extrallargues on caberen les llargues i complicades equacions matemàtiques de Maxwell.

26. Pareix que Michelson es referia ací a l'influent físic escocès William Thompson; també conegut com a Lord Kelvin.

27. En defensa de Michelson, cal dir que era un excel·lent físic/òptic experimental, dedicat a la mesura de les coses petites (fraccions de la longitud d'ona de la llum; és

a dir, de l'ordre del micró o fraccions de micró —curiosament una milionèsima de metre, o el que és el mateix: la sisena xifra decimal!), i que la lectura de les seues últimes paraules podia entendre's com una premonició: que els futurs canvis en la física caldria trobar-los en el més petit) i, en una part rellevant —la mecànica quàntica—, així va succeir.

28. Un cos absorbent perfecte que, en ocasions, es representa com una cavitat amb un petit orifici, les parets del qual posseeixen una gran absorció de manera que qual-sevol radiació que penetra per l'orifici finalment s'absorbeix

29. I com que no ho va aconseguir, el van titllar de «catàstrofe ultravioleta»; simplement perquè el model que havien proposat Rayleigh i Jean, només s'ajustava a les grans longituds d'ona, però no a les longituds d'ona més petites (i.e., les corresponents a l'espectre UV).

30. Un comentari al marge[18]: El 1990, el Satèl·lit Explorador de Fons Còsmic (COBE) va registrar i va transmetre als astrofísics informació sobre la distribució espectral de la radiació còsmica de fons que impregna l'espai sencer. Les dades, d'una precisió sense precedents, concordaven de manera exacta amb l'expressió obtinguda per Planck, per a la radiació del cos negre. La corba de la distribució de la intensitat de la llum permet definir la temperatura del cos que emet la radiació. Amb les dades del satèl·lit COBE i de l'equació de Planck, els astrofísics van poder calcular la temperatura mitjana de l'univers. Fa molt de fred ací fora: 2,73 graus sobre el zero absolut; o el que és el mateix, uns -270°C (l a la Terra amb problemes d'escalfament terrestre!).

31. Actualment estimada en 13.700 milions d'anys des del Big Bang, segons dades registrades pels satèl·lits COBE i WMAP, pertanyents a la NASA, i dedicats a captar la radiació de fons de l'univers.

32. Açò es mostrava en la segona fotografia de la sèrie «Annie G. galopant» en E. Muybridge, «Complete Human and Animal Locomotion», làmina 626 (1887).

33. Potència = Energia/temps.

34. Pel fet que tots els nivells espectrals posseeixen una amplitud, i aleshores les transicions d'un nivell a un altre generen radiacions amb freqüències lleugerament diferents.

35. Que la longitud d'ona de la cavitat siga igual a un nombre sencer, de vegades la longitud d'ona de la radiació: $L = n\lambda$.

36. Que depèn, entre altres coses, del medi actiu i de la cavitat.

37. Amb un làser de He-Ne amb una amplitud de banda entre modes d'1,5GHz, es poden obtenir polsos d'uns 300 picosegons de duració, mentre que amb un làser de Tu:Za, aquesta duració pot ser de tan sols 3,4 femtosegons.

38. Minsky pretenia registrar totes les connexions neuronals del cervell per a, així, avançar en la comprensió del seu funcionament i, especialment, en reproduir un simulador neuronal en l'àmbit de la intel·ligència artificial.

39. L. Basiares i L. González, «Química bajo control», *El País* 07-01-2004.

40. Basta recordar l'inici de la tecnologia ultraràpida.

41. Diàmetre de l'objectiu, en el cas d'un telescopi refractor; o diàmetre de l'espill, en el cas d'un telescopi reflector.

42. Hi ha una raó filosòfica inherent al límit que imposa la difracció: Com recons-

truir un llibre a partir d'una sola pàgina, o de dues pàgines, o un nombre limitat de pàgines? Per a reconstruir el llibre (tota la informació) fan falta totes les seues pàgines. D'igual manera, podem pensar que una font puntual —estrella— no es pot reconstruir totalment a partir d'un tros del seu front d'ones esfèric, és a dir, utilitzant tan sols una fracció de la informació que l'estrella està emetent en un instant donat.

43. «Si a la llarga la teoria dels telescopis es poguera portar plenament a la pràctica, quedarien, no obstant això, uns límits que els telescopis no podrien sobrepassar, ja que l'aire a través del qual mirem les estrelles tremola perennement com pot veure's pel moviment tremolós de les ombres projectades per torres elevades i per la titil·lació de les estrelles fixes».

44. De manera semblant a com es corregeixen les aberracions oculars amb vidres.

45. Una resolució duess ordres de magnitud inferior de la teòrica.

46. Inicialment concebut en els anys 40, dissenyat i construït en les dècades dels 70 i 80, i situat en òrbita per la tripulació del transbordador espacial Discovery a l'abril de 1990, deu el seu nom al gran astrofísic E. Hubble, descobridor del corriment al roig en l'espectre de les estrelles, i que va resultar ser la primera verificació experimental de l'expansió de l'univers. D'acord amb la planificació actual, estarà operatiu fins al 2010, un any abans del llançament del seu successor, el James Webb Space Telescope (JWST), també conegut com a Next Generation Space Telescope (NGST), que amb un espill de 6 m de diàmetre, i optimitzat per a l'infraroig pròxim, permetrà estudiar l'univers llunyà (primitiu) fins a l'època de la primera llum.

47. És un telescopi de reflexió aplanàtic, tipus Cassegrain, amb espills hiperbòlics, de 2,4 m de diàmetre.

48. El HST pot «vore» en el rang que va des de les 2,5 microns, en l'infraroig, fins a els 115 nanòmetres de l'ultraviolat; la qual cosa complementa les observacions realitzades des dels grans telescopis terrestres que poden proporcionar imatges limitades per la difracció, però això només succeeix per a longituds d'ona superiors a les 10 micres.

49. A base de l'enviament de missions espacials. A més l'equipament queda obsolet als pocs anys de la posada en marxa, i no sempre resulta senzilla la seua reparació i actualització.

50. Encara que puguen parèixer longituds molt petites, en òptica són molt importants.

51. Mitjançant l'aplicació d'un voltatge petit exerceix una variació de longitud.

52. És a dir $1/25$ de longitud d'ona.

53. Atès que les condicions atmosfèriques es modifiquen cada milisegon.

54. Ens referim a una estrella fixa, pertanyent al fons d'estrelles: puntuals i considerades a una distància pràcticament infinita.

55. Longitud d'ona corresponent al doblet visible, i intens, de l'espectre del sodi.

56. Entre els quals convé assenyalar el recent inaugurat GranTeCan (Gran telescopi de Canàries), de més de 11 m de diàmetre, per al quals va ampliar el seu pressupost en 1600 milions d'euros, amb la finalitat d'incorporar-li un sistema d'AO que en la millorava la seua capacitat.

57. Perceptible, especialment, quan l'exoplaneta posseeix una masa considerable; en cas contrari, el centre de masses es toba tan pròxim a l'estrella, que aquesta a penes presenta moviment de revolució.



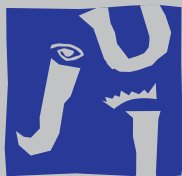
58. De qui s'afirma que era un excel·lent fisiòleg, i que va estudiar física per a entendre amb més profunditat els processos fisiològics relacionats amb la percepció acústica i visual, i que per a sorpresa de tots va ser, encara, millor físic que fisiòleg; però que posteriorment va necessitar estudiar matemàtiques per a arribar a un coneixement més profund de la física, i llavors per a gran admiració de tots, va ser, encara, millor matemàtic que físic.

59. Sempre existeix el límit de la difracció.

60. Expert en fotònica, sistemes làser i ciència dels materials —torna la interdisciplinarietat.

61. Aconseguir una agudesa visual excessiva, en el cas, de l'ull potser no condueix al que s'anomena «supervisió», ja que si els detalls són inferiors a la grandària dels fotoreceptors de la retina (cons i bastons), apareixen efectes no desitjats com ara el «alliasing».

62. Tant des del punt de vista de l'observador (perquè les imatges que es formen en la seua retina siguin de més qualitat); com des del punt de vista clínic de la inspecció ocular (per a tenir tindre unes imatges nítides del fons ocular, no distorsionades pels múltiples defectes de l'ull).



UNIVERSITAT
JAUME·I

VICENT CLIMENT JORDÀ

Un breu recorregut per l'Òptica

*(Viatge, a la velocitat de la llum, des dels seus inicis
fins a les fronteres actuals)*

**Lliçó inaugural
del curs 2007/08**

Castelló de la Plana, 21 de setembre de 2007

Producció del Servei de Comunicació i Publicacions
Campus del Riu Sec. Rectorat i serveis centrals
12071 Castelló de la Plana
Tel. 964 72 88 19. Fax 964 72 88 32
<http://www.uji.es/publ> · publicacions@uji.es

Dipòsit legal: CS 22-2007



*Benvolgut Adso –va dir el mestre–, durant tot el viatge
he estat ensenyant-te a reconèixer les empentes per les
quals el món ens parla com per mitjà d'un gran llibre
Umberto Eco (El nom de la rosa)*

A manera d'introducció (o... per on començar?)

Fa diverses setmanes em van requerir per telèfon el títol de la lliçó inaugural. Com que no en disposava, encara acordarem un termini, que a mi em va semblar excessivament curt, i al meu interlocutor molt llarg (mai plou a gust de tots i més en aquest país, en el qual –com canta Raimon– la pluja hauria d'anar a escola¹).

En penjar el telèfon, pensant en la lliçó, vaig reflexionar que m'hauria agradat poder emular Fray Luis de León, amb allò de «com dèiem ahir...»; obviant, d'aquesta manera, el que ja ha passat un any des de la darrera lliçó d'obertura de curs, i poder donar un sentit de continuïtat a aquella lliçó i a aquesta. Vaig recordar, llavors, que havia versat sobre estètica i disseny; la qual cosa m'obligaria a començar la meua dissertació comentant aspectes sobre els quals no tinc excessives nocions; i em veuria obligat a escollir (i projectar) imatges d'algunes icones o mites estètics reconeguts i acceptats per tots; com per exemple, el de Norma Jeane; o a comentar, partint d'alguna fotografia antiga, certs aspectes tecnològics relacionats amb el funcionament i el disseny d'alguns artefactes, per exemple, d'enginyeria hidràulica que trobem disseminats per sèquies de l'horta i la marjal, ja abandonats i quasi migsoterrats, i que fa anys que han deixat de ser útils.

Ambdós exemples –«vius», ja sols, en les nostres memòries– eren imatges que havien sigut enregistrades per un sistema dissenyat per a captar la llum. Va ser aleshores quan en van venir a la memòria molts altres sistemes i tècniques òptiques que ens permeten escodrinyar la realitat, no sols per a poder gaudir-nesinó per a poder penetrar en el coneixement i la comprensió d'aquesta, i donar satisfacció a la curiositat humana. També em vaig adonar que, parafraçant el cantant i poeta cubà Silvio Rodríguez, «li devia una lliçó a l'Òptica», pel paper que ha jugat, que juga, i que jugarà en el desenvolupament de la ciència en general, i en el de la física en particular. Per això aquesta lliçó inaugural duu per títol:

Un breu recorregut per l'Òptica

(Viatge, a la velocitat de la llum, des dels seus inicis
fins a les fronteres actuals)


En aquest recorregut pretenc mostrar, i comentar, alguns fets i fites de l'òptica que han sigut rellevants per la repercussió i l'aportació dins de la física, per a, després de recórrer-los a una velocitat vertiginosa, guaitar —com xiquets curiosos que apeguen els nassos a la gran peixera de l'univers— algunes de les fronteres que actualment té l'Òptica.

Sobre la importància de l'Òptica o els «10 Most Beautiful Physics Experiments»

La importància, o el pes, que l'Òptica ha tingut en la física, es pot veure, a manera d'exemple, en el següent fet. Robert P. Crease, expert en història de la ciència i vinculat al Departament de Filosofia de la Universitat de l'estat de Nova York, va realitzar al maig de 2002 una enquesta sobre quin havia sigut, segons el parer de la comunitat científica de físics, l'experiment «més bonic» de la física. La consulta es dugué a terme a través de la coneguda revista *Physics World*, de gran difusió als Estats Units de Nord Amèrica, i els resultats es varen publicar en el número de setembre[1]. L'enquesta també va tenir ressò en *The New York Times* i, per efecte dòmino, en infinitat de periòdics internacionals (en particular, a Espanya es van donar a conèixer a l'octubre de 2002 al diari *El País*)[2].

La classificació dels 10 experiments més votats pel col·lectiu de físics, ordenats de major pel nombre de vots aconseguits, era la següent:

- 1) La difracció d'electrons per una doble esclatxa (Claus Jönsson –1961–)
- 2) L'experiment de la caiguda lliure de cossos (Galileu Galilei –1600–)
- 3) La determinació de la càrrega de l'electró amb gotes d'oli (Robert Millikan –1909–)
- 4) La descomposició de la llum solar per un prisma (Isaac Newton –1665–)
- 5) L'experiment de la interferència de la llum (Thomas Young –1801–)
- 6) La mesura de la força gravitatòria amb una balança de torsió (Henry Cavendish –1798–)
- 7) La mesura de la circumferència terrestre (Eratòstenes –segle III–)
- 8) La caiguda de cossos per un pla inclinat (Galileu Galilei –segle XVII–)
- 9) El descobriment del nucli atòmic (Ernest Rutherford –1911–)
- 10) L'experiència del pèndol de Foucault (Jean Foucault –1851–)



Resulta significatiu que, en el *Top ten* dels experiments de la física, hagueren sigut seleccionats dos experiments i mig d'òptica³.

En quart lloc apareix la famosa experiència sobre la descomposició espectral de la llum blanca del Sol, amb un prisma de vidre[3], que va dur a terme el tan admirat (com igualment temut) Isaac Newton, considerat el físic més gran de tots els temps.

En la cinquena posició trobem l'experiment de la doble esclatxa, de Thomas Young[4], sobre la interferència de la llum que posava de manifest la seua naturalesa ondulatoria. A més, aquest experiment va ser el que, posteriorment, va donar lloc a la versió del considerat el «més bell» experiment de física (d'aquí que el considere com mig a mig experiment d'òptica): l'experiment de la interferència d'electrons en passar a través d'una doble esclatxa⁴ [5]; que ara servia, curiosament, per a posar de manifest el comportament ondulatori però, en aquest cas, no de la llum, sinó de partícules elementals, com els electrons; es consolida d'aquesta manera la mecànica quàntica, una de les dues teories més rellevants de la física formulades en el segle XX⁵.

A pesar de l'origen de l'enquesta, entre els autors del *Top-ten* només apareix un nord-americà (Millikan); la resta són tres anglesos (Newton, Young i Cavendish), un francès (Foucault), un grec (Eratóstenes), un alemany (Jönsson) i dos italians; bé, un –Galileu– que valia per dos.


L'enquesta, doncs, no va ser sectària ni xovinista; i que en ella aparegueren dos experiments i mig d'òptica, és a dir una quarta part del total, posa de manifest –de forma prou evident– la importància que ha tingut l'òptica en el desenvolupament de la física.

Una breu passejada

Per aquest motiu, intentaré fer ara un breu recorregut per l'Òptica abordant el que han sigut les «pedres angulars» més importants en el seu desenvolupament, així com en la recerca simultània de la naturalesa de la llum[6-10].

El primer període

No es coneixen amb molta precisió les nocions que es tenien d'òptica en l'antiguitat, encara que s'han trobat alguns elements òptics en excavacions arqueològiques. Així, es té constància del descobriment d'un espill, en la piràmide de Sesostri II (1900 ac) a la vall del Nil, que probablement era utilitzat per a desviar els rajos del Sol. En qualsevol cas, les primeres no-



cions que sobre la llum tenien les cultures primitives eren de naturalesa religiosa[11].

Van haver de ser els filòsofs i els matemàtics grecs, els que es qüestionaren i intentaren explicar quina era la naturalesa de la llum que, evidentment, van vincular estretament amb el fenomen de la visió.

El geòmetra Euclides d'Alexandria (300 aC) va ser el primer a establir un nombre d'idees importants sobre la llum, que encara avui, d'una manera més elaborada, persisteixen; com ara la propagació rectilínia dels rajos de llum i la llei de la reflexió. I també va ser el primer que les va compendiar per escrit en el seu tractat de «Catoptrica» .


Si combinem els principis establerts per Euclides, amb els d'Hero d'Alexandria (100 dC), que va establir que els rajos de llum recorren el camí més curt, i amb la llei de la refracció estudiada (encara que no formulada) per Ptolemeu (170 dC), tenim quasi en essència les bases del que es coneix com a òptica geomètrica. No obstant això, durant aquella època no es va avançar en el descobriment del mecanisme responsable de la visió, ja que predominava la idea que aquesta es produïa perquè els rajos de llum emergien des dels ulls fins a abastar els objectes⁶.

Pel que es refereix a la civilització romana, tan sols cal assenyalar que Sèneca (3 a 65 dC) va ser el primer a mencionar la capacitat amplificadora de les lents convergents en descriure com es veien les coses a través d'un globus de vidre ple d'aigua. Amb la caiguda de l'imperi Romà (475 d.c.), (que marca l'inici de l'edat mitjana) l'estudi de l'òptica, així com el d'altres ciències bàsiques, va caure durant diversos segles en la més absoluta foscor⁷.

En l'edat mitjana només els àrabs van realitzar estudis sobre òptica. Va ser un científic de gran talla, Alhazen (1000 dC)⁸ qui, definitivament, va resoldre el dilema de la visió, en descriure detalladament l'anatomia de l'ull⁹ basant-se en les disseccions que va realitzar. Contradient la teoria d'Hero i Ptolemeu, Alhazen va mantenir que la visió es produïa perquè la llum es reflectia en els objectes i arribava fins als ulls.

Així mateix va treballar en la llei de la reflexió i també va estudiar els espills esfèrics i parabòlics. I el més important: la traducció llatina del seu tractat «Opticae» va ser la millor obra de referència per als estudiosos occidentals fins al segle XVII.

Aquest tractat va permetre que frares de l'edat mitjana desenvoluparen les anomenades «pedres per a llegir», tallades en forma de mitja esfera; i que Roger Bacon (1210 -1292), frare d'origen anglès, comprovava que les persones adultes podien tornar a veure les lletres si utilitzaven vidres tallats: es diu que aconsellava lús d'aquests als ancians i a les persones de vista dèbil[12]. Per aquest motiu se'l considera l'inventor de les ulleres.¹⁰



En el segle XV, Leonardo da Vinci (1452-1519) també aprofundí en l'estudi de l'estructura i el funcionament de l'ull, el qual va comparar amb una cambra fosca: una simple caixa ortoèdrica tancada, que posseeix un xicotet orifici en una de les cares, per la qual pot penetrar la llum, i formar en la cara oposada una imatge invertida, i ben definida, del món exterior. És molt probable que, igual que altres pintors de l'època, Leonardo utilitzara una cambra fosca per a incorporar a la seua pintura els principis de la perspectiva; i va ser la primera persona que va parlar de la possibilitat d'usar lents de contacte per a corregir problemes visuals.

Tots aquests avanços, majoritàriament modestos, constitueixen el que es podria dir el primer període de l'Òptica.


Des del segle XVII

El telescopi refractor va ser el primer «instrument» òptic que revolucionaria l'esdevenir de la física. L'origen se situa en la botiga d'un fabricant d'ulleres danès, Hans Lippershey, l'any 1600, qui combinant dues lents, convenientment muntades en un suport cilíndric, aconseguia que els objectes observats a través d'elles paregueren més pròxims (i es venen augmentats). Es té constància als arxius de la Haia, que Lippershey, el 1608, va sol·licitar una patent per al telescopi, però que el govern danès, veient l'interés militar del dit instrument, en compte d'atorgar-li-la, va adquirir els seus drets a l'inventor. La notícia d'aquest instrument es va difondre ràpidament per tot Europa.

Pareix que el senat de Venècia, tenint coneixement de les qualitats del telescopi, va consultar Galileu Galilei, el científic de més prestigi en aquells temps, qui segons la informació recopilada, no sols es va fabricar el seu telescopi, (emprant dues lents simples, una de convergent –l'objectiu– i una altra de divergent –l'ocular–), sinó que ho va descriure. Així doncs, en certa manera, es considera que «Galileu va reinventar el telescopi».

Però la grandesa de Galileu (1609) radica que va ser el primer a donar-li un ús científic: va començar a fabricar els seus propis instruments (amb els quals aconseguia més de 30 augmentos) per a observar el cel.

El 1610, Galileu va publicar *Sidereus Nuncius*, una descripció de les seues observacions del cel nocturn, i encara que era molt breu (només 24 pàgines) arrellegava coses com que la Lluna no tenia una superfície «suau» com es pensava, sinó que era rugosa; que la Via Làctia estava composta de milions d'estrelles, i que (i aquest va ser el resultat més rellevant) Júpiter tenia quatre llunes girant al seu voltant: per tant, no tot girava al voltant de la Terra! Galileu es va recolzar en aquestes observacions per a revolucionar la ciència, reinven-



dicant el model copernicà (heliocèntric) del nostre sistema planetari, enfront el model ptolemaic (geocèntric), que era l'acceptat per les autoritats acadèmiques i religioses d'aleshores¹¹. Un altre mèrit de Galileu és que li va enviar un dels seus primers telescopis al cèlebre astrònom Kepler¹².

Johannes Kepler (1571-1630) que, a la vegada, va dissenyar un nou telescopi en què l'objectiu i l'ocular, eren lents convergents, el va utilitzar per a compilar les taules de dades sobre el moviment dels planetes que van ser la base de les seues transcendents lleis –les lleis de Kepler– sobre el moviment planetari. El seu llibre *Dioptrice* (1611), que es va convertir en un text per als estudiosos de l'òptica durant molts anys, on a més d'establir la llei de la refracció per a angles petits: la proporcionalitat entre l'angle refractat i el d'incidència, també va desenvolupar un tractament de l'òptica de primer ordre (òptica paraxial), i va establir els principis del funcionament d'una lent prima i de la combinació d'aquestes.

També són deguts a Kepler dos descobriments de gran importància:


- Que la imatge visual es forma en la retina, i està invertida amb relació a l'objecte i que el cervell és l'encarregat de tornar-la a invertir i posar-la dreta.
- L'existència d'un nou fenomen òptic: el de la reflexió total interna. A partir d'un angle límit d'incidència, el raig incident no es refracta en el segon medi, sinó que pateix una reflexió total i retorna al medi inicial¹³.

Sobre la teoria corpuscular de la llum

Que la llum podria estar constituïda per partícules materials és una teoria que tindria els seus orígens en els filòsofs atomistes seguidors de Demòcrit. Aquesta teoria va guanyar impuls amb les idees mecanicistes de Descartes (1596-1650) [13] i amb el treball de Newton (1642-1727)[3].

Descartes, utilitzant una analogia mecànica, va considerar que la llum, igual que el so, es podia interpretar com una pressió transmesa a través d'un medi elàstic que ompliria tot l'espai: –l'èter–, i partint d'aquesta hipòtesi va ser el primer a formular, en termes de sinus, la llei de la refracció.

No obstant açò, aquesta llei, la de la refracció, porta el nom del científic que l'havia estudiada empíricament, el 1621, el matemàtic i astrònom Willebrord Snell (1591-1626), professor de Leyden; qui va aconseguir mesurar els angles que formen els rajos incidents i refractats a la superfície de separació de dos medis. A partir d'aquestes mesures va formular la llei de la refracció, no sols per a angles petits, com havia fet Kepler, sinó també per a angles grans. Snell va obrir, així, la porta a l'òptica aplicada.



La precocitat i la superioritat de Newton (1642-1727)¹⁴ en l'estudi de l'Òptica, ho demostra el fet que als 18 anys ja havia fabricat un telescopi petit i poc potent, però amb una novetat revolucionària: va utilitzar espills esfèrics, en comptes de lents, per evitar el molest problema de l'aberració cromàtica, que dona lloc a imatges afectades d'esborronament cromàtic. Es tracta del telescopi reflector, que posteriorment (amb modificacions i millores) va ser d'ús estès en astronomia i astrofísica¹⁵.

Després va realitzar una sèrie de magnífics experiments amb la intenció de desvetllar la naturalesa i el comportament de la llum. El més conegut és el que hem comentat sobre la dispersió de la llum per un prisma; per la qual cosa conclou que la llum blanca està constituïda per llum de diversos colors i que aquests tenen distinta refrangibilitat¹⁶.


Newton va proposar per a la llum un model corpuscular. Considerava que la llum blanca estava constituïda per un conjunt de petites partícules, en el qual el color és una propietat inherent –la mida–, que es propaguen en un medi material que omple tot l'espai: «l'èter»; i que l'atracció que els cossos transparents exercien sobre les diferents partícules ocasionava el fenomen de la refracció. Newton va resumir els seus experiments en el seu cèlebre llibre *Opticks*[3].

Com a conseqüència de l'autoritat científica de Newton, pocs van dubtar de la naturalesa corpuscular de la llum¹⁷.

Sobre la naturalesa ondulatoria de la llum

En plena hegemonia de la ciència de Newton, Francesco M. Grimaldi (1665) va ser el primer a observar la desviació de la propagació rectilínia que pateix la llum quan aquesta es veu obstruïda o interceptada per un obstacle, veient que la zona d'ombra geomètrica consistia en una successió de bandes fosques i brillants acolorides¹⁸. Grimaldi va batejar aquest fenomen amb el nom de *difracció*[14], i encara que va arribar a especular sobre el caràcter ondulatori de la llum, finalment rebutjà aquesta possibilitat.

Però l'holandès Christian Huygens (1629-1695) creia en la naturalesa ondulatoria de la llum, i va considerar que aquesta es propagava com a petites ones esfèriques que se superposaven geomètricament per a formar-ne una d'envolvent, o front d'ona, la qual, posteriorment, actuava com una nova font d'ones secundàries[15]. Una repetició successiva d'aquest fenomen bastava per a explicar la propagació de la llum, així com els fenòmens de la reflexió i la refracció. La seua teoria ondulatoria li va permetre explicar fins i tot el fenomen de la birefringència que presentaven els cristalls de calcita. Però un fet crucial en la seua teoria era que la velocitat de la llum havia de ser in-



ferior en els medis transparents de mé densitat òptica (major índex de refracció), la qual cosa entrava en contradicció amb el que postulava la teoria corpuscular de Newton¹⁹. La comprovació d'aquesta dada era impossible en aquella època.

Va ser a finals del segle XVIII, quan va aparèixer el més ferm oponent de la teoria corpuscular: Thomas Young (1773-1829).


Metge anglès que es va dedicar preferentment al funcionament de l'ull humà, i que va establir que hi ha tres tipus de receptors cadascun d'ells sensible a un dels colors primaris²⁰, i va descobrir com canvia la curvatura del cristal·lí per a enfocar objectes a diferents distàncies i l'origen de l'astigmatisme.

Basant-se en el principi d'interferència de les ones, Young va explicar els colors que es formen en pel·lícules fines, com les bombolles, i també va aconseguir explicar el fenomen dels anells de Newton que es formen en pel·lícules d'aire primes (que el mateix Newton no va poder interpretar). Va estudiar diversos fenòmens d'interferència amb la llum, incloent-hi l'experiència que porta el seu nom, i que forma part de la llista dels «10 experiments més bells» que hem vist anteriorment. I que consistia a fer passar la llum que procedia d'una única font, a través de dues esclatxes estretes molt pròximes, i observar llavors que es formaven unes bandes brillants que s'alternaven amb altres de fosques²¹[4].

Young creia que les vibracions lluminoses s'efectuaven en direcció paral·lela a la propagació de les ones lluminoses (ones longitudinals). Açò li va impedir tenir la capacitat per a donar una explicació satisfactòria dels fenòmens de polarització.²²

Les bases teòriques per a la teoria ondulatòria de la llum van ser formulades pel físic francès Augustín Fresnel (1788-1827)[16], que va realitzar nombrosos experiments sobre interferències i sobre la difracció produïda per molts obstacles. Va considerar que la llum es propagava com a suma –analítica, no geomètrica– de les ones secundàries de Huygens, i que donava lloc als efectes d'interferència i difracció. Així doncs, la gran aportació d'Auguste Fresnel per al rescat de la teoria ondulatòria de la llum va ser la seua formulació matemàtica²³ que va donar rigor al model ondulatori. I amb l'ajuda de Young, d'Arago, i de L. E. Malus, també va explicar teòricament els fenòmens de la polarització en considerar que la llum es comportava com un moviment ondulatori transversal.²⁴

Però va ser l'escolès James Clerk Maxwell (1831-1879) qui, seguint els treballs de Faraday, i valent-se de la seua gran formació matemàtica i teòrica, va unificar l'electricitat i el magnetisme i va establir un conjunt d'equacions matemàtiques, que avui es coneixen, en el seu honor, amb el nom d'equacions de Maxwell[17].



Maxwell va ser un paradigma per als físics teòrics posteriors: establir lleis, el més senzilles possible, simètriques, i que condensaren el major nombre de fets empírics possibles.

A partir del seu estudi Maxwell demostrà, teòricament, que les perturbacions electromagnètiques es propagaven com a ones transversals, en el medi que es considerava el seu suport mecànic: l'èter. Quan Maxwell calculà la velocitat d'aquestes ones va obtenir un resultat numèric que coincidia amb el de la velocitat de la llum en el buit; per la qual cosa va concloure, definitivament, que la llum era una ona electromagnètica que es propagava a través de l'èter.

En contra del que poguera parèixer, la monumental contribució de Maxwell no va despertar gran entusiasme en la comunitat científica. Va fer falta un experimentador per fer a de Maxwell una llegenda.

La formulació senzilla, que es coneix avui com a equacions de Maxwell, és obra de Heinrich Hertz, un exemple, poc comú, d'algú que va ser més que el típic experimentador que de la teoria només sap el «just per a anar tirant»[18]. La tasca d'Hertz va consistir, en bona mesura, a posar ordre i claredat al treball de Maxwell, i a comprovar, sintetitzar i divulgar la seua teoria²⁵.


L'òptica del segle XX i la concepció actual de la llum

E finalitzar el segle XIX la naturalesa ondulatòria (i electromagnètica) de la llum pareixia un fet ben establert i indiscutible. En la física regnava un ambient d'eufòria i autocomplaença, i semblava que la física ja havia aconseguit el seu objectiu primordial: explicar les lleis de la natura (mecànica, termodinàmica i electromagnetisme); ja no quedava res per fer excepte estendre les mesures a unes poques xifres decimals més. Sembla que la història té el seu origen en un comentari fet pel físic experimental Michelson, durant una conferència impartida a la Universitat de Chicago[19]:

...pareix probable que la majoria dels grans principis subjacents hagen sigut fermament establerts i que els avanços posteriors hauran de buscar-se principalment en la rigorosa aplicació d'aquests principis a tots els fenòmens de què tinguem notícia... Un eminent físic²⁶ ha comentat que les futures veritats de la Ciència física hauran de buscar-se en la sexta xifra decimal

Però les coses canviarien molt ràpidament, i també en això va jugar un paper rellevant l'Òptica²⁷.

Max Planck (1858-1947), hereu de la tradició de la termodinàmica alemanya, estudiava un tema que es trobava en el *borderline* entre la llum i la matèria; Planck intentava reconciliar la teoria clàssica electromagnètica amb



els resultats experimentals de l'espectre de radiació emès per un cos negre a una determinada temperatura²⁸. Anteriorment a ell altres grans físics termodinàmics havien intentat resoldre la qüestió sense èxit²⁹.

Com que no podia donar una solució satisfactòria des dels models de la física clàssica, Planck es va limitar a buscar una funció matemàtica, que s'ajustara a les dades experimentals conegudes. Però per a justificar la seva proposta, des del punt de vista físic, Planck havia d'acceptar que els oscil·ladors, que constituïen les parets del cos calent (cos negre), havien d'emetre i absorbir energia radiant en forma discreta i no contínua.

La introducció de la quantització va suposar per a tota la física un punt d'inflexió. Si bé ni Planck ni els seus col·legues van comprendre la transcendència i conseqüències que se'n derivaren. A Planck (com posteriorment li va succeir a Einstein) l'incomodava que la seva pròpia teoria atemptara contra l'edifici de la física clàssica (que ell tenia en tan alta estima), però finalment va arribar a afirmar[18]: «hem de viure amb la teoria quàntica»; i afegia: «l creieu-me, creixerà. No serà només en òptica. Entrarà en tots els camps».


El que posa de manifest com un germen, que s'havia desenvolupat en l'àmbit de l'òptica, va servir de pedra angular per a la resta del que es donaria en anomenar: física Moderna³⁰.

El 1905, Einstein (1879-1955), intentant explicar l'efecte fotoelèctric (i que consistia en l'emissió d'electrons per una superfície metàl·lica quan s'il·lumina), descobert per Hertz, proposà un model en què la llum estava constituïda per petits paquets o «quants» d'energia, d'igual magnitud als proposats per Planck, en el seu model. Així doncs, Einstein va proposar l'equació per a la llum $E = h\nu$; en la qual formulava que un quant de llum transportava una energia proporcional a la seva freqüència ν ; on h és la constant de Planck[6].

Així doncs, després del treball d'Einstein, es considerava que la llum es propagava com una ona, i interaccionava amb la matèria com si es tractara de corpuscles, sense massa, que portaven una energia discreta donada per l'equació anterior. Aquests quants de llum serien batejats més tard, amb el nom de «fotons», per G.N. Lewis en 1926[20].

Amb l'establiment de la mecànica quàntica, a poc a poc, es va fer evident que els conceptes de corpuscle i ona, que en el domini macroscòpic semblaven mútuament excloents, havien de coexistir en el domini submicroscòpic.

La imatge mental d'una partícula atòmica (electró, neutró, etc.) com una porció localitzada de matèria ja no satisfà; especialment després de comprovar, amb l'experiment «més bell» de la física, que les partícules podien generar patrons d'interferències (i difracció) igual que la llum. Fotons, electrons..., tots tenen ambdues manifestacions: com a corpuscle i com a ona.



D'altra banda, l'experiència de Michelson i Morley per a detectar el «vent de l'èter», va conduir Einstein a postular la seua no-existència, i a establir, a partir del seu principi de relativitat, que la velocitat de la llum era (igual que succeïa amb el quant d'acció « h ») una constant universal; i, posteriorment va mostrar l'afinitat existent entre la massa i l'energia en la seua famosa equació $E=mc^2$. El que pareixien dues magnituds quasi confrontades –matèria i energia– ara resultaven equiparades per aquesta equació[6].

A més, amb la formulació posterior, el 1915, de la teoria de la Relativitat General, establia la deflexió dels rajos de llum (o dels quants de llum) davant de la presència de camps gravitatoris intensos (grans masses). Si la doble naturalesa, ondulatòria i corpuscular, ja li confereix un caràcter certament enigmàtic a la llum, que a més, perceba els efectes de l'acció gravitatòria, mostra, més encara, el seu caràcter complex i obert (encara que siga explicada per la modificació de la geometria de l'espai).

La segona meitat del segle XX, ha sigut per a l'òptica aplicada, una espècie de renaixement, o etapa d'eclosió.

En 1948, l'hongarès Dennis Gabor[21], va establir els principis de l'holografia, a l'estudiar com registrar i reconstruir el front d'ones d'un objecte (puntual); el que significaria, en un futur –quant es varen desenvolupar els làsers– la capacitat per poder registrar, emmagatzemar i reproduir imatges d'objectes en tres dimensions.

D'altra banda, i després de l'establiment per Einstein, al 1916, del fenomen de l'emissió estimulada, el 1960, fruit dels treballs de Townes, Prokhorov i Basov, sobre el MÀSER[22], i de Townes i Schawlow[23] que establien les condicions per a generar llum amplificada, Theodore H. Maiman va construir el primer LÀSER –el làser de rubí–[24], que va constituir una fita en la consecució d'un nou tipus de font de llum. Durant la primera dècada, i les posteriors es van desenvolupar làsers en totes la longituds d'ona, i de tot tipus (de gasos, de colorants, d'estat sòlid...), que varen revolucionar la tecnologia òptica: i van obrir les portes al descobriment de nous fenòmens d'interacció llum-matèria. El seu ús es va estendre a la indústria i la medicina, i també en les nostres vides quotidianes: lectors de codis de barres, lectors de DVD; comunicació per fibra òptica, etc. La combinació d'aquesta nova òptica amb l'electrònica ha donat lloc al naixement del que s'ha anomenat en Fotònica[25].

Però aquest ràpid repàs, en el qual necessàriament hem hagut de deixar moltes llacunes, hem vist com els avanços en la concepció de la llum, i la seua tecnologia, han anat sorgint lentament: hem recorregut més de 3000 anys! En l'àmbit conceptual no s'ha avançat massa, a pesar que en les últimes dècades els avanços tecnològics s'estan produint a un ritme vertiginós.

Com assenyala Eugene Hecht[6], autor d'un dels llibres introductoris sobre Òptica, més difós en els primers cursos d'universitat,



«resulta sorprenent i meravellós observar que la resposta va canviant subtilment, mentre que la pregunta, què és la llum? roman immutable i tenint vigència».

Les fronteres actuals de l'òptica són molt extenses: la computació òptica, la teleportació i l'encriptació quàntica (que aprofiten la naturalesa quàntica de la llum), les noves propietats òptiques dels materials (els nous metamaterials o materials esquerrans), l'òptica ultraràpida i ultraintensa i els nous fenòmens d'interacció llum-matèria, les comunicacions òptiques i les fibres de cristalls fotònics i microestructurades, etc. De totes elles voldria destacar-ne dues: l'Òptica ultraràpida i l'Òptica adaptativa.

L'Òptica ultraràpida


S'anomena així l'òptica relacionada amb els polsos làser de molt curta durada. Un pols de llum ultracurt és un pols electromagnètic amb una duració temporal compresa entre el femtosegon (10^{-15} s) i el picosegon (10^{-12} s). Els polsos làsers ultracurts són els esdeveniments més petits mai generats per la tecnologia desenvolupada per l'home. Per a fer-nos una idea de la seua menudesa, basta adonar-nos que un femtosegon és a 1 minut, com 1 minut és a tota l'edat de l'univers³¹[26].

Aquesta és una de les raons per les qual els polsos làser ultracurts són de gran importància, ja que ens permeten mesurar esdeveniments molt curts i tenir accés a regions, de l'estudi de la matèria (o de la interacció radiació-matèria) que fins ara resultaven inaccessibles.

Un poc d'història sobre la tecnologia ultraràpida

Pareix que tot va començar amb una aposta de 25.000\$, realitzada el 1872, a Palo Alto, Califòrnia, entre Leland Stanford, (magnat del ferrocarril, exgovernador de Califòrnia i posteriorment fundador i mecenes de la prestigiosa Stanford University), i el seu soci (Frederick MacCrellich), sobre si «*Poden les potes d'un cavall al galop, en algun instant, no estar tocant terra?*».

Per a resoldre aquesta qüestió Stanford va contractar les habilitats fotogràfiques de l'anglès Eadweard Muybridge (1830-1904). Aquest va col·locar diverses càmeres paral·leles al recorregut de l'equi, i equidistants entre si, que s'accionaven automàticament gràcies als fils que el cavall anava trencant al seu pas. La sèrie de fotografies obtingudes el 1873 va demostrar que existia un instant en què les quatre potes del cavall estaven en l'aire³².



Muybridge, amb les seues càmeres, va aconseguir fragmentar el moviment i mostrar el món ocult del *temps detingut*[27]. Va ser el primer a dividir el segon: en aquest cas es necessitava obtenir fotografies (o fotogrames) a intervals d'1/60 de segon, per a dilucidar que, efectivament, hi havia un instant en què el cavall «volava» sense tocar el terra; i és que «per a mesurar un esdeveniment en el temps es necessiten un altre la duració del qual siga encara menor».

A partir d'aquest instant va començar la curiositat per «registrar» (o veure) com succeïen esdeveniments que podien ser molt, molt ràpids. I així, el 1942, l'enginyer nord-americà Harold E. Edgerton del MIT (Massachusetts Institute of Technology) es va dedicar a desenvolupar fonts de llum estroboscòpiques: làmpades que generaven flaixos intensos i repetitius, amb intervals de l'ordre de microsegons (10^{-6} s). Amb aquests va aconseguir donar un salt quantitatiu, però també qualitatiu perquè va ser el primer a aplicar aquestspolsos a un interès científic, com és l'estudi dels motors elèctrics síncrons (tema de la seua tesi doctoral); encara que també els va aplicar a registrar les conegudes, i inoblidables, sèries fotogràfiques d'esdeveniments com: l'impacte d'una gota sobre una superfície líquida, projectils en vol, o moviments humans ràpids[28].

Després de les làmpades estroboscòpiques, ja van ser els làsers els que van prendre el relleu en la consecució de polsos de llum encara més curts.

Des de la construcció del primer làser de rubí, el 1960 per Theodore Maiman[24], ja es va veure la possibilitat tècnica dels làsers per a aconseguir feixos de llum de potències elevades. Per la pròpia definició de potència³³, açò requeria aconseguir majors energies (per mitjà del procés d'amplificació) i concentrar-la en un interval temporal més curt: generació de polsos.

En un làser, el medi actiu dóna lloc a l'amplificació de la llum, i això com a conseqüència del fenomen d'*emissió estimulada* descobert per Einstein el 1916. En el procés d'emissió estimulada, un àtom excitat a l'interaccionar amb un fotó incident, d'una freqüència apropiada, emet un altre fotó d'aquestes característiques, i s'obté, com a resultat, una amplificació coherent del feix incident (entra un fotó i n'ergeixen dos). Aquest procés repetit al llarg del medi actiu (a mesura que avancen els fotons) origina un efecte d'emissió de fotons en allau: és a dir, l'emissió de radiació lluminosa amplificada (d'elevada intensitat, per a entendre'ns). Però per a no haver d'utilitzar un medi actiu molt extens, aquest es tanca en una cavitat longitudinal limitada per dos espills (un amb un coeficient de transmissió molt petit, per tal que pugui sortir a l'exterior la radiació amplificada). De manera que la llum va i ve passant moltes vegades pel medi amplificador.

De totes les radiacions generades per *emissió estimulada*³⁴, la cavitat «selecciona» i tan sols permet el manteniment i amplificació d'aquelles longituds d'ona que satisfan la condició d'ona estacionària (o modes longitudinals) en la



cavitat³⁵. Aquestes, a més de tenir una longitud d'ona diferent, oscil·len amb diferències de fase aleatòries —o sense acoblament. Per a transformar una cavitat làser en un làser polsat necessitem introduir dos mòduls més: un que aconseguisca l'ancoratge, o sincronia, de les diferents ones estacionàries (Mode-Locked)[29,30], i un altre que realitze una compensació de la dispersió del pols.

Depenent de la separació dels modes³⁶, de com es realitza l'ancoratge, i del disseny dels mòduls anteriors podem aconseguir polsos de llum làser molt curts³⁷.

Amb el pas del temps l'òptica ha avantatjat l'electrònica en la capacitat d'aconseguir «polsos» o esdeveniments més breus. En l'actualitat ja no s'espera que l'electrònica (els processos de transport electrònics) pugui millorar l'òptica, pel que fa a la resolució temporal, perquè encara que la tecnologia electrònica ha anat avançant en les últimes dècades, l'òptica ho ha fet molt més ràpidament.

Aplicació dels polsos ultracurts

Micromecanitzat

S'apliquen i es volen continuar aplicant a processos de tall i micromecanitzat. Com més curta siga la duració dels polsos, per a una mateixa energia, els efectes de difusió calorífica seran menors, i els «talls» o mosses produïts en les superfícies dels materials, més nítids, i menys irregulars[31].

Biomedicina

En el cas d'emprar bisturís làser amb tecnologia de femtosegon, els efectes tèrmics no apareixerien en el teixit que envolta la zona de tall, la qual cosa comportaria una cicatrització molt més ràpida. Actualment alguns làsers ultraràpids comencen a aplicar-se en oftalmologia, concretament en operacions de cirurgia corneal[32].

Microscòpia confocal multifotó

El principal inconvenient dels microscopis convencionals és la seua incapacitat per a formar imatges nítides quan treballen amb objectes tridimensionals,

ja que estan afectades d'esborronament per captar llum de plànols diferents al d'enfocament en la mostra; especialment quan analitzem mostres biològiques.

Les bases de la microscòpia confocal van ser proposades el 1960 per Marvin L. Minsky (1927-), pare de la intel·ligència artificial i cofundador de l'Institut d'Intel·ligència Artificial del MIT. Davant les dificultats que va trobar per a cartografiar les connexions neuronals del cervell³⁸, es va adonar de la incapacitat que posseïen els microscopis convencionals per a col·lectar, únicament, llum d'un únic pla (l'objectiu d'un microscopi convencional arreplega llum procedent de diversos plans de la mostra, amb la qual cosa obtenia imatges molt difuses i amb poca definició). Minsky va proposar focalitzar la llum sobre la mostra a través del mateix objectiu, i l'ús d'un «*pinhole*» (o orifici petit), degudament ubicat, per a eliminar la llum difusa procedent d'aquells plans distints al de focalització[33].

Per a fer visibles les mostres biològiques, se solen tintar amb un fluorocrom –substància fluorescent– que emet llum quan s'il·lumina amb llum ultraviolada.

En aquest cas la microscòpia confocal –per fluorescència a un fotó– presenta tres inconvenients per a l'anàlisi de mostres biològiques.

- La fototoxicitat: es genera llum fluorescent en regions contigües a la d'observació que poden produir contaminació lumínica en la mostra (un con de llum fluorescent).
- El blanqueig del fluorocrom en les zones fora d'enfocament. Que l'inutilitza per a observacions posteriors.
- Les radiacions que generen fluorescència se situen en la regió ultraviolada, i esta posseeix poca capacitat de penetració en les mostres biològiques.

En canvi, la microscòpia multifotònica, que utilitza polsos làser ultracurts, es basa en l'excitació d'un fluorocrom per la incidència simultània de 2 (o més) fotons, depenent de la duració del pols (picosegons –dos fotons–, femtosegon –més de dos fotons–); i és interessant en diferents aspectes[34]:

- Pel fet que la mostra només s'excita en el punt on es produeix la suma de dos fotons, només hi ha excitació en el punt on es focalitza el pols de femtosegons, per això, no és necessària la presència del *pinhole*.
- L'excitació amb làser infraroig possibilita, per l'absorció de més d'un fotó, l'excitació de fluorocroms ultraviolats sense la utilització d'un làser específic per a això.
- A més el blanqueig i la fototoxicitat de la mostra es troben limitats només al pla focal.
- L'alta capacitat de penetració dels fotons de baixa freqüència (l'infraroig), possibilita l'estudi de mostres de certa grossària, la qual cosa aporta l'avantatge d'evitar realitzar talls de les mostres biològiques.

Femtoquímica

L'òptica ultraràpida s'h mostrat com una eina molt útil per a la química, ja que permetrà, en un futur no molt llunyà, tenir un control sobre les reaccions químiques. En química resulta habitual tractar de controlar (maximitzar o minimitzar) determinats productes d'una reacció química per mitjà de l'ús de variables macroscòpiques: temperatura, pressió, concentració; però en fer-ho d'aquesta manera (un mode macroscòpic), la naturalesa quàntica que governa el curs microscòpic d'una reacció química no és manipulable³⁹.

Podem utilitzar la llum procedent d'un làser per a controlar les reaccions químiques? Aquesta va ser la pregunta que es van formular alguns científics a finals dels anys 60, després de l'aparició del primer làser.

Els àtoms que constitueixen una molècula, en un model mecànic simplista, es poden considerar com unitats per ressorts que oscil·len amb una determinada freqüència, i fer que els àtoms vibren entorn d'unes posicions d'equilibri. Per això es va pensar que un làser que emetera una radiació (intensa) amb una freqüència igual a la freqüència amb què vibra un enllaç, produiria un efecte de ressonància i podria arribar a trencar el dit enllaç, i generara un producte específic; dit d'una altra manera: podríem controlar una reacció. Desgraciadament, tots els enllaços de la molècula interaccionen entre si, i els experiments van mostrar que l'energia aportada per la radiació làser a un determinat enllaç es redistribueix ràpidament entre els enllaços restants de la molècula, i calfa el sistema sense aconseguir, en la majoria dels casos, cap control. El control quàntic pareixia relegat a una quimera teòrica.

Uns trenta anys després els làsers que emeten polsos de femtosegon han fet emergir el somni del control quàntic. En una reacció química, el viatge complet dels nuclis atòmics ocorre en un interval temporal d'uns pocs centenars de femtosegons. Per això, si volem produir una pel·lícula a càmera lenta des dels reactius als productes, és necessari obtenir «instantànies» almenys a la mateixa velocitat a què es mouen els àtoms, és a dir en una escala de femtosegons.

Aquesta tècnica és la que va emprar Ahmet H. Zewail, egipci de naixement, en l'Institut Tecnològic de Pasadera (EUA), que el 1999 va obtenir el Premi Nobel de Química en 1999, i va establir així una nova «ciència»: la femtoquímica [35].

Però si és possible observar àtoms en moviment utilitzant polsos làser de femtosegons, també hauria de ser possible governar microscòpicament una reacció amb aquests polsos.

A causa de la brevetat dels polsos i a la seua intensitat, la interacció amb un enllaç molecular determinat resulta ser tan breu que no es produeixen efectes de dissipació d'energia en la resta d'enllaços de la molècula, per la qual

cosa es pot produir una acció concreta, i intencionada, sobre un enllaç determinat de la molècula sense afectar la resta.

Es tracta de la primera fita en l'establiment de com interaccionen els polsos làser òptics ultracurts amb la matèria, però de moment són necessaris molts més resultats per aconseguir el control quàntic i convertir-lo en una nova eina que permeti manipular les reaccions químiques que es produeixen en els sistemes biològics i farmacològics.

Òptica adaptativa


L'Òptica adaptativa (AO) és una tecnologia per a corregir les «aberracions» òptiques associades a un instrument o sistema òptic, amb la finalitat d'aconseguir imatges de més qualitat. Es tracta d'un dels camps fronterers de l'òptica per la seua potencialitat. En l'actualitat s'està aplicant, amb èxit, a diversos àmbits de l'òptica i la ciència. Ací em centraré en dos: l'astronomia (l'àmbit en què va sorgir) i la visió humana: les grans dimensions cosmològiques i les petites dimensions de l'home.

L'òptica adaptativa en astronomia

Des de la seua invenció, fa uns 400 anys, el telescopi ha passat de ser un petit instrument manual per a realitzar senzilles observacions visuals, a un sistema sofisticat i d'enormes dimensions, computeritzat i dotat de posicionadors i sensors de gran qualitat i precisió, imprescindible per a la recerca en astronomia i astrofísica.

Durant la seua evolució, dos paràmetres han sigut particularment rellevants en el seu disseny: la seua capacitat col·lectora de llum (que permet l'observació de cossos celests encara que siguin poc lluminosos, i la seua resolució angular (relacionada amb la capacitat per a detectar objectes petits i/o molt distants, i relacionada amb la nitidesa de les seues imatges). En el cas d'un telescopi perfecte, tots dos paràmetres augmenten quan ho fa el seu diàmetre.⁴⁰

El front d'ona procedent d'una estrella molt llunyana (a efectes pràctics en l'infinit), es pot considerar pla, i quan abasta l'espill —o objectiu— del telescopi, aquest l'hauria de convertir en una ona esfèrica perfecta que focalitzara en un punt, donant lloc, així, a la imatge de la estrella. En el cas ideal, és a dir sense la presència de cap defecte addicional, la imatge formada sols estaria limitada pel fenomen de la difracció, i coincidiria amb el disc d'Airy: el que havia de ser un punt, seria una taca de difracció extensa, però ben coneguda.⁴¹



Newton ja va posar en evidència que la resolució d'un telescopi no millorava en augmentar el seu diàmetre per damunt, d'aproximadament, una desena de centímetres, per òptims que foren el disseny i la qualitat òptica dels seus components. Va ser ell qui va atribuir aquesta limitació als moviments continus que es produïen en les capes atmosfèriques. Fins i tot va arribar a concloure que només existia una solució: ubicar els observatoris astronòmics en llocs on l'aire estiguera especialment en calma, com als deserts o als cims de les muntanyes (Newton 1652).⁴²

I és que mirar el cel des de la Terra és com mirar a l'exterior des del fons d'un estany ple d'aigua. La deformació i la pèrdua de definició que pateix la imatge observada a través de l'aigua és semblant a l'efecte que té l'atmosfera terrestre sobre la llum que ens arriba des de l'espai exterior.

L'atmosfera és un medi turbulent que afecta a la llum que es propaga com una ona d'ella a través. Les variacions de temperatura i, en menor mesura, de pressió i humitat, produeixen canvis en l'índex de refracció de l'aire. Aquests canvis fan que els rajos de llum no segueixen un camí recte sinó que es desvien i que, en conseqüència, cada un segueixca un camí òptic ben distint (uns es retarden i uns altres s'avancen) fins a arribar a l'obertura del telescopi. D'aquesta manera la turbulència atmosfèrica deforma el front d'ona i la conseqüència és evident: una degradació important de les imatges capturades pel telescopi.

En general, un telescopi (terrestre) no es comporta com un sistema òptic perfecte per tres raons:

- Les imperfeccions pròpies dels elements òptics i mecànics del telescopi.
- El límit de resolució imposat pel fenomen de la difracció.
- Les aberracions aleatòries induïdes per les pertorbacions atmosfèriques.

Les primeres es poden eliminar millorant el disseny, la qualitat i el procés de fabricació de tots els seus components (òptics i mecànics). El límit teòric de resolució difraccional és inamovible; i quant a les distorsions generades per l'atmosfera, l'inconvenient principal és que varien contínuament amb el temps. Si no fóra així, es podrien corregir amb elements òptics estàtics.⁴³

Encara en les millors ubicacions (les aconsellades per Newton), els grans telescopis terrestres observant en les longituds d'ona del rang visible (també podem considerar com a visibles les regions d'ultraviolat i infraroig pròxim) no poden, tan sols pels efectes de la turbulència atmosfèrica, aconseguir resolucions millors que la de telescopis prou més modestos: de diàmetres de 10 a 20 cm!

Vegem-ne un exemple. Els telescopis Keck (I) i (II), dos dels més grans del món, de 10 m de diàmetre cada un, situats al cim del volcà extingit Mauna Kea,

ales illes d'Hawaii, a uns 4000 m d'altura, teòricament podríem resoldre estrelles separades angularment en 0,01 segons d'arc (0,01"); però, a conseqüència de les pertorbacions de l'atmosfera, la seua resolució rares vegades supera 1 segon d'arc (1").⁴⁴

Així, que les imatges de dos estrelles separades per un angle inferior a 1" es veuran solapades, i no les podrem distingir (a pesar de treballar amb telescopis de 10 m de diàmetre). És el que succeïa amb *Gamma Perseus*, una estrella binària que subtendeix 0,2"

Per a salvar aquesta limitació en el camp de l'astronomia, s'han presentat dues solucions: la utilització de telescopis que no sofrisquen les pertorbacions atmosfèriques (el que coneixem com a telescopis espacials), i la utilització de l'Òptica adaptativa.

En efecte, la principal raó per la qual el 1990 el Telescopi Espacial Hubble (HST)⁴⁵ va ser posat en òrbita, a uns 600 km d'altura de la superfície terrestre, tenia un doble propòsit: obtenir imatges que no estigueren degradades per les turbulències atmosfèriques, i evitar l'absorció que l'atmosfera exerceix en la regió de l'ultraviolat, de manera que ja es podien examinar les estrelles («joves»).


El HST,⁴⁶ amb un espill primari de sols 2,4 m de diàmetre, és capaç d'aconseguir imatges amb més resolució que els grans telescopis instal·lats en la Terra: d'acord amb el seu diàmetre, posseeix una resolució en el rang visible (500nm), d'uns 0,05 segons d'arc (0,05"). És a dir, una resolució que resulta ser 20 vegades millor que la dels grans telescopis terrestres. [36].⁴⁷

No obstant el fet que els telescopis espacials suposen un alt cost de fabricació, així com la delicada i elevada complexitat de la seua posada en òrbita, i l'elevat cost de manteniment⁴⁸ (100 vegades més que si estiguera instal·lat en terra), no els fan sempre viables.

L'altra alternativa que queda és conèixer el comportament de l'atmosfera, mesurar el seu efecte sobre la llum que arriba de l'espai, i compensar-lo. Aquesta tècnica rep el nom d'Òptica adaptativa, i en la darrera dècada, la majoria dels descobriments importants en astrofísica han estat associats a grans telescopis terrestres que disposen d'aquest sistema de compensació; i el futur de l'observació en astronomia i astrofísica requereix d'aquesta tècnica.

Com treballa l'òptica adaptativa?

Un sistema d'AO treballa mesurant, en primer lloc, les distorsions que produeixen les turbulències atmosfèriques sobre el front d'ona de la llum que captura el telescopi. A continuació, utilitzant la dita informació, modifica el front d'ona, tornant-li la seua condició primitiva, com si no haguera travessat l'atmosfera.



Per a entendre la tasca que desenvolupa un sistema d'AO, hem de ser conscients que el front d'ona que emergeix d'una estrella llunyana arribarà a l'atmosfera, pràcticament, com un front d'ona pla. A mesura que aquest va recorrent els més de 100 km de la capa gasosa que rodeja a la Terra, pot acumular en la porció capturada per un gran telescopi, errors de fase d'unes poques micres, això suposa que (geomètricament) hi haurà parts del front d'ona que s'hauran avançat o retardat (és a dir sofreix desfasaments) de diverses longituds d'ona,⁴⁹ i el front d'ona en compte de ser una superfície plana, passa a ser una superfície ondulada molt irregular.

La mesura de les perturbacions del front d'ona que arriba al telescopi, es du a terme amb un sensor de front d'ona, que mesura, de forma molt precisa, eixes «ondulacions» introduïdes per l'atmosfera i els tramet al computador del telescopi.


Si introduïm unes ondulacions —o variacions de fase— de signe oposat serem capaços de compensar les perturbacions i reconstruir el front d'ona pla de l'estrella llunyana. Açò es realitza amb una superfície reflectora elàstica, o espill deformable, que es pot deformar molt ràpidament i de manera molt precisa gràcies a l'actuació de milers de microactuadors, de naturalesa piezo-elèctrica⁵⁰ que operen davall de la superfície especular; governats tots ells pels senyals elèctrics que envia el computador, l'espill es deforma adquirint una configuració oposada a la del front d'ona (els ixents del front d'ona incideixen en les depressions de l'espill deformable, i viceversa; reflectint finalment (en el cas que ens ocupa: el d'una estrella llunyana) un front d'ona pla.

D'aquesta manera l'ona que finalment captura el telescopi adoptarà la seua forma primitiva: com si mai no haguera travessat l'atmosfera. A més tot aquest procés (bucle de mesura-correcció) ha de realitzar-se amb una precisió aproximada d'1/50 de micró,⁵¹ i cada milisegon aproximadament.⁵²

En el cas de l'AO en astronomia, hi ha una dificultat afegida, i és que sempre necessitem que en la zona d'observació existisquen «estrelles guia»,⁵³ amb suficient lluminositat, com per a conformar l'espill deformable en cada instant perquè elimine els efectes de la perturbació atmosfèrica.

Però, la probabilitat de trobar una estrella guia en la zona d'observació sol ser molt baixa. En aquest cas la tècnica d'AO ha de valdre's d'estrelles de referència «artificials» generades per radiació d'un feix làser; tècnica coneguda com LGS (Làser Guide Star), i que consisteix a generar un punt lluminós (o traça lluminosa) emprant el raig d'un làser potent que ix en la mateixa direcció de l'eix del telescopi.

L'estrella guia més utilitzada és la de sodi, que consisteix a utilitzar un làser molt intens sintonitzat a la longitud d'ona de 589nm,⁵⁴ i focalitzar-ho en part alta de la mesosfera (a uns 90 km d'altura, molt per damunt de la zona de turbulències atmosfèriques). A causa de l'abundància de sodi en aquesta



regió, el làser origina un punt brillant, estrella artificial o «balisa» groga, que sempre se situa en el camp d'observació.

Les proves que s'estan realitzant actualment amb aquestes tècniques, han començat a donar resultats prometedors pel que es refereix a la implantació[37], la millora i la consolidació de l'AO en els futurs Grans Telescòpis⁵⁵.

Els registres recents de les imatges obtingudes pels grans telescopis de la Terra, quan utilitzen AO, presenten una notable millora respecte a les obtingudes sense emprar AO. S'ha observat, a més, com alguna d'aquestes imatges són equiparables, o millors, en qualitat, a les obtingudes pel telescopi espacial Hubble.

Detecció d'exoplanetes amb Òptica adaptativa


A més, l'AO en els grans telescopis, representarà una gran ajuda en la detecció i l'observació d'objectes de lluminositat molt tènues, com és el cas de planetes pertanyents a altres sistemes solars llunyans al nostre: els exoplanetes.⁵⁵ I és que la seua brillantor resulta tan feble, respecte a l'estrella al voltant de la qual orbiten, que no són observables sense AO.

De fet, fins ara s'han detectat utilitzant tècniques indirectes com són: l'efecte Doppler que presenta l'estrella (Sol) —a la qual pertany el planeta— per trobar-se orbitant al voltant del centre de masses del sistema estrella-planeta; o bé la disminució de lluminositat de l'estrella com a conseqüència del trànsit de l'exoplaneta per davant aquesta; (encara que esta situació és molt poc freqüent, ja que han de quedar alineats la l'estrella, l'exoplaneta i la Terra).

L'AO, junt amb tècniques interferencials entre grans telescopis connectats, possibilitarà registrar la llum d'exoplanetes i analitzar la seua composició; la qual cosa ens permetria avançar en la detecció i l'establiment d'un cens de sistemes planetaris pròxims al nostre durant la propera dècada. Açò ens permetrà aprofundir en la comprensió de la formació i l'evolució dels sistemes solars, com el nostre, i en la recerca i la localització d'alguna forma de vida en altres planetes[38]. El que era una quimera, tenir potencialitat per a cercar vida en altres llocs, diferents al nostre sistema planetari serà una realitat en les properes dècades.

Aplicació de l'òptica adaptativa a l'oftalmologia

Veurem ara com l'AO, a més d'aplicar-se per a realitzar estudis en la ciència bàsica i sobre objectes tan distants del nostre hàbitat quotidià —com ara-



les galàxies i els exoplanetes—, també es pot aplicar a un àmbit, més quotidià, relacionat amb el nostre entorn pròxim i de dimensions més humanes; em referisc a la millora i l'estudi de la visió humana (l'oftalmologia).

En efecte, l'ull humà no és, ni de bon tros, un sistema òptic perfecte, posseeix defectes en els diferents elements que el constitueixen i que són responsables d'introduir alteracions addicionals en el front d'ona de la llum que prové de l'escena observada. Els dits defectes es denominen aberracions, i la seua conseqüència és que l'ull genera imatges en la retina que no són tan nítides com podrien arribar a ser si es tractara d'un sistema òptic perfecte. Aquest esborronament o deformació en les imatges imposa el primer límit físic a la visió (prou més important que el límit teòric de la difracció, governat pel diàmetre de la pupil·la).

El multidisciplinari Helmholtz, un dels grans personatges de la ciència del segle XIX⁵⁶ i investigador de la visió humana, va arribar a la conclusió que l'ull, respecte a altres sistemes òptics artificials, era d'una qualitat pèssima. A ell s'atribueix la cèlebre frase[39]:

si un fabricant d'instruments tractara de vendre'm un aparell d'òptica amb una qualitat tan roïna com la de l'ull, el rebutjaria directament i el reprendria per la seua poca cura (Helmholtz, 1881)

Els defectes de desenfocament i d'astigmatisme, denominats aberracions de baix ordre (que seria un equivalent d'aberracions elementals), són molt coneguts i es corregeixen de manera rutinària en la pràctica clínica. La correcció del desenfocament, causant de la miopia, la hipermetropia i la presbícia (aquesta última fonamentalment associada amb l'edat) es realitza des del segle XIII, mentre que l'astigmatisme va ser corregit, per primera vegada, a principis del segle XIX per Thomas Young (1801), científic anglès que ja hem mencionat, pel seu famós experiment que demostrava la interferència de la llum. L'existència d'altres aberracions d'alt ordre en l'ull, distintes del desenfocament i de l'astigmatisme, van ser ben conegudes a partir de la segona meitat del segle XIX.

A pesar que els científics eren totalment conscients de la presència d'aquestes aberracions en l'ull, potser per no tractar-se d'un camp de ciència bàsica, i estar a cavall entre la física (òptica) i la medicina, el tema no va despertar excessiva atenció, i es va quedar en alguns pocs laboratoris d'investigació durant la major part del segle XX[40].

No obstant això, recentment, i fonamentalment em referisc a la darrera dècada, aquesta situació ha canviat de manera espectacular. En aconseguir posar a punt nous mètodes, més precisos i còmodes, per a mesurar les aberra-

cions de l'ull, diversos laboratoris d'investigació han demostrat el potencial de l'Òptica adaptativa en la correcció de les aberracions de l'ull.

Si som capaços de mesurar les aberracions oculars, resultarà possible corregir-les col·locant un corrector de front d'ona davant l'ull, de manera que introduïska justament les aberracions contràries. En un cas ideal, el sistema «Òptica adaptativa + ull»⁵⁸ es veuria lliure de manera permanent d'aberracions, i arrivaria a produir imatges «perfectes» en la retina. Aquestes tècniques s'han començat a aplicar en l'ull emprant com a sistemes correctors tant espills deformables, com en astronomia[41] –correcció per reflexió–, com moduladors espacials de la llum de cristall líquid[42] –correcció per transmissió.


Conseqüència de tot això és que els conceptes d'aberracions òptiques estan passant de ser una cosa exclusiva dels laboratoris d'investigació a estar presents en molts aspectes aplicats i clínics, i són idees ja familiars en Oftalmologia.

Així, la realització de cirurgia refractiva per foto-ablació corneal (LASIK: Láser in situ Keratomileúsis), dissenyada a partir de mesures d'aberració oculars prèvies permetrà millorar els resultats obtinguts. D'igual manera succeirà amb la cirurgia d'implantació de lents intraoculars (LIO) que podria realitzar-se amb lents personalitzades a les aberracions oculars que presenta el pacient.

Cap a les ulleres o sistemes de visió intel·ligents

D'altra banda, en el cas del seu ús en visió, en temps real, aquests dispositius són l'equivalent a unes ulleres optoelectròniques d'Òptica Adaptativa[43]. Aquesta és la manera més adequada de realitzar una correcció de les aberracions oculars, però de moment requereix instrumentació molt costosa i només pot utilitzar-se en molt pocs laboratoris en el món.

Tot i que l'aplicació comercial de l'AO, en tota la seua potencialitat, encara està per implantar-se i estendre's, ja han començat a desenvolupar-se alguns prototips senzills. Així, l'any 2001, un equip d'investigadors de la Universitat d'Arizona dirigit per N. Peyghambarian,⁵⁹ en col·laboració amb investigadors de l'Institut Tecnològic de Geòrgia, i amb la indústria privada, va iniciar el desenvolupament d'unes noves lents de cristall líquid, planes i commutables que poden canviar el seu enfocament de manera adaptativa. Es tracta d'un petit però important pas, per a aquells usuaris afectats de presbícia, que precisen lents bifocals. S'obre d'aquesta manera el camí cap al que s'ha anomenat les «ulleres intel·ligents». De moment el prototip desenvolupat sols commuta les lents a *on* i *off* per a canviar d'enfocament gràcies a un microxip; però l'ob-



jectiu que es persegueix és que el sistema actue com ho fa una càmera fotogràfica amb autoenfocament: les lents sabran on enfocar. Però es pretén anar encara més enllà: desenvolupar ulleres que corregiran de manera automàtica, i en cada instant, les aberracions que afecten els dos ulls, de manera que s'aconsegueixi una visió òptima[44].

Es podrien programar les nostres ulleres per a una visió fins i tot millor que la d'un observador normal; és a dir, superar la seua agudesa visual (l'angle més petit que ha de subtendir un detall perquè puguem veure'l), però ens trobaríem amb el problema que la nostra retina té un cert límit per trobar-se *pixelada* pel mosaic de fotoreceptor.⁶¹


En una direcció semblant a la del grup d'Arizona, encara que en un aspecte complementari, un equip d'investigadors de la Universitat de Santiago de Compostel·la, de l'Applied Optics Institute de Varsòvia i el Grup de Recerca d'Òptica de l'UJI, al què pertany, hem desenvolupat un sistema d'òptica adaptativa, basat en pantalles de cristall líquid comercials tipus TNLCD (Twisted Nematic Liquid Cristal Display), semblants a les que s'utilitzen en els video-projectors, la qual cosa abarateix en gran manera els costos del dispositiu d'Òptica adaptativa (almenys si es compara amb els sistemes d'AO basats en espills deformables continus).

La característica singular del nou sistema d'AO, consisteix que es tracta d'una tecnologia capaç de mesurar i compensar les aberracions d'un front d'ona, en general, i de les aberracions oculars, en particular,⁶² i que s'utilitza com a únic element optoelectrònic la pantalla LCD, per a mesurar i corregir no sols les aberracions de primer ordre (miopia, hipermetropia...) sinó també les petites aberracions (conegudes com a aberracions d'ordre superior)[45].

Aquest nou sistema, a diferència del presentat anteriorment, no precisaria emmagatzemar amb antelació les dades dels defectes visuals de l'observador en el microxip, sinó que per tractar-se d'un sistema d'AO, en el nostre cas el microxip registraria, en cada moment, l'estat aberrat del sistema visual de l'observador i, per mitjà d'un senyal elèctric, configuraria la pantalla de cristall líquid per a obtenir la millor compensació de les aberracions i, per tant una visió òptima –i això pràcticament en temps real.

Finalment cal assenyalar que una altra de les grans expectatives dipositades en l'aplicació d'aquest sistema a la compensació de les aberracions oculars és la de millorar la inspecció física del fons ocular, la qual cosa posseeix un elevat interès des del punt de vista clínic.

Com a conclusió, podem dir que aquesta nova tecnologia per a la mesura i la correcció de les aberracions oculars, ha permès avançar molt, en els darrers anys, en el coneixement dels mecanismes de formació d'imatges de l'ull en la retina i en el de processos biològics com l'acomodació i la presbícia, l'en-



velliment del sistema ocular i el desenvolupament de la miopia. L'AO està tenint gran repercussió en la pràctica clínica de l'oftalmologia i l'optometria pel seu caràcter no invasiu. A més, l'AO resulta de gran utilitat per a avaluar (i corregir) els resultats de la cirurgia de cataractes amb implant de lents, o en la diagnosi de patologies oculars. Aquesta correcció d'aberracions mitjançant l'AO, obre la possibilitat no sols d'una millora de la qualitat visual, també la millora de la resolució i el contrast de les imatges del fons ocular. Així, la previsible visualització de l'estructures retinianes de *in vivo*, fins ara aconseguides sols en mostres histològiques, permetrà avançar en el diagnòstic precoç de certes patologies i en una millor monitorització de possibles teràpies[46]; al remat: *l'ull veurà molt millor, i veurem millor l'ull.*

En tots dos casos que he exposat, l'AO ens ajuda a millorar la visió a través de les finestres que utilitzem per a escrutar l'univers i el món que ens envolta: les grans finestres dels telescopis, i les petites finestres dels nostres ulls. Si som capaços de veure millor els fenòmens que es desenvolupen al nostre voltant, de segur que tindrem més facilitat per a entendre les lleis que els governen; el que serà un guany per a la física en particular i per la Ciència en general.

I amb açò done per conclosa aquesta lliçó d'inici de curs, confiant que la velocitat de vertigen a la que hem viatjat per l'Òptica, no us haja incomodat. Espere que, encara que el paisatge de l'òptica haja travessat ràpidament per davant dels vostres ulls, algunes de les seues imatges hagen quedat gravades en la vostra consciència, i hagen respost a allò que us heu preguntat alguna vegada, o... el que és encara més interessant, que hagen servit per a despetar la vostra curiositat, i us hagen fet plantejar-vos noves qüestions.

Moltes gràcies per la vostra atenció.

Castelló de la Plana, a 21 de setembre de 2007

Referències

- [1] R.P. Crease, «The most beautiful experiment», *Physics World* **15**(9), 19 (2002).
- [2] M.L. Lozano, «De Arquímedes a Einstein. Los diez experimentos más bellos de la física», DeBolsillo (Random House Mondadori, S.A.), Barcelona (2003).
- [3] I. Newton «Optics», Dover Publications, New York (1952). També existeix la traducció de C. Solis: I. Newton, «Óptica», Ed. Alfaguara, S.A., Madrid (1977).
- [4] T. Young, *Phil. Trans. Roy. Soc.* **12**, 387, London (1802).
- [5] C. Jönson, «Electron diffraction at multiple slits». *Am. J. Phys.* **42**, 4 (1974) versió anglesa de l'article: C. Jönsson, *Zeit. Physik* **161**, 454 (1961).
- [6] E. Hecht, «Óptica», Addysson Wesley Iberoamericana, Madrid (2000).
- [7] V. Ronchi, «The nature of light», Heinemann, London (1970).
- [8] M. H. Shanon (ed.), «Great experiments in Physics», Dover, New York (1987).
- [9] B. Vohnsen, «A short history of optics», *Physica Scripta* **T109**, 75 (2004).
- [10] M. Born and E. Wolf, «Principles of Optics», Pergamon Press, Oxford (1989).
- [11] A. Zajonc, «Catching the light: the Entwined history of light and mind», Oxford University Press, Oxford (1995).
- [12] D. Park, «The fire within the eye», Princenton University Press (1999).
- [13] R. Descartes, «Dioptrique. Météores», Leyden (1637).
- [14] F. M. Grimaldi, «Physico-Mathesis de lumine, coloribus, e iride», Bolonia (1665).
- [15] C. Huyguens, «Traité de la lumière», Leyden (1690).
- [16] H. Crew (ed.), «The wave theory of light, memoirs by Huyguens, Young and Fresnel», American Book Company, New York (1900).
- [17] J. C. Maxwell, «A treatise on electricity and magnetism», Dover, New York (1954).
- [18] L. Lederman, «La partícula divina», Crítica, Barcelona (1996).
- [19] S. Weinberg, «El sueño de una teoría final», Crítica, Barcelona (2004).
- [20] G. N. Lewis, «The conservation of photons», *Nature* **118**, 874 (1926).
- [21] D. Gabor, «A new microscopic principle», *Nature* **161**, 777 (1948).
- [22] P. Gordon, «The MASER», *Sci. Am.* **199**, 42 (1958).
- [23] A. L. Schawlow and C. H. Townes, «Infrared and optical masers», *Phys. Rev.* **112**, 1940 (1958).
- [24] T. H. Maiman, «Stimulated optical radiation in ruby», *Nature* **187**, 493 (1960).
- [25] L. Roso, «Dispositivos fotónicos», *Revista Española de Física* **17**(1), 51 (2003).
- [26] <http://www.physics.gatech.edu/frog>

- [27] E. Muybridge, «Muybridge's Complete Human and Animal Locomotion» Vol. III, (1887).
- [28] <http://docedgertonvideo.techtv.mit.edu/>
- [29] M. Didomenico, «Small-signal analysis of internal (coupling type) modulation of lasers», *J. Appl. Phys. Lett.* **35**, 2870 (1964).
- [30] L. Hargrove et al., «Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation», *Appl. Phys. Lett. A*, **5**, 4 (1964).
- [31] S. Nolte, «Micromachining» in *Ultrafast optics: technology and applications*, Marcel and Dekker, (2003).
- [32] T. Juhasz et al., «The femtosecond blade: new developments in corneal surgery», *Optics and Photonics New. Optics & Photonics News*, Jan, 24 (2002).
- [33] J. W. Lichtman, «Microscopía confocal», *Investigación y Ciencia. Temas* **29**, 32 (2002).
- [34] W. R. Zipfel, «Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences», *Nature Biotechnology*. **21**, 1369 (2003).
- [35] A. H. Zewail, «Femtochemistry», *Journal of Physical Chemistry*. **97**, 12427 (1993).
- [36] S. Arribas, «El telescopio espacial Hubble y su sucesor», *Revista Española de Física*. **17**(4), 17 (2003).
- [37] L. A. Thomson, «Adaptive optics in astronomy», *Physics Today* **47**, 24 (1994).
- [38] R. Rebolo, «Exoplanetas», *Revista Española de Física*. **17**(4), 29 (2003).
- [39] von Helmholtz. Popular scientific lecturers (1881).
- [40] P. Artal, «Hacia las fronteras de la óptica visual: soluciones para ver mejor», Discurso de ingreso como académico numerario a la Real academia de las Ciencias de la Región de Murcia, Murcia (2003).
- [41] J. Liang, D. R. Willians and D. T. Milleer, «Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics», *J. Opt. Soc. Am. A*, **14**, 2884 (1997).
- [42] F. Vargas-Martin, P. Prieto and P. Artal, «Correction of the aberrations in the human eye with liquid crystal spatial light modulators: limits of performance», *J. Opt. Soc. Am. A*, **15**, 2552 (1998).
- [43] E. J. Fernández, I. Iglesias and P. Artal, «Closed-loop adaptive optics in the human eye», *Opt. Lett.* **26**, 746 (2001).
- [44] T. Feder, «Goodbye, bifocals», *Physics Today* **59**(8), 27 (2006).
- [45] V. Durán, V. Climent, E. Tajahuerce, Z. Jaroszewicz, J. Arines and S. Bará, «Efficient compensation of Zernike modes and eye aberration patterns using low-cost spatial light modulators», *J. Biomed. Opt.* **12** 014037 (2007).
- [46] S. Marcos, «Calidad óptica del ojo», *Investigación y Ciencia*, junio, 66 (2005).

Notes

1. Després dels incendis d'aquest estiu de 2007, també el foc hauria d'haver anat a escola.

2. El 23 d'octubre de 2002.

3. Si considerem la necessitat de la llum solar i la importància que en la seua elaboració posseeixen les ombres geomètriques, l'experiment d'Eratòstenes es podria entendre, en certa mesura, vinculat a l'òptica.

4. En honor a la veritat, cal dir que durant molt de temps aquest va ser un «*gedankenexperiment*» –un experiment mental– que Feynman es va dedicar a interpretar de manera exhaustiva, però no es va realitzar fins molt de temps després, el 1961, per Claus Jönsson a Tubingen.

5. L'altra va ser la teoria de la relativitat general d'Einstein.

6. Hero d'Alexandria i Ptolemeu sostenien aquesta hipòtesi.

7. Es va produir un parèntesi d'aproximadament vuit segles a Occident, en els que l'òptica va quedar sumida, diguem-ne, en la més absoluta «fosc».

8. D'origen iraqüà, Al-Haitham (965-1039), va ser conegut en el món occidental com Alhazen.

9. Va introduir termes que empram encara avui per a identificar parts de l'ull: retina, còrnia, humor aquós...

10. A les darreries del segle XIII, es té coneixement de la fabricació de lents de vidre, per part d'artesans del nord d'Itàlia (en aquesta zona estava molt desenvolupada la tecnologia del poliment dels vidres), les quals eren utilitzades com a ulleres de llarga vista, per a corregir la pèrdua de visió deguda a la presbícia (la pèrdua del poder d'acomodació del cristal·lí, com a conseqüència de l'edat).

11. El que li va costar, a pesar de la renúncia pública de les seues idees, el càstig de la Santa Inquisició. Es comenta que tot just abjurar-ne, va murmurar, quasi de manera imperceptible, allò de «*eppur si muove*» (i no obstant això, es mou). 350 anys ha tardat l'Església Catòlica a reconèixer, davall el papat de Joan Pau II, l'errada per haver-lo comenat.

12. També és cert que en va vendre un altre al senat de Venècia ja que era una eina molt útil en les batalles navals per a veure abans les naus enemigues en l'horitzó: transferència de tecnologia!

13. Aquest resultat seria de gran importància en molts sistemes òptics dissenyats posteriorment i, especialment, en el desenvolupament del que havien de ser els elements de comunicació òptica per excel·lència: les fibres òptiques.

14. Curiosament Newton va nàixer el mateix any en què va morir Galileu.

15. Fonamentalment per dos motius, perquè, evidentment, s'eliminen les aberracions cromàtiques, i perquè quan es requereix un telescopi amb un diàmetre considerable, resulta molt difícil aconseguir un objectiu (lent) de vidre que no presente inhomogeneïtats que devaluen la seua qualitat (per no parlar del cost de polir de la lent, del seu pes...).

16. Al fenomen de dependència de l'índex de refracció amb la longitud d'ona se'l coneix amb el nom de dispersió.

17. El motiu principal de Newton per a rebutjar la teoria ondulatòria, tal com s'entenia llavors, era el descoratjador problema d'explicar la propagació rectilínia de la llum; ja que les ones es propaguen en totes les direccions.

18. Les bandes resulten acolorides si la font de llum és blanca (o policromàtica); al contrari, el patró de franges passa a ser monocromàtic (bandes brillants i fosques) si la font és monocromàtica o quasimonocromàtica).

19. A pesar d'açò, ambdues teories explicaven la llei de la refracció.

20. Avui se sap que aquests receptors són els tres tipus de cons S, M i L, que junt amb els bastons constitueixen els quatre tipus de receptors, sensibles a la radiació visible, que conformen la retina.

21. El patró d'interferències que va obtenir li va permetre estimar la longitud d'ona de la llum, i va obtenir, en el cas de la llum roja, una longitud d'ona de $\sim 0,71$ micròmetres, i en el cas de la llum blava $\sim 0,42$ micròmetres. Es considera que el rang visible va dels 0,40 als 0,70 micròmetres.

22. No obstant això, finalment va ser ell qui va proposar a Fresnel que considerara el moviment ondulatori transversal.

23. Resulta curiós recordar una anècdota que es va produir respecte d'açò. Aleshores l'Acadèmia de les Ciències Francesa, havia convocat un concurs sobre treballs que ajudaren a dilucidar la naturalesa de la llum. Fresnel va remetre el seu treball a la mencionada competició, va guanyar el concurs, i va posar punt i final a la descripció corpuscular de la llum. Una anècdota curiosa, respecte al citat esdeveniment, va ser que Poisson, que formava part del comitè d'avaluació, com a bon membre del comitè, va estudiar a fons la teoria proposada per Fresnel, i va arribar a la conclusió que si el model de Fresnel era cert, llavors quan un feix il·luminara un disc pla opac, a una certa distància d'ell, en el centre del que havia de ser la seua ombra geomètrica, hauria d'aparèixer un punt brillant; per la qual cosa va considerar que el model de Fresnel era erroni. Quan posteriorment es va realitzar l'experiència, un punt petit però brillant va aparèixer en el centre de l'ombra geomètrica, la qual cosa va permetre consolidar la naturalesa ondulatòria de la llum i el nou model de Fresnel que la sostenia. Curiosament, en l'actualitat el dit fenomen esconeix amb el nom de *spot de Poisson*, en honor de qui per primera vegada va parlar-ne, encara que amb completa incredulitat.

24. Junt amb Arago, va realitzar experiències en què després de fer incidir un feix de llum sobre un vidre de calcita (que a causa de la seua anisotropia presentava el fenomen de la birefringència), feia interferir els dos feixos que emergien d'aquest (el feix ordinari i l'extraordinari), sense trobar interferències, per la qual cosa va concloure que ambdues ones presentaven una polarització de caràcter transversal i, a més, una respecte a l'altra es trobaven polaritzades ortogonalment.

25. Lederman assenyalava, amb sorna, que els estudiants de física haurien hagut de fer pesos per a portar samarretes tres vegades extrallargues on caberen les llargues i complicades equacions matemàtiques de Maxwell.

26. Pareix que Michelson es referia ací a l'influent físic escocès William Thompson; també conegut com a Lord Kelvin.

27. En defensa de Michelson, cal dir que era un excel·lent físic/òptic experimental, dedicat a la mesura de les coses petites (fraccions de la longitud d'ona de la llum; és

a dir, de l'ordre del micró o fraccions de micró —curiosament una milionèsima de metre, o el que és el mateix: la sisena xifra decimal!), i que la lectura de les seues últimes paraules podia entendre's com una premonició: que els futurs canvis en la física caldria trobar-los en el més petit) i, en una part rellevant —la mecànica quàntica—, així va succeir.

28. Un cos absorbent perfecte que, en ocasions, es representa com una cavitat amb un petit orifici, les parets del qual posseeixen una gran absorció de manera que qual-sevol radiació que penetra per l'orifici finalment s'absorbeix

29. I com que no ho va aconseguir, el van titllar de «catàstrofe ultravioleta»; simplement perquè el model que havien proposat Rayleigh i Jean, només s'ajustava a les grans longituds d'ona, però no a les longituds d'ona més petites (i.e., les corresponents a l'espectre UV).

30. Un comentari al marge[18]: El 1990, el Satèl·lit Explorador de Fons Còsmic (COBE) va registrar i va transmetre als astrofísics informació sobre la distribució espectral de la radiació còsmica de fons que impregna l'espai sencer. Les dades, d'una precisió sense precedents, concordaven de manera exacta amb l'expressió obtinguda per Planck, per a la radiació del cos negre. La corba de la distribució de la intensitat de la llum permet definir la temperatura del cos que emet la radiació. Amb les dades del satèl·lit COBE i de l'equació de Planck, els astrofísics van poder calcular la temperatura mitjana de l'univers. Fa molt de fred ací fora: 2,73 graus sobre el zero absolut; o el que és el mateix, uns -270°C (l a la Terra amb problemes d'escalfament terrestre!).

31. Actualment estimada en 13.700 milions d'anys des del Big Bang, segons dades registrades pels satèl·lits COBE i WMAP, pertanyents a la NASA, i dedicats a captar la radiació de fons de l'univers.

32. Açò es mostrava en la segona fotografia de la sèrie «Annie G. galopant» en E. Muybridge, «Complete Human and Animal Locomotion», làmina 626 (1887).

33. Potència = Energia/temps.

34. Pel fet que tots els nivells espectrals posseeixen una amplitud, i aleshores les transicions d'un nivell a un altre generen radiacions amb freqüències lleugerament diferents.

35. Que la longitud d'ona de la cavitat siga igual a un nombre sencer, de vegades la longitud d'ona de la radiació: $L = n\lambda$.

36. Que depèn, entre altres coses, del medi actiu i de la cavitat.

37. Amb un làser de He-Ne amb una amplitud de banda entre modes d'1,5GHz, es poden obtenir polsos d'uns 300 picosegons de duració, mentre que amb un làser de Tu:Za, aquesta duració pot ser de tan sols 3,4 femtosegons.

38. Minsky pretenia registrar totes les connexions neuronals del cervell per a, així, avançar en la comprensió del seu funcionament i, especialment, en reproduir un simulador neuronal en l'àmbit de la intel·ligència artificial.

39. L. Basiares i L. González, «Química bajo control», *El País* 07-01-2004.

40. Basta recordar l'inici de la tecnologia ultraràpida.

41. Diàmetre de l'objectiu, en el cas d'un telescopi refractor; o diàmetre de l'espill, en el cas d'un telescopi reflector.

42. Hi ha una raó filosòfica inherent al límit que imposa la difracció: Com recons-

truir un llibre a partir d'una sola pàgina, o de dues pàgines, o un nombre limitat de pàgines? Per a reconstruir el llibre (tota la informació) fan falta totes les seues pàgines. D'igual manera, podem pensar que una font puntual —estrella— no es pot reconstruir totalment a partir d'un tros del seu front d'ones esfèric, és a dir, utilitzant tan sols una fracció de la informació que l'estrella està emetent en un instant donat.

43. «Si a la llarga la teoria dels telescopis es poguera portar plenament a la pràctica, quedarien, no obstant això, uns límits que els telescopis no podrien sobrepassar, ja que l'aire a través del qual mirem les estrelles tremola perennement com pot veure's pel moviment tremolós de les ombres projectades per torres elevades i per la titil·lació de les estrelles fixes».

44. De manera semblant a com es corregeixen les aberracions oculars amb vidres.

45. Una resolució duess ordres de magnitud inferior de la teòrica.

46. Inicialment concebut en els anys 40, dissenyat i construït en les dècades dels 70 i 80, i situat en òrbita per la tripulació del transbordador espacial Discovery a l'abril de 1990, deu el seu nom al gran astrofísic E. Hubble, descobridor del corriment al roig en l'espectre de les estrelles, i que va resultar ser la primera verificació experimental de l'expansió de l'univers. D'acord amb la planificació actual, estarà operatiu fins al 2010, un any abans del llançament del seu successor, el James Webb Space Telescope (JWST), també conegut com a Next Generation Space Telescope (NGST), que amb un espill de 6 m de diàmetre, i optimitzat per a l'infraroig pròxim, permetrà estudiar l'univers llunyà (primitiu) fins a l'època de la primera llum.

47. És un telescopi de reflexió aplanàtic, tipus Cassegrain, amb espills hiperbòlics, de 2,4 m de diàmetre.

48. El HST pot «vore» en el rang que va des de les 2,5 microns, en l'infraroig, fins a els 115 nanòmetres de l'ultraviolat; la qual cosa complementa les observacions realitzades des dels grans telescopis terrestres que poden proporcionar imatges limitades per la difracció, però això només succeeix per a longituds d'ona superiors a les 10 micres.

49. A base de l'enviament de missions espacials. A més l'equipament queda obsolet als pocs anys de la posada en marxa, i no sempre resulta senzilla la seua reparació i actualització.

50. Encara que puguen parèixer longituds molt petites, en òptica són molt importants.

51. Mitjançant l'aplicació d'un voltatge petit exerceix una variació de longitud.

52. És a dir $1/25$ de longitud d'ona.

53. Atès que les condicions atmosfèriques es modifiquen cada milisegon.

54. Ens referim a una estrella fixa, pertanyent al fons d'estrelles: puntuals i considerades a una distància pràcticament infinita.

55. Longitud d'ona corresponent al doblet visible, i intens, de l'espectre del sodi.

56. Entre els quals convé assenyalar el recent inaugurat GranTeCan (Gran telescopi de Canàries), de més de 11 m de diàmetre, per al quals va ampliar el seu pressupost en 1600 milions d'euros, amb la finalitat d'incorporar-li un sistema d'AO que en la millorava la seua capacitat.

57. Perceptible, especialment, quan l'exoplaneta posseeix una masa considerable; en cas contrari, el centre de masses es toba tan pròxim a l'estrella, que aquesta a penes presenta moviment de revolució.



58. De qui s'afirma que era un excel·lent fisiòleg, i que va estudiar física per a entendre amb més profunditat els processos fisiològics relacionats amb la percepció acústica i visual, i que per a sorpresa de tots va ser, encara, millor físic que fisiòleg; però que posteriorment va necessitar estudiar matemàtiques per a arribar a un coneixement més profund de la física, i llavors per a gran admiració de tots, va ser, encara, millor matemàtic que físic.

59. Sempre existeix el límit de la difracció.

60. Expert en fotònica, sistemes làser i ciència dels materials —torna la interdisciplinarietat.

61. Aconseguir una agudesa visual excessiva, en el cas, de l'ull potser no condueix al que s'anomena «supervisió», ja que si els detalls són inferiors a la grandària dels fotoreceptors de la retina (cons i bastons), apareixen efectes no desitjats com ara el «alliasing».

62. Tant des del punt de vista de l'observador (perquè les imatges que es formen en la seua retina siguin de més qualitat); com des del punt de vista clínic de la inspecció ocular (per a tenir tindre unes imatges nítides del fons ocular, no distorsionades pels múltiples defectes de l'ull).