
4. ELS COLORS DEL CEL

David Jou*

Un cicle de conferències sobre els colors no pot passar per alt els colors del cel, que susciten, si hi pensem prou, una gran diversitat de preguntes. Per què el cel és blau? Per què els núvols són blancs? Per què el sol és rogenc a l'alba i a la posta? Com es produeix l'arc de Sant Martí? Per què el cel nocturn és negre? Hi estem tan acostumats que gairebé mai no ens preguntem, per exemple, per què el cel és blau de dia i negre de nit. En canvi, aquestes i moltes altres qüestions formen part dels temes de recerca en òptica atmosfèrica. Aquesta capacitat de formular noves preguntes, de posar en qüestió les experiències més habituals, de copsar amb nova intensitat els matisos de la naturalesa, és precisament, un dels al·licients més grans de la física.

En aquest escrit, tractem les qüestions formulades anteriorment, i ens referim també a algunes qüestions d'òptica atmosfèrica relacionades amb problemes ecològics com ara el forat de la capa d'ozó o l'efecte hivernacle.

4.1. PER QUÈ EL CEL ÉS BLAU?

Quan mirem el cel, la llum que en veiem no procedeix directament del Sol, ans ha estat dispersada abans per les molècules que componen l'aire. Si no hi hagués atmosfera, mirariem el cel i el veuríem negre: cap molècula no escamparia la llum rebuda per fer-la arribar als nostres ulls. Per això, l'espai exterior a l'atmosfera, mal-

* Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra.

grat estar ple de llum, té la negror colpidora que podem veure en les fotografies dels astronautes.

Cal preguntar-nos, d'antuvi, per la naturalesa dels colors i els mecanismes de la percepció, i per la composició de la llum del Sol. La definició dels colors no és simple, ja que hi intervenen tant elements purament físics com psicofísics. En principi, la sensació de color està associada a la longitud d'ona de la llum. La llum visible és radiació electromagnètica les longituds d'ona de la qual estan compreses entre uns 400 nm, corresponent al color blau-violat, i uns 700 nm, corresponent al vermell-taronja. Ací, 1 nm significa un nanòmetre, o 10^{-9} m, és a dir, una mil·lionèsima de metre, o una milionèsima de mil·límetre. La resta de la radiació, ultraviolada (ençà dels 400 nm) o infraroja (enllà dels 700 nm), no ens és perceptible, ja que la percepció de la llum és duta a terme mitjançant uns pigments que tenen els seus màxims de sensibilitat a les longituds d'ona de 590 nm, 520 nm i 450 nm i que no són sensibles a longituds d'ona allunyades d'aquests màxims de sensibilitat. Ara bé, la sensació de color no està unívocament relacionada amb la longitud d'ona o la freqüència. Així, la mateixa sensació de color que produeix la llum d'una longitud d'ona pot ser reproduïda mitjançant una mescla determinada en proporcions determinades de radiacions de diferents longituds d'ona.

Pel que fa a la composició de la llum del sol, cal saber que la temperatura superficial d'aquest astre és d'uns 6.000 K. Segons les lleis de la radiació del cos negre, això determina un espectre de radiació que té un màxim en la zona dels 680 nm. Això ha determinat, evolutivament, que els pigments que permeten interaccionar més específicament els éssers vius amb la llum del sol, com ara els pigments de la visió dels colors o la clorofil·la dels vegetals, siguin especialment sensibles a radiacions les longituds d'ona de les quals corresponen a les radiacions més abundoses en la llum solar. Així, la clorofil·la absorbeix preferentment la llum vermella de 680 nm i la blava de 430 nm, i fa que la llum que observem, desprovista de vermells i de blaus, quedi enriquida en els colors verds.

Les molècules de l'aire reben, doncs, totes les radiacions de la llum del sol, la suma de les quals produiria una sensació de color blanc. Una part d'aquestes radiacions són reflectides per l'atmosfera, una altra part són absorbides per les molècules de la part alta de l'atmosfera, i una altra part poden travessar les diverses capes d'aire i arribar fins a la superfície de la terra. Així, l'acció de les molècules de l'aire sobre la llum varia segons la longitud d'ona d'aquesta.

Això ens indica que, si volem comprendre els colors del cel, cal escatir les característiques primordials d'aquesta interacció.

Aquestes característiques poden ser analitzades matemàticament a partir de les equacions de l'electromagnetisme, tot estudiant l'acció d'una ona electromagnètica sobre una molècula, o sobre un petit objecte o antena de grandària més petita que la longitud d'ona de la radiació, cas que es dona en les molècules d'oxigen i nitrogen que componen majoritàriament l'aire. Cap a finals del segle XIX, Lord Rayleigh aplicà les equacions de Maxwell de l'electromagnetisme a aquest problema i trobà que el grau de dispersió (o escampament o *scattering*) d'una radiació per part d'un corpuscle és inversament proporcional a la quarta potència de la seva longitud d'ona. Com que el color blau té longitud d'ona més curta que el color vermell (en un factor 1,5, aproximadament), és més dispersat que el vermell en un factor $(1,5)^4 \approx 6$. Per tant, en mirar cap al cel, ens arriba una llum més enriquida en blaus i violats que no pas en vermells. La nostra sensibilitat superior al blau que no pas al violat fa aleshores que vegem el cel blau.

Observem, però, que el blau del cel no té a tot arreu la mateixa intensitat: el blau és més intens i profund en la part alta de la volta del cel, i es torna més blanquinós prop de l'horitzó. L'explicació d'aquest matís, ben copsat pels pintors paisatgistes, és que la llum procedent de les zones properes a l'horitzó ens arriba dispersada per un nombre més gran de partícules. Això incrementa, d'una banda, la brillantor de la llum, però, d'altra banda, torna a mesclar les radiacions de diferents longituds d'ona prèviament escampades per les molècules, i retorna a la llum una mescla de longituds d'ona que la fan esdevenir blanquinosa. Aquesta diferència en la intensitat de blavors del cel fa que les zones de la mar amb moltes ones siguin més fosques que no pas les zones de mar calmada. Això és així perquè les superfícies inclinades de les ones reflecteixen llum de la part més alta de la volta celeste, mentre que les superfícies horitzontals reflecteixen la llum més blanquinosa propera a l'horitzó.

Un altre matís que no ens és directament perceptible és el de la diferent polarització de la llum procedent de diverses parts de la volta celeste. Les abelles poden observar directament aquesta polarització i l'aprofiten com a element d'orientació especialment en els dies en què el Sol no és directament visible.

El fenomen d'escampament o dispersió de la llum explica també per què a l'alba i a la posta el Sol es veu més rogenc. És en aques-

tes hores quan la llum del sol, que arriba aleshores tangencialment a la superfície de la terra, ha de travessar un gruix més gran d'aire. En el transcurs del seu camí troba, per això, més molècules, les quals escampen, com hem dit, més el color blau que el vermell. Com a conseqüència, la llum que segueix en línia recta, és cada vegada més rica en vermells que no pas en blaus. Aquest fenomen queda incrementat si, a més de les molècules, hi ha en l'aire pols molt fina que contribueixi a aquesta dispersió, i per això el Sol és més vermellós després de grans ventades o de grans incendis.

Si el corpuscle amb què interacciona la radiació no és molt més petit que la longitud d'ona d'aquesta, les característiques de l'escampament relatiu de la llum són molt diferents del cas del corpuscle molt més petit que la longitud d'ona. El càlcul esdevé ara molt més complicat, i fou dut a terme per Mie a principis del segle XX. La característica més destacada és que ara el grau d'escampament ja no depèn de la longitud d'ona de la radiació incident: tant el blau com el vermell com tots els altres colors són escampats de forma anàloga i, per això, l'escampament ja no té un efecte selectiu que reforci uns colors i n'afebleixi els altres, sinó que conserva el caràcter de la mescla de radiacions incident. Per això, com que les gotes en suspensió en els núvols o en la boira són en general més grans que la longitud d'ona mitjana de la llum visible, els núvols són blancs.

4.2. EL CEL I ELS COLORS INVISIBLES

La interacció entre molècules de l'atmosfera i la radiació electromagnètica no es limita a la banda visible de l'espectre electromagnètic. La radiació provinent del Sol conté un 45 % de la seva energia en la banda visible de l'espectre, un 53 % en la banda infraroja i un 2 % en la banda ultraviolada. L'acció de l'atmosfera sobre els infrarojos i els ultraviolats, que nosaltres no percebem directament, i les seves conseqüències ecològiques és un tema de gran actualitat.

Pel que fa als raigs ultraviolats, l'energia de cada fotó o quàntum de llum és superior a l'energia dels fotons de la llum visible, ja que l'esmentada energia és proporcional a la freqüència de la radiació, i és prou gran com per produir ionitzacions en les molècules de les cèl·lules de la pell. Aquestes ionitzacions poden produir efectes biològics indesitjables, que poden traduir-se, en alguns casos, en mutacions diverses de les cèl·lules cutànies i en l'aparició de càncer

de pell. Afortunadament, aquestes radiacions massa energètiques són absorbides en gran part en la zona elevada de l'atmosfera per les molècules d'ozó, que són ionitzades per aquestes radiacions. Des de fa uns quinze anys, hom observa una minva important de la capa d'ozó en la zona dels pols i en àrees cada vegada més grans de l'atmosfera a causa de l'acumulació en las capes altes de l'atmosfera de molècules artificials que descomponen l'ozó. Aquesta observació, que ha valgut recentment el premi Nobel de Química als seus autors, fa témer que el nostre planeta pugui quedar relativament desprotegit d'aquesta defensa, cosa que podria traduir-se en un increment de malalties cutànies. Hom ha arribat a acords internacionals per tal de reduir la utilització d'aquestes molècules i intentar que la capa d'ozó es vagi recuperant.

Pel que fa a l'altre costat de l'espectre, la radiació infraroja, de longitud d'ona més llarga que la de la llum vermella, conté una gran part de l'energia calorífica de la radiació. La llum visible travessa l'atmosfera sense ser absorbida i, per tant, sense escalfar-la. En arribar a la terra, és absorbida pel sòl i en fa augmentar la temperatura. El sòl, al seu torn, emet radiació electromagnètica, però com que la seva temperatura és més baixa que la del Sol, la longitud dona dominant de la seva radiació és més llarga que la de la llum visible, i es troba en la part infraroja de l'espectre. Aquesta radiació sí pot ser absorbida per determinades molècules, com ara el vapor d'aigua, l'anhidrid carbònic i el metà. Aquestes molècules capturen, doncs, la radiació infraroja i farien augmentar la temperatura de l'atmosfera, en l'anomenat *efecte hivernacle*.

Un altre factor de preocupació ecològica en física atmosfèrica ha estat un increment de la concentració de CO_2 en l'atmosfera degut a emanacions d'oxigen industrial, cosa que faria, en principi, que la temperatura anés augmentant. No és encara clar quin és el valor d'aquest increment i quines en són les conseqüències, i depèn dels models utilitzats en l'estudi i de les dades que hom prengui en consideració. En tot cas, és una qüestió que es debat, tant en l'àmbit científic com polític i sociològic, i que pot tenir incidència en les polítiques energètiques a mitjà termini, en especial pel que fa a les fonts energètiques per a la industrialització a gran escala de la Xina o dels països de Tercer Món.

Les característiques de la interacció entre la llum i els núvols són un tema de gran interès pel que fa a aquesta evolució de la temperatura de l'atmosfera. En efecte, un increment de temperatura de l'atmosfera faria que augmentés l'evaporació i, en conseqüència, la nu-

volositat. Ara bé, els núvols tenen un doble efecte sobre la temperatura: d'una banda, absorbeixen radiació infraroja i fan pujar la temperatura atmosfèrica (per això, les nits ennuvolades són menys fredes que les nits de cel clar). D'altra banda, reflecteixen la radiació que arriba del Sol i contribueixen, doncs, al refredament de la terra. Quin d'aquests dos factors predomina és crucial per a l'evolució de la temperatura atmosfèrica. El problema no és senzill, ja que la reflexibilitat dels núvols depèn de la superfície total de les gotes. Així, dos núvols amb la mateixa quantitat d'aigua, però un format per moltes gotes molt petites i l'altre, per menys gotes però més grosses, no tindran el mateix efecte: el primer reflectirà més radiació que no pas el segon.

Segons alguns autors, aquest fenomen podria proporcionar un mecanisme d'autoregulació de la temperatura terrestre en què hi intervindrien factors biològics. Així, un increment de la temperatura faria que augmentés la població de plàncton en el mar. El plàncton, però, emet determinades substàncies que actuen com a nuclis de condensació de les gotes. Així, una quantitat més gran de nuclis de condensació provoca un increment en el nombre de gotes i, per tant, en la reflexibilitat dels núvols, de manera que un increment a curt termini de temperatura provocaria a la llarga un cert refredament que compensaria l'escalfament anterior. La complexitat del problema augmenta pel fet que la reflexibilitat i les característiques òptiques dels núvols també depenen de l'alçada a la qual aquests es formen, i que aquesta pot dependre de la temperatura de l'atmosfera.

4.3. ELS COLORS DE L'ARC DE SANT MARTÍ

Un dels fenòmens més espectaculars de l'òptica atmosfèrica és l'arc iris o arc de Sant Martí. L'origen d'aquest fenomen es basa en la refracció de la llum en les gotes d'aigua en suspensió a l'atmosfera. La refracció consisteix en la desviació d'un raig de llum en passar d'un medi a un altre. La magnitud d'aquesta desviació depèn dels índexs de refracció dels medis, els quals, al seu torn, depenen en general de la longitud d'ona de la llum. Per aquest motiu, un prisma descompon la llum blanca, que conté totes les longituds d'ona, en feixos de llums de colors.

Suposem, doncs, que arriba llum blanca a una gota d'aigua en suspensió a l'atmosfera. El raig de llum es refractarà en entrar-hi, es reflectirà a la superfície posterior de la gota, i es tornarà a refractar

en sortir-ne. La desviació del raig en la refracció depèn, com hem dit, de la longitud d'ona, és a dir, del color, motiu pel qual aquesta doble refracció descompondrà la llum blanca en colors. Un estudi geomètric acurat d'aquest fenomen, dut a terme per primera vegada per Descartes, posa de manifest que hi ha una direcció en la qual aquesta descomposició ateny un màxim d'intensitat: és la direcció que forma un angle de 42° amb la direcció del raig de llum incident. L'arc iris està compost pels raigs de llum de moltes gotes d'aigua diferents. El fet que l'índex de refracció en aigua és més petit per a la llum vermella que per a la llum violada o blava explica, a partir d'una anàlisi geomètrica, que l'exterior de l'arc correspongui al color vermell i l'interior, a la llum blava i violada.

Així, un observador veurà l'arc iris en la direcció en què la visual (línia de l'arc fins a l'ull de l'observador) formi un angle de 42° amb la direcció de la llum solar. Així, no hi ha pròpiament un arc de Sant Martí objectiu, sinó que cada observador veu un arc diferent, en funció de la seva posició. Una altra conseqüència és que els arcs més grans es produeixen quan el Sol està baix, és a dir, cap al crepuscle, i són més grans encara si l'observador es troba en el cim d'una muntanya.

Com que cada vegada que la llum arriba a la superfície de la gota hi ha una part de la llum que es reflecteix i una altra que es refracta, és possible que no tota la llum que arriba a la paret de la gota per a la segona refracció n'arribi a sortir, sinó que una part es pot tornar a reflectir vers l'interior, abans d'experimentar la darrera refracció i sortir de la gota. Aquest fenomen fa que es produeixi un segon arc de Sant Martí, com a conseqüència de raigs que han sofert dues refraccions i dues reflexions. Com que en cada reflexió es perd intensitat, la intensitat d'aquest arc secundari és més petita que la de l'arc primari o principal, i per això resulta més difícil de ser observat. Aquest segon arc té una obertura angular d'uns 51° : per això es troba a l'exterior de l'arc principal i és més gran que aquest. A més, la reflexió addicional fa que l'ordre dels colors sigui invertit respecte a l'ordre amb què aquests es presenten en l'arc principal.

4.4. PER QUÈ EL CEL NOCTURN ÉS NEGRE?

Sembla una obvietat que el cel nocturn hagi de ser negre, excepte pel que fa a la presència de les estrelles. Com que la llum del sol

no arriba a la part de l'atmosfera que estem contemplant, és lògic que aquesta no dispersi gens de llum i, per tant, sigui negra. Però aquesta resposta no tanca definitivament la qüestió.

En efecte, si l'univers fos infinit i etern, cada visual toparia, més tard o més d'hora, amb una estrella o una galàxia. És cert que la lluminositat d'una font decreix de manera proporcional al quadrat de la distància d'aquesta a l'observador, motiu pel qual podríem suposar que l'efecte de les galàxies llunyanes seria negligible. Tanmateix, si la densitat de galàxies fos uniforme a gran escala, el nombre de galàxies a una certa distància de la terra augmentaria proporcionalment al quadrat d'aquesta distància, ja que el volum d'una closca esfèrica és proporcional al quadrat del seu radi. Per aquest motiu, en multiplicar el nombre de fonts lluminoses per la lluminositat, la contribució de cada capa esfèrica de qualsevol radi a la lluminositat del cel seria constant, ja que els efectes del radi es cancel·larien. En sumar les contribucions de totes les capes, la contribució total hauria de ser infinita, i el cel hauria de ser no pas negre sinó enlluernador i roent.

El color negre de la nit és, doncs, també una font de preguntes. Fou el metge i astrònom Olbers, de Bremen, qui va formular amb més claredat aquesta reflexió i va contribuir a difondre la paradoxa. Els intents de resposta han estat diversos. El primer fou suposar que una pols intergalàctica absorbia la radiació de les galàxies llunyanes. Aquest argument no és satisfactori, ja que la pols s'hauria d'anar escalfant i emetria la seva pròpia radiació. Una altra explicació és l'edat finita de l'Univers, que els models cosmològics actuals xifren en uns 15.000 milions d'anys. Si és així, no ens pot arribar la llum produïda per totes les galàxies, sinó només la llum de les galàxies situades en una regió el radi de la qual sigui igual a la velocitat de la llum per l'edat de l'Univers.

Tot i això, l'espai exterior es troba ple de radiació de microones, a una temperatura d'uns 2,7 K, que constitueix una mena de relíquia fòssil de la radiació incandescent que omplí l'Univers en èpoques primitives. Així, abans que l'Univers tingués uns 300.000 anys, la llum interaccionava fortament amb la matèria, ja que aquesta estava completament ionitzada a causa de l'elevada temperatura. Quan, en davallar la temperatura com a conseqüència de l'expansió de l'Univers, anà disminuint el grau de ionització de la matèria, la llum interaccionà cada vegada menys amb aquesta, fins que matèria i radiació van quedar pràcticament sense interactuar

mútuament. La descoberta d'aquesta radiació de fons, el 1965, suposà, si més no per ara, la victòria del model cosmològic del Big Bang per damunt del paradigma competidor de l'Univers estacionari.

La radiació de fons de microones conté informació cosmològica molt valuosa, i per això s'ha estudiat amb una cura extremada. En particular, el 1992 el satèl·lit COBE posà de manifest petites fluctuacions de temperatura, de l'ordre de tres milionèsimes de graus, en aquesta radiació de fons, d'altra banda extraordinàriament isotròpica. Aquestes fluctuacions, buscades molt de temps, podrien indicar les fluctuacions primordials que donaren lloc posteriorment a les galàxies. Tanmateix, la seva grandària és massa petita com per poder explicar la formació de les galàxies sense acudir a nuclis de condensació relativament exòtics, com ara defectes topològics de l'Univers, o acumulacions de matèria fosca de naturalesa desconeguda.

En definitiva, en considerar el color del cel trobem nombrosos temes de gran interès. Constatem l'harmonia entre els pigments fotosensibles d'animals i plantes i la temperatura superficial del Sol. Aprenem a mirar amb més profunditat els matisos del blau del cel i els colors de l'arc de Sant Martí. La negror de la nit ens indica que l'edat de l'Univers és finita i que les estrelles són mortals. La blancor dels núvols fa que ens preguntem per l'evolució futura de la temperatura de l'atmosfera.

REFERÈNCIES

- JOU, D.; BAIG, M. *La naturaleza y el paisaje*. Barcelona: Ariel Ciencia, 1994.
- MEINEL, A. i M. *Sunsets, twilights and evening skies*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- TARÁSOV, L.; TARÁSOVA, A. *Charlas sobre la refracción de la luz*. Moscou: MIR, 1985.
- TIPLER, P. A. *Física*. Volum 2. Barcelona: Reverté, 1994.

