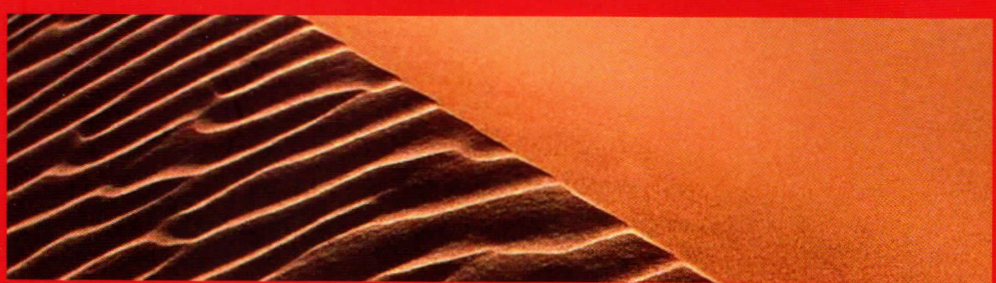
AULA DE CIÈNCIA
I CULTURA, 17

Física de la quotidianitat

II Cicle Francesc Salvà i Campillo



David Jou i Josep Enric Llebot (eds.)

Marià Baig
Albert Bramon
Antoni M. Correig
David Jou
Josep Enric Llebot
Tomàs Molina
Gaspar Orriols
Jordi Pascual
Àlvar Sanchez

FUNDACIÓ Caixa Sabadell

AULA DE CIÈNCIA
I CULTURA, 17

Física de la quotidianitat

II Cicle Francesc Salvà i Campillo

David Jou i Josep Enric Llebot (eds.)

Marià Baig, Albert Bramon, Antoni M. Correig, David Jou, Josep Enric Llebot, Tomàs Molina, Gaspar Orriols, Jordi Pascual, Àlvar Sánchez

Aquesta obra recull les conferències pronunciades entre els dies
5 de març i 16 d'abril del 2002 a l'Auditori de la Caixa de Sabadell

Catalogació en publicació de la
FUNDACIÓ CAIXA DE SABADELL

Física de la quotidianitat: II cicle Francesc Salvà i Campillo / David Jou, Josep Enric Llebot, eds. - (Aula de ciència i cultura ; 17)

Conté: De la física bàsica als nous materials / Jordi Pascual; Làsers i fotònica / Gaspar Orriols; La superconductivitat i la tecnologia del futur / Alvar Sánchez; El canvi climàtic avui / Josep Enric Llebot; La meteorologia, fins on podem millorar les nostres prediccions / Tomàs Molina; Màquines tèrmiques i ecologia / David Jou; La realitat quàntica: del gat de Schrödinger als ordinadors del futur / Albert Bramon; La predicció de terratrèmols: serà possible alguna vegada? / Antoni M. Correig; Òptica atmosfèrica. La física del paisatge / Marià Baig

I.Fundació Caixa Sabadell
II. Jou, David, ed..
III. Llebot, Josep Enric, ed.
1.Física - Conferències
2. Fundació Caixa Sabadell - Conferències
53(042)

Edita: Fundació Caixa de Sabadell, 2002
Carrer d'en Font, 25, 08201 - Sabadell
Tel.: 93 725 95 22 A/e: *fundacio@caixasabadell.org*

© Marià Baig, Albert Bramon, Antoni M. Correig, David Jou, Josep Enric Llebot, Tomàs Molina, Gaspar Orriols, Jordi Pascual, Àlvar Sanchez.

Fotocomposició i producció: *Addenda*, s.c.c.l., Pau Claris, 92, Barcelona

Impressió: Winihard Gràfics, S.L., Polígon industrial, Av. del Prat s/n, Moià

Imprès sobre paper ecològic

ISBN: 84-95166-42-9

Dipòsit legal: B - 48.225 - 2002

Òptica atmosfèrica

La física del paisatge

Marià Baig

Grup de Física Teòrica. Universitat Autònoma de Barcelona

Tot observant el cel, al llarg del dia ens podem fer innombrables preguntes: Per què el cel és blau? Per què al capvespre el cel es torna ataronjat o vermell? Per què els núvols són blancs? Per què de vegades es veuen halos al voltant del Sol o la Lluna? Exemples de moltes altres preguntes que els homes s'han fet al llarg de segles de contemplació de la natura. I les respostes han anat variant d'acord amb l'època. Segurament, a l'Edat mitjana, l'única resposta seria que... Deu ho va fer així, si és que algú s'ho arribava a preguntar. Amb el desenvolupament de la ciència moderna, però, aquestes qüestions entraren en els dominis de la física, en general, i de l'òptica, en particular.

Galileu va posar les bases de la descripció fisicomatemàtica de la natura. El mèrit de Galileu, però, recau en el fet que va saber com interrogar la natura per descobrir les seves lleis. Com que la caiguda d'un cos era massa ràpida per poder mesurar la seva posició en instants de temps regulars, Galileu va construir un pla inclinat i va mesurar com queia una bola, aquest cop, però, molt més lentament. Els progressos de la física es van produir gràcies al fet de poder separar els efectes que intervenen en un fenomen determinat i experimentar-los en condicions avantatjoses.

Des dels temps de Newton, les bases de la mecànica i de l'òptica geomètrica són ben conegudes. Els desenvolupaments de la teoria ondulatòria de la llum i de l'electromagnetisme han permès comprendre la natura de la llum i del color. Ara bé, l'explicació de molts fenòmens de la Naturalesa continua sent, de vegades, una qüestió polèmica, ja que normalment són el resultat combinat de múltiples efectes contraposats, que es manifesten en una escala que no podem reproduir al laboratori.

LA LLUM I LA VISIÓ

El diccionari ens diu que la llum és *«una forma d'energia que per la seva acció sobre els ulls ens fa veure els cossos»*. Una definició que pot ser molt simplista, però que ens posa sobre la pista de dos aspectes fonamentals que hem de tenir en compte a l'hora de tractar aquest tema: la llum és, en primer lloc, un fenomen físic —una forma d'energia—, subjecte, per tant, a les lleis de la física. Però això no és tot, ja que la segona part

ens diu que la llum és un fenomen sensorial —ens permet de veure els cossos— i que, per tant, té una acció sobre els nostres sentits, de la qual no podem —ni volem— sostraure'ns fàcilment.

Llum i visió, dos aspectes d'una mateixa naturalesa, que s'han confós en moltes teories o explicacions sobre el que realment és la llum.

ELS ORÍGENS DE L'ÒPTICA

Els inicis de l'estudi de la llum els hem de buscar a l'antiga Grècia, amb Demòcrit, Plató i Aristòtil. Els àrabs continuaren els estudis dels grecs i precursors, com Ibn al-Haytham (965-1039), conegut amb el nom d'Alhazen, i realitzaren ja acurades observacions de fenòmens òptics atmosfèrics, com l'arc de Sant Martí o l'halo que es veu de vegades al voltant de la Lluna.

En el segle XVII, es va produir la formulació de l'òptica geomètrica. El mateix Johannes Kepler (1571-1630) va escriure, el 1611, un tractat anomenat *Dioptrice*, i René Descartes (1596-1650), una *Dioptrique*, el 1637. El concepte de raig lluminós i el seu comportament en passar d'un medi a l'altre hi són ja plenament desenvolupats. Fins i tot en l'obra de Descartes podem trobar uns esquemes molt acurats del funcionament de l'ull, incloent-hi la formació d'imatges sobre la retina, en passar la llum a través del cristal·lí.

Pierre de Fermat (1601-1665) representa la culminació de la formulació de l'òptica geomètrica. El principi de Fermat *«el camí òptic té un valor extrem, màxim o mínim, respecte a qualsevol altre camí òptic que hom pugui considerar»* permet deduir matemàticament les fórmules de la reflexió i de la refracció de la llum. L'òptica geomètrica restava formulada en llenguatge matemàtic

REFLEXIÓ I REFRACCIÓ DE LA LLUM

Quan un raig de llum incideix sobre un mirall, aquest raig es reflecteix de tal manera que els angles d'incidència i reflexió són iguals. Quan una superfície verifica que la llum es reflecteix d'aquesta manera, parlem d'una *reflexió especular*. No totes les superfícies, però, reflecteixen la llum de forma especular. Les superfícies rugoses reflecteixen la llum en totes les direccions, i parlem llavors de *reflexions difuses*.

Quan un raig de llum passa d'un medi a un altre, per exemple de l'aire a un vidre, experimenta *refracció*, és a dir, la trajectòria del raig es desvia d'acord amb la llei de Snell. Per exemple, si prenem un vidre pla, com el d'una finestra, un raig de llum perpendicular al vidre sortirà per l'altra banda sense cap desviació. Si no incideix perpendicularment, però, sofrirà una desviació en el moment d'entrar en el vidre i una altra (igual

i oposada) en sortir per l'altra banda. El resultat global és que el raig de sortida és paral·lel a l'incident, però desplaçat de la seva posició.

En una situació real reflexió i refracció estan presents. El raig que incideix inclinat sobre el vidre es reflectirà parcialment, i parcialment es refractarà cap a l'interior del vidre. Més encara, un raig de llum que va per l'interior d'un vidre, si l'angle d'incidència sobre la paret exterior és suficientment petit, no aconsegueix refractar-se i es reflexa completament cap a l'interior del vidre. Parlem, llavors, de reflexió interna total. Aquest efecte està a la base del funcionament de les fibres òptiques, que propaguen la llum pel seu interior.

NEWTON: LLUM I COLOR

El 8 de febrer de 1672, sir Isaac Newton (1642-1727) va presentar a la *Royal Society* de Londres el seu darrer descobriment, la descomposició de la llum blanca en colors en passar per un prisma de vidre. Tres anys després, Newton tenia enllestida ja una teoria completa sobre la naturalesa de la llum i els colors. Bàsicament, creia que la llum estava formada per corpuscles, diferents per a cada color, que es comportaven segons les lleis de la mecànica. La teoria de Newton, però, fou contestada molt aviat per altres investigadors, com ara Christian Huygens (1629-1695), que hi proposaren teories alternatives.

La descomposició de la llum en colors per un prisma de vidre és la base d'un instrument anomenat *espectroscopi*, que permet saber quins components de color té la llum provinent d'una determinada font lluminosa —com el Sol o una flama. La raó de la separació dels colors l'hem de buscar en el diferent angle de desviació que experimenta la llum en refractar-se, segons quin sigui el seu color. En sortir del prisma, els raigs corresponents a cada color no surten amb el mateix angle i se separen. L'espectroscopi ha resultat ser un instrument decisiu per al desenvolupament de la ciència, i ha donat lloc a tota una disciplina científica, l'espectroscòpia.

En honor a la veritat, però, hem de deixar constància que el mateix Leonardo da Vinci (1452-1519) ja havia observat la descomposició de la llum blanca en colors. Ara bé, això ho hem sabut només molt recentment, gràcies als comentaris i dibuixos que va deixar en un *còdex*, però en la seva època no es va divulgar, i Newton, per tant, ho va descobrir de nou.

LA TEORIA ONDULATÒRIA: INTERFERÈNCIA I DIFRACCIÓ

A finals del segle XVIII, les evidències en contra de la teoria corpuscular de Newton van ser aclaparadores, especialment després de les investigacions de Thomas

Young (1773-1829). En efecte, s'observaren, llavors, tota una sèrie de fenòmens només atribuïbles a les ones: interferència i difracció. Agustin-Jean Fresnel (1788-1827) va publicar, l'any 1815, el llibre *La diffraction de la lumière*, el tractat definitiu per a la confirmació de la naturalesa ondulatòria de la llum.

Els fenòmens ondulatoris no eren pas uns desconeguts. Tots hem observat el comportament de les ones sobre la superfície de l'aigua i la manera com se sobreposen les ones procedents de punts diferents. El fenomen de la superposició és la clau per entendre la interferència i la difracció. Quan a un mateix punt arriben dues ones, el moviment real del punt és la suma dels moviments que li causarien les dues ones per separat. Així, si les ones hi arriben en fase, els seus efectes s'amplifiquen... però si hi arriben amb fases oposades, no hi ha moviment.

Podem veure el fenomen d'interferència de la llum enviant un raig de llum sobre d'una doble escletxa. Els raigs de llum que provenen d'una escletxa i l'altra interfereixen mútuament i sobre una pantalla es formen bandes clares i fosques. En la difracció, un raig de llum que passa per un forat petit forma, sobre una pantalla situada a l'altra banda, una taca lluminosa rodejada de cercles concèntrics, alternativament clars i foscos. L'observació d'aquests efectes va suggerir la naturalesa ondulatòria de la llum.

LA TEORIA ELECTROMAGNÈTICA

No fou fins als treballs de James Clerk Maxwell (1831-1879) que es va poder avançar en el coneixement la naturalesa de la llum. Maxwell va publicar, l'any 1873, el seu *Treatise on Electricity and Magnetism*, que culmina el llarg procés de comprensió dels fenòmens elèctrics i magnètics. Neixia l'electromagnetisme en la seva formulació actual.

Una de les conseqüències dels treballs de Maxwell va ser la predicció de l'existència d'ones electromagnètiques, és a dir, d'oscil·lacions periòdiques dels camps elèctrics i magnètics, que es propagarien a una velocitat que va resultar ser la mateixa que la de la llum. Poc després, Heinrich Hertz (1857-1894) va demostrar experimentalment la realitat de les ones electromagnètiques. Es va comprendre, llavors, que la llum era una forma de radiació electromagnètica.

El conjunt de les ones electromagnètiques de diferent freqüència es coneix amb el nom d'espectre electromagnètic. Les freqüències més baixes —que corresponen a longituds d'ona més llargues— són les ones de ràdio. Totes elles tenen longituds d'ona de més de 10 cm i són poc energètiques. Entre 10 cm i 0,1 cm hi ha la regió de les microones. A continuació vénen els infrarojos, que tenen longituds d'ona entre el mil·límetre i els 700 nanòmetres, que és on comença l'espectre visible. La llum violada té uns 400 nanòmetres i per sota d'ella comencen els raigs ultraviolats, fins arribar als 10^{-6} cm. Els raigs X comprenen la regió entre els 10^{-6} cm i els 10^{-9} cm, i per sota d'aquesta longitud

d'ona hi ha els raig gamma. Els raigs X i els raig gamma es consideren radiacions ionitzants i els seus efectes sobre els éssers vius poden ser molt perillosos.

La llum visible, entre els 400 i els 600 nanòmetres, constitueix, doncs, una molt petita part de l'espectre electromagnètic.

ESPECTRE SOLAR

El Sol és un potent emissor d'ones electromagnètiques. A banda d'emetre llum visible, el Sol emet en la regió infraroja, de 700 a 3.200 nanòmetres, i en la ultraviolada, de 225 a 400 nanòmetres. La radiació infraroja és la responsable de l'escalfament del planeta i una part d'ella és absorbida per l'atmosfera, igual que bona part de la ultraviolada. La radiació que ens arriba a la superfície no és, per tant, igual a la que emet el Sol.

La distribució de freqüències de la radiació que emet el Sol, és a dir, la intensitat relativa de cadascuna de les freqüències del seu espectre, es correspon aproximadament amb el que s'anomena radiació tèrmica d'un cos negre a 6.000 ºC de temperatura, que és la temperatura a què està la superfície del Sol. La llei de radiació del cos negre va ser deduïda teòricament per Max Plank (1858-1947), l'any 1900, després de la introducció de la hipòtesi dels quanta. El màxim es correspon a la regió de l'infraroig proper i a la part visible de l'espectre.

LLUM *VERSUS* VISIÓ: GOETHE

Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) és universalment recordat per les seves creacions literàries. Això no obstant, Goethe es va interessar profundament en la ciència, en general, i en la teoria dels colors, en particular. Johann Peter Eckermann, en les seves *Converses amb Goethe,* apunta que ell mateix li havia dit «A tot el que he produït com a poeta no li dono gaire importància, perquè en la meva època n'hi ha hagut de molt bons... però, que en la meva època i en una ciència tan difícil com la dels colors hagi estat l'únic capaç de descobrir el bon camí, constitueix per a mi una cosa molt important». Efectivament, Goethe va dedicar molt de temps i esforç als seus estudis d'òptica, especialment al fenomen del color, i va presentar la seva teoria alternativa a la de Newton, a qui no va deixar de criticar al llarg de tota la seva vida.

Goethe no va separar mai l'estudi de la llum del de la visió, ja que volia una comprensió unitària del fenomen «Si l'ull no pertanyés al Sol, com contemplaríem la llum? Si el poder de Déu i el nostre no fossin un, com podria la seva obra fascinar la nostra visió?» Aquesta era la visió de Goethe, que va plasmar en la seva *teoria del color*, de 1810.

Avui dia, amb el progrés de la fisiologia, podem comprendre l'origen de moltes de les dificultats que plantejava Goethe. Fenòmens com la formació de postimatges s'expliquen en termes de l'excitació i la saturació de les cèl·lules de la retina sensibles a la llum. Hem de reconèixer, doncs, que el fenomen de la visió és molt més complex que un simple joc de freqüències en l'espectre electromagnètic.

LA PERCEPCIÓ DEL COLOR

Fou el mateix Thomas Young qui va establir les bases de la percepció del color. Hermann Helmholtz (1821-1894) va perfeccionar la teoria tricromàtica de Young i els moderns estudis fisiològics han permès d'identificar els tres tipus de cèl·lules sensibles de la retina. La sensibilitat d'aquests tres tipus de cèl·lules és màxima per a uns valors concrets de longitud d'ona: la blava, a 445 nm; la verda, a 535 nm, i la vermella, a 575 nm, disminueix la seva sensibilitat i d'acord amb una llei gausiana, de manera que tot l'espectre visible queda cobert. Quan una longitud d'ona determinada (llum monocromàtica) incideix sobre la retina, els tres tipus de receptors absorbeixen la llum en grau diferent i aporten aquest senyal al cervell, que reconstrueix la sensació de color. D'aquesta manera, és possible que la sensació de color que rebem en incidir llum monocromàtica verda sobre la retina pugui ser idèntica a la que rebem en incidir-hi simultàniament llum groga i blava. Una cosa són els colors espectrals de la llum, que podem separar i veure mitjançant un espectroscopi, i una altra la percepció del color que ens dóna el mecanisme de la visió.

EL COLOR DE LES COSES

De quin color són les coses? Aquesta pregunta tan simple té una resposta més complexa del que podria semblar a primera vista. Si veiem un determinat objecte és perquè ens arriba llum des d'ell. Si l'objecte no és una font lluminosa, la llum que ens arriba des d'ell és llum provinent d'una altra font lluminosa, reflectida, però, sobre la seva superfície. Així doncs, hem de tenir en compte, primer de tot, l'espectre de la font lluminosa que il·lumina l'escena, sigui el Sol o una làmpada. Aquesta llum —que contindrà una determinada proporció de freqüències— incideix sobre l'objecte. Si aquest objecte no és un mirall perfecte, que reflecteixi tota la llum que li arriba, part de la llum serà absorbida per l'objecte. El punt clau és que aquesta absorció és selectiva en les diferents freqüències de l'espectre de la llum que prové de la font. Una poma, que veiem vermella sota la llum del Sol, ho és perquè absorbeix gran part de l'espectre visible i reflecteix principalment el color vermell. Finalment, doncs, la llum reflectida que ens

arribarà a la retina tindrà una composició espectral que serà la que determinarà el seu color, d'acord, sempre, amb la sensació de color que produeixi aquesta combinació de freqüències.

Aquest procés explica per què veiem diferent el color d'un mateix objecte a l'aire lliure, sota la llum del Sol, que dins d'un lloc tancat, amb il·luminació artificial. Una bombeta elèctrica —amb filament de wolframi— emet llum en un espectre pràcticament continu. Ara bé, la proporció de les diferents freqüències és diferent de la de la llum solar, ja que es correspon a una emissió tèrmica d'una temperatura inferior a la del Sol. Es parla, llavors, de la temperatura de color d'una determinada font lluminosa. D'altra banda, una font lluminosa com una làmpada de mercuri emet un espectre que conté només unes poques longituds d'ona. El mateix passa amb els tubs fluorescents o les làmpades de sodi. L'efecte d'aquesta llum sobre el color que veiem és molt més acusat.

EL COLOR DE LA LLUM

Un cas interessant és el dels vitralls. A l'interior d'una catedral gòtica, com la de Chartres, la sensació de color és molt acusada, malgrat que les parets siguin de pedra i de color uniforme. La qüestió rau en el fet que la llum del Sol, en travessar les grans vidrieres, adquireix diverses tonalitats de color. En aquest cas, es tracta del procés invers a l'anterior. El vidre absorbeix certes freqüències de la radiació incident. El color de la llum que arriba a l'interior de la nau és, per tant, el resultant de la suma de les freqüències no absorbides. Els colorants que s'afegeixen al vidre contenen metalls pesats i són aquests els que absorbeixen part de l'espectre visible.

En definitiva, per entendre el color de les coses, hem de saber quin és l'espectre de la font lluminosa, quina pot ser l'absorció de part de l'espectre en el medi en què es propaga la llum fins a incidir amb l'objecte, quina absorció es produeix sobre l'objecte i, finalment, quina sensació de color ens produeix la combinació de freqüències que ens arriba a la retina.

LA PERCEPCIÓ DELS ARTISTES

Anem centrant-nos, ja, en les qüestions apuntades a l'inici de la xerrada, el perquè del color del cel i la seva variació al llarg del dia. Ja podem avançar que no es tracta, simplement, de conèixer l'espectre d'emissió del Sol, sinó que s'hi veuen implicats molts fenòmens físics complexos, fins arribar finalment a una qüestió de percepció. En aquest punt, crec interessant fer una mirada a quina ha estat la percepció del cel que han tingut els artistes al llarg de la història, en què s'han fixat i com ho han plasmat en les seves obres.

L'univers romànic és bàsicament simbòlic. El cel també. No ens ha d'estranyar, doncs, que el cel que apareix pintat en retaules del segle XII, com el de Sant Martí de Puigbó (Girona), tingui simplement un color vermell o groc. Fins i tot en un romànic ja més evolucionat, com en el del retaule del segle XIII de Santa Maria de Llucà, s'hi representa un cel de nit, blau i ple d'estels daurats de vuit puntes, sense cap intenció de versemblança —no era pas aquesta la seva intencionalitat!

El gòtic obre una finestra al realisme naturalista. Apareixen els paisatges en el rerefons de les escenes representades, i atorguen profunditat i naturalitat a l'obra. En el retaule de Sant Jeroni, del mestre de Canapost, del segle XV, hi podem veure, rere la cova del sant en oració, un paisatge de muntanyes i arbres amb un cel blau amb núvols. Aquest cel mostra perfectament que l'artista s'havia adonat que el blau del cel és més intens sobre la nostra vertical (llum zenital) que a l'horitzó, on gradualment es torna més brillant i blanquinós. Moltes altres obres del gòtic català, com el *Retaule dels Consellers*, de Dalmau, del segle XV, del Museu Nacional d'Art de Catalunya, o del gòtic francès, com les miniatures del *Llibre d'hores* del duc de Berri, mostren perfectament representat aquest fenomen. El naturalisme havia entrat ja en el món de l'art.

Giovanni Bellini ens ha deixat una mostra magnífica dels colors ataronjats d'un capvespre, en la seva obra, del 1460, *L'oració a l'hort*, de la National Gallery de Londres. Més encara, Calude Le Lorrain, en la seva obra, del 1639, *Port*, del Musée du Louvre, ens presenta una posta de sol amb la gradació completa de colors, des del blau al taronja més profund.

Els paisatgistes anglesos Constable i Turner representen, potser, la culminació d'aquesta evolució cap a la representació del color de la llum del cel. Constable ens ha deixat dues pintures de la mateixa vall, la vall de *Dedham*, des del mateix punt de vista, però en dos moments diferents, l'un amb un cel blau d'estiu (1802) i l'altre amb uns extraordinaris núvols de tempesta (1828). I no només és diferent el cel, la llum incident sobre tots els elements del paisatge està d'acord amb l'estat del cel. Per la seva banda, Turner inicià un camí cap a la abstracció total en què el quadre sencer queda dominat per la llum del cel, veritable protagonista de l'obra, com ara a *El temerari*, de 1839.

Si una obra d'art, però, representa perfectament el color i la lluminositat del cel, m'atreviria a dir que és *L'espace*, d'A. Chintreuil, del 1869, del Musée d'Orsay, de París.

EL PAPER DE L'ATMOSFERA

Quan observem alguna de les fotografies fetes sobre la superfície de la Lluna pels astronautes americans, el primer que ens crida l'atenció és la negror total i absoluta del cel. En aquestes fotografies, la Terra juga el paper que estem acostumats a assignar a la Lluna. Hi podem veure un quart creixent de Terra, un planeta blau i blanc retallat sobre el fons negre del cel. I és que, en absència d'atmosfera, el cel es veu totalment negre,

malgrat que la llum del Sol il·lumini directament. El color blau del cel o els capvespres vermells estan, doncs, originats pels fenòmens físics que experimenta la llum del Sol en travessar l'atmosfera.

El primer efecte que volem tractar és per què el cel es blau. És aquesta una qüestió que hom s'ha fet a totes les èpoques, però que no es va resoldre fins a finals del segle XIX, malgrat que l'explicació que es donà llavors no fou acceptada de manera immediata —ni molt menys— i va suscitar el debat científic durant prop d'un segle. Avui dia, però, l'explicació avançada el 1871 per Lord Rayleigh (1842-1919) es considera la correcta.

Les primeres investigacions serioses sobre la causa del color del cel les inicià el físic irlandès John Tyndall (1820-1893), que publicà els seus experiments l'any 1869. Tyndall observà experimentalment que una concentració de partícules en suspensió en l'aire, en ser il·luminades per un feix de llum blanca —sota l'angle adequat— adquiria una tonalitat blava. Aquest experiment posà els investigadors sobre la pista de l'origen de la coloració blava del cel, la *difusió*. Evidentment, no es podia tractar d'un efecte de reflexió ni de refracció (òptica geomètrica), ni d'interferència ni de difracció (òptica ondulatòria) ja que cap d'aquests fenòmens —que intervenen realment en d'altres aspectes de la física atmosfèrica— podria proporcionar una coloració tan uniforme sobre tota l'extensió del cel.

Les explicacions anaren, llavors, pel camí de buscar els agents responsables de la dispersió: pols en suspensió, gotetes d'aigua, cristalls de gel, i també es pensà en una possible absorció de la part vermella de l'espectre per part d'aquests elements estranys. Seguint aquesta argumentació, es considerava que en una atmosfera absolutament pura, neta de tot tipus de partícules en suspensió, no es produiria cap fenomen de dispersió de colors i seria, llavors, completament invisible. Aquestes explicacions, però, resulten errònies, malgrat que totes elles contribueixin —en diferent mesura— cap a l'efecte final del color del cel en determinades situacions.

EL BLAU DEL CEL: DISPERSIÓ *RAYLEIGH*

Lord Rayleigh demostrà que no cal que hi hagi agents en suspensió a l'atmosfera per poder tenir dispersió: les mateixes molècules de l'aire són suficients per produir-la. Ja hem comentat que la llum és una radiació electromagnètica. Això implica que al seu pas hi ha camps elèctrics i magnètics que oscil·len. Les molècules de l'aire (siguin d'oxigen o de nitrogen) estan formades per àtoms que tenen una càrrega elèctrica positiva al nucli i un «núvol» d'electrons de càrrega negativa al seu voltant. La radiació electromagnètica fa oscil·lar aquestes molècules i aquesta oscil·lació provoca una re-emissió de llum en totes direccions. Aquest és el fenomen que coneixem com a dispersió (*scattering*).

En les oscil·lacions forçades, pot passar un efecte molt sorprenent, el de la ressonància. Efectivament, quan la freqüència que es comunica a un oscil·lador s'acosta a la

pròpia freqüència natural de vibració, l'oscil·lació s'amplifica enormement. Es dóna la circumstància que la major part de les molècules tenen freqüències de ressonància en la regió ultraviolada. Això fa que l'efecte de la dispersió de la llum per aquestes molècules sigui més acusat per les freqüències properes a les ultraviolades (el blau) que a l'altra banda més llunyana de l'espectre (el vermell).

Lord Rayleigh va arribar a la conclusió correcta que la intensitat de la llum dispersada era proporcional a $1/\lambda^4$, on λ és la longitud d'ona de la llum incident. Un feix de llum blanca —format per llum de totes les freqüències— que travessa un gas perdrà pel camí, predominantment, part de la component blava —que sortirà lateralment en totes direccions— mentre que la llum que continua s'haurà enriquit en vermell.

Per què veiem el cel blau? Doncs perquè en mirar cap al cel —no mirant al Sol directament, és clar— ens arriba a la retina aquesta llum dispersada per les molècules de gas de l'atmosfera que, segons la llei de Rayleigh, és més rica en blau que la llum blanca original. El quocient entre la longitud d'ona del blau i del vermell és 1/1,68. Per aquesta raó, la llum blava es dispersa $1{,}68^4 = 7{,}9$ vegades més que la vermella. De tota manera, hi ha encara altres efectes que s'han de tenir en compte. Si la dispersió més marcada es produeix en la regió propera a l'ultraviolada, per què no veiem el cel violat en lloc de blau? En aquest punt intervenen els efectes de percepció. La sensibilitat a la regió violada és més dèbil que a la regió blava i això compensa l'excés de violat que pugui tenir la llum difusa del cel. En segon lloc, s'hi han d'afegir, també, els efectes relacionats amb les variacions de densitat de l'atmosfera, que són diferents a la part inferior de l'atmosfera i a la superior, i que alteren els fenòmens de dispersió.

ELS CAPVESPRES VERMELLS

Tal com hem vist a les pintures de Bellini i Le Lorrain, la llum del Sol ponent és bàsicament ataronjada. Aquest és un efecte addicional, conseqüència també de la dispersió Rayleigh. Ja hem comentat que quan percebem la llum blava del cel (per exemple, mirant a la nostra vertical) és perquè la llum blava s'ha dispersat en totes direccions. Que passa, però, en la direcció del raig de llum original que venia del Sol? Doncs que haurà perdut una bona part de la proporció original de blau i les freqüències ataronjades dominaran l'espectre. Això és precisament el que veiem quan mirem al Sol, quan està proper a l'horitzó. La llum que ens prové més directament del Sol està dominada pel taronja, mentre que el cel sobre la nostra vertical continua veient-se blau, com en el quadre de Le Lorrain.

I d'on surten, doncs, aquests espectaculars capvespres rogencs, amb núvols vermells que de vegades podem veure? En aquests casos, s'hi afegeix un altre fenomen, la dispersió per partícules en suspensió que tant havia interessat Tyndall. La dispersió Rayleigh té lloc quan les partícules dispersores —les molècules, en el nostre cas— són

molt més petites que la longitud d'ona de la llum. En el cas de partícules en suspensió —pols, cendres etc.—, aquestes són més grans que la longitud d'ona de la llum, i el procés de dispersió és diferent. Es tracta, ara, de la dispersió Mie, que també és una dispersió selectiva segons la longitud d'ona. Al contrari de la dispersió Rayleigh, que surt en totes direccions, la dispersió Mie es produeix bàsicament en la direcció mateixa de la llum incident. Això fa que, en el cas del cel del capvespre, la presència de núvols amb partícules en suspensió en la trajectòria de la llum provinent del Sol —molt baix sobre l'horitzó— accentuï l'efecte de la dispersió Rayleigh i es puguin contemplar uns espectaculars vermells.

L'HORITZÓ BRILLANT I ELS NÚVOLS BLANCS

Ja hem comentat com els artistes del gòtic s'havien adonat que al migdia, amb el Sol alt, la regió de cel més propera a l'horitzó presenta un color més pàl·lid, pràcticament blanc. Com es compatibilitza aquesta observació amb la difusió Rayleigh? Quan mirem cap a l'horitzó, la llum que ens arriba procedeix tant de dispersions produïdes en regions properes (llum més blava) com llum que prové de dispersions produïdes a les capes exteriors de l'atmosfera, molt més llunyanes. La llum provinent de dispersions en aquestes regions ha hagut de recórrer un camí molt més llarg i ha anat, progressivament, perdent el seu color blau, i s'ha tornat, doncs, més vermella. L'addició de totes aquestes contribucions proporciona una llum que percebem com més blanca i brillant que la provinent directament de la nostra vertical, la llum zenital.

L'origen dels núvols blancs, l'hem de buscar de nou en la dispersió Mie. Les gotetes d'aigua que porten el núvols són molt grans, comparades amb la longitud d'ona de la llum. La dispersió que produeixen en la llum és, en aquest cas, bàsicament idèntica per a totes les longitud d'ona, i per això no hi veiem cap separació de colors. Aquest fenomen també explica per què un núvol de tempesta es veu de color gris, ja que, en ser tan espès, la dispersió elimina gran part de la llum i gairebé no la deixa passar.

HALOS AL CEL

A banda de la qüestió bàsica del color del cel, hi ha tota una llarga sèrie de fenòmens òptics molt interessants, relacionats amb el comportament de la llum a l'atmosfera i que podem anar relacionant amb diverses característiques de la llum i la visió. Així, podem començar pels halos que es formen, de vegades, al voltant de la Lluna o el Sol. Es tracta d'anells lluminosos que es formen a 22 graus de la direcció on hi ha l'astre lluminós. Es formen en dies clars, però només quan hi ha una fina capa de cúmuls o estrato-

cúmulus a la part alta de l'atmosfera. Si poguéssim veure aquests núvols, veuríem que no estan formats per gotetes d'aigua, com els núvols de tempesta, sinó que estan formats per minúsculs cristalls de gel. Aquests cristalls de gel tenen una estructura de prismes de base hexagonal. La refracció de la llum per les cares d'aquests prismes origina una desviació de 22 graus de la llum incident, que és la que veiem en forma d'anell lluminós: l'halo.

Una anàlisi detallada dels halos permet veure que realment són més complexos que un simple anell. Amb bones condicions, es poden veure uns arcs tangents a la part superior i inferior de l'halo circular, són refraccions produïdes per la base dels cristalls. També s'hi poden veure altres arcs, pel damunt o secants al cercle, produïts per cristalls diferents, més planers. Tota una extraordinària col·lecció de fenòmens que els observadors de la natura s'han ocupar d'anar recopilant i fotografiant sistemàticament.

L'ARC DE SANT MARTÍ

Aquest és l'efecte més espectacular produït per la refracció de la llum. Ja en les il·lustracions originals de *l'Encyclopédie* de Diderot i d'Alembert, hi podem veure esquemes de la refracció dels raigs de llum en una gota esfèrica. Un simple càlcul ens revela que un raig de llum incident sobre una gota d'aigua sofrirà, primer, una refracció, després, una reflexió en el seu interior, i sortirà a l'exterior, després d'una nova refracció. Amb tot això, el raig de llum surt altre cop de la gota amb una lleugera separació dels colors, com en un prisma de vidre. Per veure l'arc de Sant Martí, hem de tenir el Sol a la nostra esquena i hi ha d'haver gotetes d'aigua —pluja— al nostre davant. Llavors veurem un meravellós arc de colors que forma un cercle a 42 graus.

Malgrat que aquesta refracció sigui l'ingredient bàsic, l'atenta observació dels arcs ens mostra que el fenomen és més complex del que a primera vista podria semblar i hem exposat. En primer lloc, tenim la formació d'arcs dobles. L'origen d'aquest segon arc està en una doble reflexió a l'interior de la gota, abans de sortir, cosa que provoca que l'ordre dels colors estigui invertit respecte del primer. Després, tenim la qüestió de la claredat del cel a banda i banda de l'arc. El cel es veu sempre més clar a l'interior del primer arc que per sobre seu, on es forma una regió fosca que acaba en el segon arc concèntric, una qüestió que s'ha d'entendre pensant que hi ha tota una regió del cel que experimenta el mateix fenomen i no considerant només una sola gota aïllada.

Però això no es tot. En bones condicions d'observació, es poden descobrir els anomenats arcs supernumeraris, franges clares i fosques que segueixen la forma de l'arc principal. En aquest cas, ens les hem de veure amb complexos fenòmens d'interferència.

INTERFERÈNCIA I DIFRACCIÓ

Els fenòmens d'interferència i difracció, encara que poc habituals, estan també presents en els fenòmens òptics de l'atmosfera. S'han fet observacions interessants de núvols iridiscents, és a dir, núvols amb una coloració canviant produïda per un fenomen d'interferència de la llum. Es tracta d'un fenomen semblant al que produeix el color de les bombolles de sabó. Quan la llum que hi interfereix és monocromàtica, la interferència produeix bandes clares i fosques, però quan la llum és blanca, la interferència és diferent segons la longitud d'ona, i les bandes clares i fosques se separen per a tots els colors i formen aquestes coloracions canviants i inestables.

CONCLUSIONS

Els fenòmens òptics relacionats amb l'atmosfera constitueixen un camp d'estudi molt fructífer, en el qual intervenen aspectes molt diversos, des de l'òptica geomètrica —reflexió i refracció—, passant per l'òptica ondulatòria —interferència i difracció—, fins arribar a la teoria electromagnètica de la llum, que ens explica els fenòmens de dispersió Rayleigh i Mie. Les bases físiques de tots aquests fenòmens estan, avui dia, molt ben compreses. L'explicació detallada de cada observació, no obstant això, presenta moltes vegades una gran dificultat, i moltes d'elles no estan exemptes de polèmica. Per això, crec que l'interès per les observacions dels fenòmens òptics a l'atmosfera està més que mai d'actualitat. Potser sigui ara el moment de seguir els consells de Goethe, el qual afirmava: «Considerem les nostres experiències a la llum del dia com les primeres i més importants. Portem l'observador a l'aire lliure abans de confinar-lo a les restriccions d'una cambra fosca».