

PER QUÈ EL CEL ÉS BLAU,

per David Jou i Mirabent

44 (572/ setembre 1981

ciència 9)

Després d'un breu repàs de la teoria dels colors, s'estudia la interacció de la llum amb les partícules de l'atmosfera. Les partícules molt petites (molècules, pols fina) escampen més la llum blava que la vermella. Això explica el color blau del cel i el vermell del sol de la posta. Les partícules més grosses (gotetes d'aigua, cristalls de glaç) escampen igualment tots els colors. Això explica el color blanc dels núvols.

David Jou i Mirabent (Sitges, 1953) és doctor en ciències físiques i actualment treballa com a professor adjunt contractat al departament de termologia de la facultat de ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona. El present article fou el guanyador del premi Divulga convocat enguany pel Museu de la Ciència, de "la Caixa", a qui agraïm l'autorització per a reproduir-lo, extret de les publicacions del Museu.

INTRODUCCIÓ



Un dels fets quotidians que, de tan habituals, ni tan sols ens arribem a plantejar, és el color del cel. Per què el cel, en un dia clar, és blau? Per què el sol, a la posta i a l'alba, s'enrogeix tan considerablement? Per què els núvols tènues, en canvi, són blancs? Per què l'espai exterior és negre? I, encara, aquestes preguntes són només una petita part de les que ens podríem formular si ens comencéssim a plantejar qüestions sobre el món que ens envolta. Podríem, així, prolongar la nostra curiositat: Per què l'arc de Sant Martí presenta tants colors i en una successió determinada? Per què pampalluegen els estels? Quins són els efectes tèrmics de la llum i llurs conseqüències meteorològiques? Quins colors veuen els insectes? Com s'orienten els insectes?... Però no podem anar tan lluny, en aquest article, i ens haurem de limitar a respondre tan sols les primeres preguntes.

La qüestió del color del cel ha atret, sovint, la curiositat de l'home. En alguns llibres de text del segle passat he pogut llegir: "El cielo es azul, porque es el color

que menos ofende la vista." Alguns llibres de text actuals al·ludeixen a la qüestió de passada, només en quatre ratlles excessivament sintètiques i en general incomprendibles. Si féssim una enquesta sobre aquesta qüestió tan quotidiana, quanta gent la contestaria satisfactoriament?

El propòsit d'aquest article és atreure l'atenció sobre algunes qüestions d'òptica atmosfèrica, oferir-hi amb paraules al més senzilles possibles una explicació, correlacionar alguns fenòmens que semblen independents i divulgar, en fi, algunes idees que sovint es troben tancades en els manuals d'òptica, però inaccessibles al gran públic.

TEORIA DELS COLORS

Per començar la nostra explicació hem de recordar de la física elemental que la llum és un cas particular de radiació electromagnètica. Altres tipus de radiació electromagnètica són, com veurem, les ones de ràdio i de TV i els raigs X.

Les ones de qualsevol radiació es caracteritzen per la velocitat, l'amplitud, la longitud d'ona i la freqüència. Encara que les ones de la mar siguin, de fet, molt més complexes que les ones electromagnètiques, podem recórrer a elles per a visualitzar alguns conceptes, com els de longitud d'ona i d'amplitud. L'amplitud és, senzillament, la màxima alçada de l'ona, referida a la posició d'equilibri —és a dir, referida a la superfície plana que tindria la mar en calma. La longitud d'ona és la distància entre les crestes de dues ones successives. La freqüència és el

nombre de vegades que, en un punt qualsevol i per unitat de temps, l'ona arriba a la seva alçada màxima. Atès que com més separats estiguin els màxims, més estona transcorrerà entre màxim i màxim, la freqüència és inversament proporcional a la longitud d'ona. Si ens situem en un punt fix, l'ona ens semblarà una oscil·lació, sigui d'alçada, de pressió, de camp elèctric... Podem aclarir una mica aquests conceptes amb una figura senzilla (fig. 1)

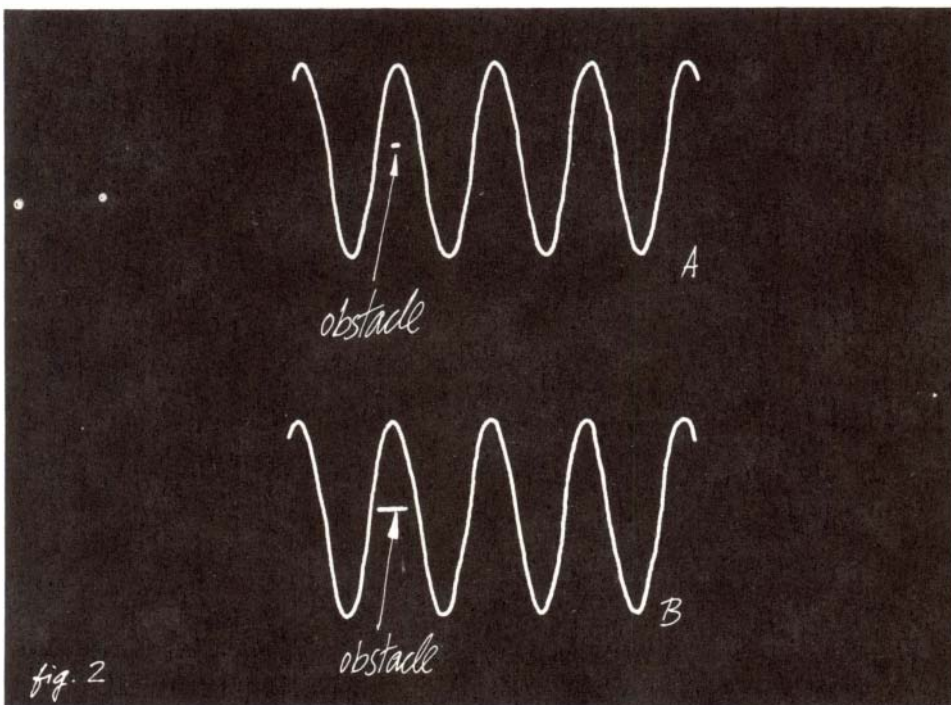
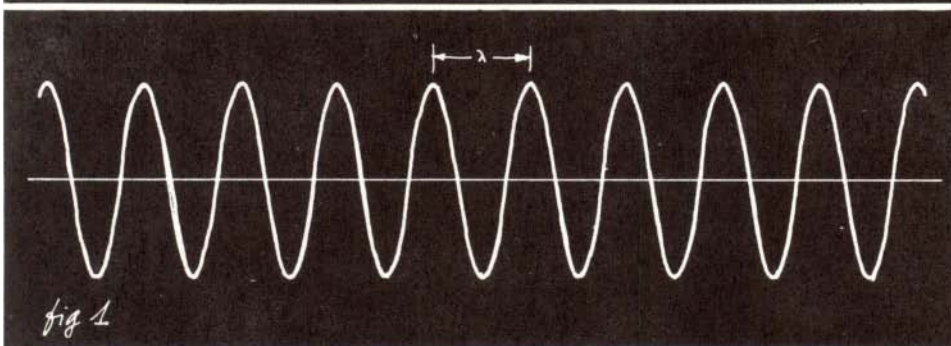
La velocitat depèn del medi en què es propaguen les ones, i de llur naturalesa respectiva. Per exemple: la velocitat de les ones superficials en aigua podria no ser la mateixa que la de les ones en oli; la velocitat del so no és la mateixa en l'aire que en l'aigua o que en una via de ferro; la velocitat de la llum és menor dintre d'un vidre que no pas en l'aire. En el cas de les ones electromagnètiques, la velocitat de propagació en el buit és, aproximadament, de 300.000 km/s (quilòmetres per segon). Segons la teoria de la relativitat d'Einstein, aquesta és la velocitat màxima a què podríem arribar.

No totes les ones electromagnètiques tenen la mateixa longitud d'ona. Hi ha ones molt llargues, des de més d'un quilòmetre fins a un metre de longitud d'ona, i corresponen a les ones de la ràdio. Les ones dels canals normals de TV tenen una longitud d'ona compresa entre uns 1,5 m i 5,5 m, i les d'UHF, una longitud entre 30 i 80 cm. L'ull humà només és sensible a ones electromagnètiques de longitud compresa entre 380 nm i 760 nm (1nm = 1 nanometre = 10^{-9} m = 0,000000001m). Segons la seva longitud d'ona, les ones electro-

EL SOL VERMELL I ELS NÚVOLS BLANCS ?

(ciència 9

setembre 1981/573) 45



magnètiques corresponen a colors diferents: el violeta està a l'extrem de longitud d'ones curtes (380-450 nm) i el vermell, a l'extrem de longituds d'ones llargues (700-760 nm). Entre aquestes longituds tenim, en l'ordre de l'espectre, és a dir, en l'ordre en què apareixen a l'arc de Sant Martí, els diversos colors visibles: blau (450-500 nm), verd (500-550 nm), groc (550-600 nm), taronja (600-700 nm). En els extrems d'aquesta zona de longituds visibles hi ha les ones infraroques (longitud d'ona més gran que 760 nm) i les ultraviolades (longitud menor que 380 nm). Encara que aquests tipus

d'ones no són visibles, tenen moltes aplicacions, que en aquest article no podem comentar, i diversos efectes perceptibles, com per exemple efectes calorífics i bronzejadors de la pell. Més enllà de les ones ultraviolades (longituds encara més curtes!) hi ha els raigs X (100-10 nm). Com més petita és la longitud d'ona, més gran és l'energia de la radiació.

D'aquesta explicació hem de recordar només que *el color de la radiació depèn de la seva longitud d'ona*, i que *el blau i el violeta corresponen a longituds d'ona més curtes que no pas el taronja o el vermell*. La llum blanca conté tots els colors alhora, i

el color negre és l'absència de colors.

LES MOLÈCULES DE L'AIRE I LLUR INTERACCIÓ AMB UN CAMP ELÈCTRIC OSCIL·LANT

Ens cal, ara, estudiar l'efecte de la llum sobre les molècules i les partícules en suspensió de l'aire atmosfèric. En situar aquestes molècules o partícules en un camp elèctric (força elèctrica per unitat de càrrega), actua sobre els seus components (electrons i nuclis) una força elèctrica. Com que els electrons són molt més lleugers que no pas els nuclis, els electrons responen molt més ràpidament a la força elèctrica i es desplacen per dintre de la molècula seguint aquesta força.

Com que el camp elèctric de la llum és un camp elèctric oscil·lant, els electrons es posaran a oscil·lar dintre de la molècula. Ara bé: en estar accelerades i, en particular, *en oscil·lar, les càrregues elèctriques emeten radiació electromagnètica* en totes direccions. La intensitat de la radiació emesa no és la mateixa, però, en totes les direccions. *El camp elèctric interactua, doncs, amb les molècules, posa en moviment llurs electrons i aquests, accelerats, emeten radiació electromagnètica en totes direccions*.

En estudiar aquesta interacció de la llum amb les partícules cal considerar dos casos: 1) l'obstacle que troba el camp elèctric (molècula, partícula de pols) és molt més petit que la longitud d'ona de la llum (fig. 2a). 2) L'obstacle (gota d'aigua, cristall de gel) és comparable —o més gran— a la longitud d'ona (fig. 2b). En cadascun dels casos ens podem preguntar: en aplicar camps elèctrics oscil·lants de diferents freqüències (o longituds d'ona) a un obstacle, quines seran les radiacions escampades més eficaçment?

En el primer cas, la resposta fou donada

Fig. 3. Dispersió de Rayleigh. La figura superior representa la dispersió del blau: el raig final, b, és feble en comparació amb l'inicial, a, i la llum és molt escampada per la molècula P. La figura inferior indica la dispersió del vermell. El raig final, b, és comparable a l'incident, a, i la llum és poc dispersada. La llum final, el vermell del sol a la posta.

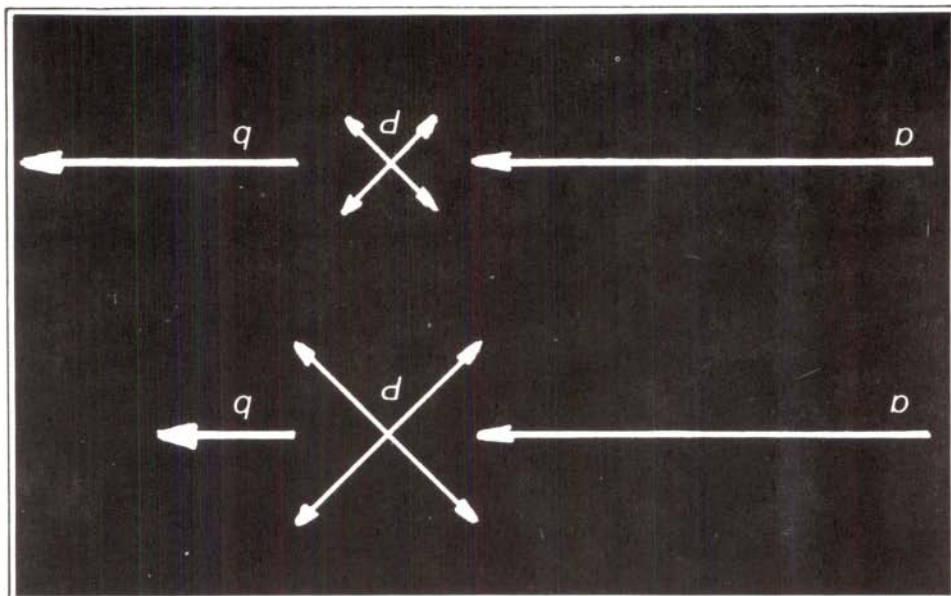
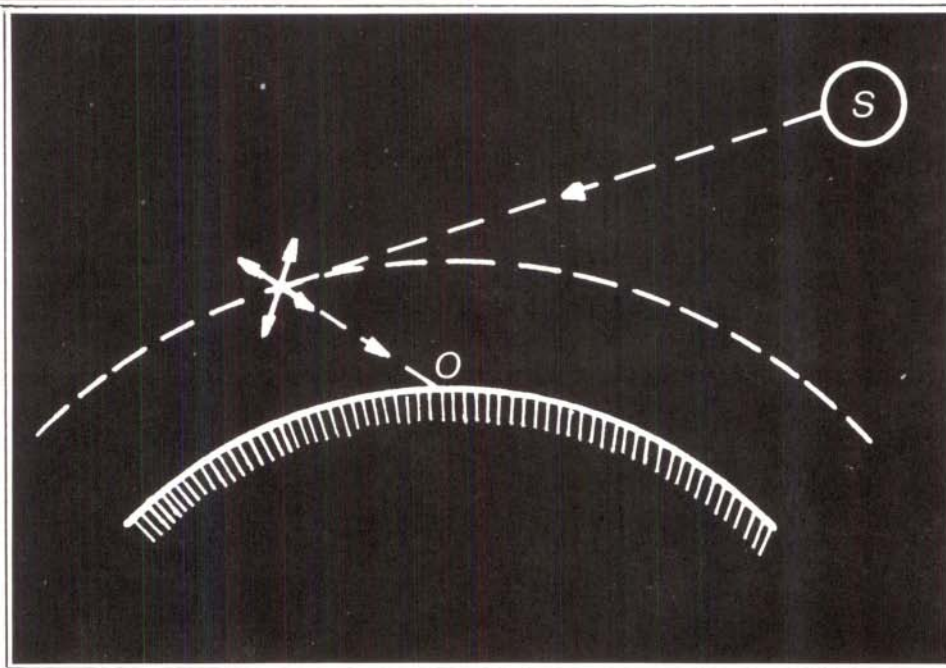


Fig. 4. L'observador, en mirar el cel, no veu directament la llum del sol, S, sino la llum dispersada per les molècules de l'aire. Tal com hem dit, la llum dispersada és predominantment blava, que és el color que correspon a una freqüència més elevada, com a conseqüència de les lleis de l'electromagnetisme.



per primer cop per Rayleigh (John William Strutt, tercer baró de Rayleigh, 1842-1919), el 1871 i el 1899. Aquest fou un científic eminent que destacà en molts camps de la física. Succeí a Maxwell en la direcció dels cèlebres Cavendish Laboratories de Cambridge, i rebé el premi Nobel de física l'any 1904. El resultat dels seus estudis fou que la intensitat de radiació dispersada (escampada) és inversament proporcional a la quarta potència de la longitud d'ona. Amb altres paraules, *com més curta és la longitud d'ona, més la dispersen les molècules de l'aire*. El resultat de Rayleigh és compès si tenim en compte que, segons es pot demostrar, la intensitat de la radiació emesa per una càrrega accelerada és proporcional al quadrat de la seva acceleració. Com que l'acceleració de l'electró oscil·lant amb una freqüència ω és proporcional a ω^2 , la intensitat de la radiació serà proporcional a $(\omega^2)^2 = \omega^4$. Tenint en compte que la longitud d'ona és inversament proporcional a la freqüència, obtenim qualitativament i de manera aproximada el resultat de Rayleigh, el significat del qual queda il·lustrat a la figura 3. El segon cas és molt més complex, ja que com que l'obstacle és de dimensions comparables a la longitud d'ona, el camp elèctric no es pot considerar uniforme en tot l'objecte, i per tant el moviment dels electrons no serà una simple oscil·lació, sinó molt més complex. En aquest cas, els resultats de Mie, obtinguts l'any 1908, posen de manifest que *la intensitat de la radiació dispersada és independent de la longitud d'ona*.² En els paràgrafs que segueixen apliquem aquestes consideracions al problema de què ens ocupem.

PER QUÈ EL CEL ÉS BLAU ?

Mirem el cel un dia clar. La llum que veiem, d'on ve? Del Sol, acostumem a dir. Caldria matisar la resposta. La llum que veiem no ve directament del Sol, sinó que procedeix de les molècules de

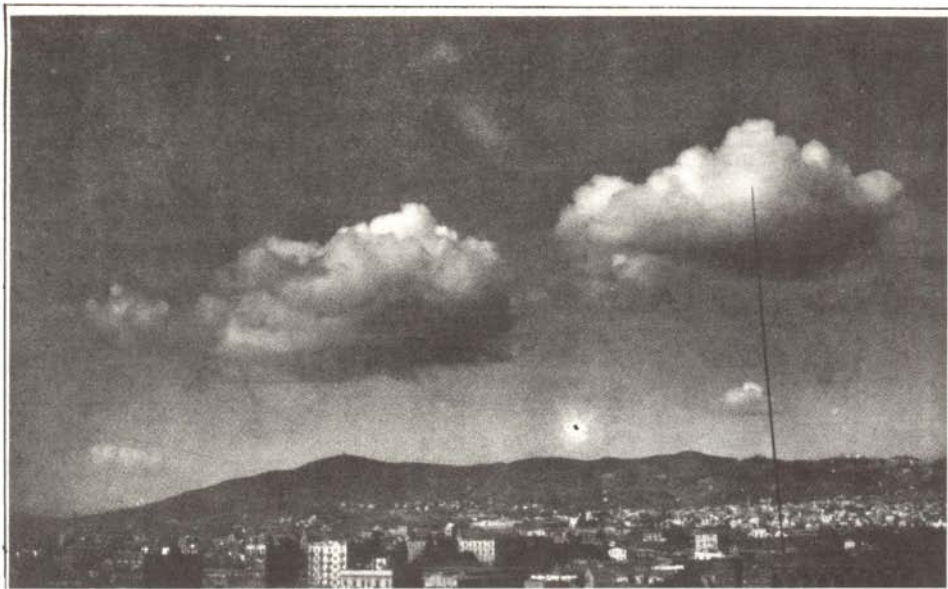
l'aire de la zona que estem mirant, les quals estan escampant la llum del Sol. Si no l'escampessin, la llum seguiria la seva trajectòria rectilínia, no ens arribaria als ulls, i veuríem l'espai tot negre, tal com a les fotografies dels astronautes. Com es pot veure a la figura 4, la llum del Sol arriba a les molècules i, segons el mecanisme anterior, posa en moviment els electrons, els quals emeten la radiació que ens arriba als ulls.

La llum del Sol conté simultàniament tots els colors. Per tant, les molècules reben radiacions de totes les longituds d'ona visibles. Ara bé, com que les molècules de l'aire (nitrogen N₂, oxigen O₂, bàsicament) tenen una dimensió de l'ordre d'1 nm, que és molt més petita que les longituds d'ona visibles, haurem d'aplicar el resultat de Rayleigh. En conseqüència, els colors de longitud d'ona petita (és a dir, el blau) seran molt més escampats que no pas els de longitud d'ona més llarga (el vermell, per exemple). Per tant, la llum que ens arribarà als ulls procedent de les molècules de l'aire serà bàsicament blava. En casos d'extrema puresa atmosfèrica, el cel seria intensament blau, gairebé violeta.

PER QUÈ EL SOL ÉS VERMELL A L'ALBA I A LA POSTA ?

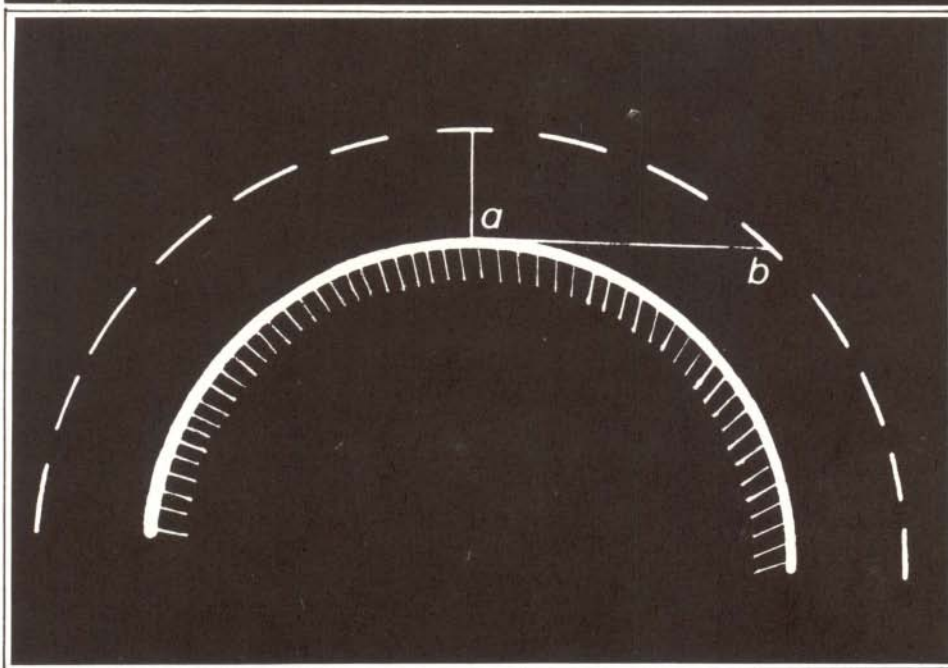
A les hores de l'alba i la posta, la llum del Sol ha de travessar la màxima distància d'aire atmosfèric, com es pot veure a la figura 6. Mentre la llum va travessant aquest aire, va essent escampada per les molècules. Com que, tal com acabem de veure en l'apartat anterior, la llum més escampada és la blava, la llum blanca del Sol haurà quedat molt empobrida de blau i molt rica, relativament, de vermell. Com a conseqüència, el Sol semblarà vermell en aquestes hores.

Si el dia, a més, ha estat molt ventós i l'aire està ple de pols molt fina en suspensió, aquesta pols (que pot ser més petita que la longitud d'ona de la llum) escampa també la llum blava procedent del Sol. L'efecte de la pols s'afegeix al de les molècules de l'aire i la llum blanca, encara més empobrida que abans en el seu contingut blau, sembla més vermella que no pas en un dia de calma. Ja ho diu el refrany: "sol rogent, pluja o vent".



(Núvols cumulus en el cel de la Barcelona dels anys vint)
Tal com pot testimoniar qualsevol ràpida incursió en la poesia de totes les èpoques, l'home ha estat sempre sensible als atractius de la immensitat blava del cel. L'explicació física del color del cel, descoberta fa un segle, li resta, en general, desconeguda.

Fig. 5.
A l'hora de la posta (tal com a l'alba) la llum del sol ha de recórrer per l'atmosfera la distància b , mentre que durant una bona part del dia només ha de travessar la distància a , molt més curta que b . En haver de travessar tant d'aire, la llum blava queda dispersada i només ens arriba als ulls la llum vermella, tal com el lector pot veure en comparar els raigs finals de la fig. 3.



En aquestes hores de l'alba i la posta també són espectaculars els efectes de refracció del sol en l'aire. Aquests efectes augmenten les dimensions aparents del Sol i de la Lluna, que poden semblar enormes en aquestes hores, i modifiquen la posició aparent del Sol. Quan aquest, en realitat, ja s'ha post, encara ens sembla estar sobre l'horitzó. Aquest efecte ha de ser tingut en compte pels navegants en prendre amb el sextant la posició del Sol, la Lluna o els estels a les hores baixes.

PER QUÈ ELS NUUVOLS SÓN BLANCS ?

La dimensió mitjana de les gotes d'aigua o dels cristalls de glaç en els núvols és molt variable. En general, però, és més gran —o en tot cas comparable— que la longitud d'ona de la llum visible (el contrari del que passava en el cas anterior). En aquest cas no es pot aplicar la teoria de Rayleigh, sinó la de Mie que, com hem dit, afirma que la intensitat de la llum dispersada és independent de la longitud d'ona. Aquí, doncs, tots els co-

lors queden escampats amb la mateixa eficàcia i, com a conseqüència, en mirar la llum procedent de la gota, hi veiem tots els colors alhora, és a dir, la veiem blanca. Òbviament, com més espès és el núvol, menys llum pot travessar-lo, segons el que acabem de dir, i més fosc el veurem per la part de sota. Per tant, el color blau del cel i el blanc dels núvols té el mateix origen, i la seva diferència es deu a les diferents dimensions de les molècules de l'aire i de les gotes d'aigua dels núvols. El blau és produït per obstacles petits en relació amb la longitud d'ona dels colors, i el blanc és produït per obstacles comparables a aquesta longitud d'ona.

CONCLUSIONS

La dispersió de la llum del Sol per les molècules de l'aire no té com a únic efecte escampar amb eficàcia diferent els diversos colors, sinó que afecta també la polarització de la llum final. Es diu que una radiació està polaritzada quan les seves oscil·lacions tenen una direcció determinada. La radiació procedent de les

oscil·lacions electròniques dintre de les molècules de l'aire té una direcció de polarització que depèn de l'angle que forma la direcció de la molècula amb el raig incident, i de la posició relativa de l'espectador. Com a conseqüència, la llum procedent de diverses zones del cel té polarització diferent. Encara que per a nosaltres aquest fenomen és invisible sense l'ajut de polaritzadors, és un canvi perfectament detectat per alguns insectes. Així, s'ha descobert que la prodigiosa capacitat d'orientació de les abelles es deu, si més no en part, a la seva capacitat de detectar la polarització diferent de les distintes zones del cel.³

Una part de la poesia clàssica fou un intent d'explicar el món circumdant. Hi intervenien déus, i l'explicació resultava més o menys assequible i entretinguda. En els nostres dies la ciència ha substituït aquesta part de la poesia primitiva, però moltes de les qüestions relacionades amb la natura han esdevingut tan complexes que no es poden encabir en un batxillerat —ni tan sols en una carrera de ciències!. Encara que sigui amb botes de set lligües cal, però, recórrer el camí que hi ha entre la teoria i la naturalesa. Si no ho podem fer, la física, i una bona part de la cultura contemporània, semblarà deshumanitzada i llunyana. No es podrà arribar a integrar la ciència en un veritable humanisme, en fi, sense un esforç de divulgació al més ampli i eficaç possible.

(David Jou i Mirabent)

Materials de lectura

- F.S. Crawford: *Ondas* (Berkeley Physics Course, vol. 3), Reverté, Barcelona, 1971.
E.J. McCartney: *Optics of the Atmosphere*, Wiley, Nova York, 1976.
R. Wehner: *Polarized Light Navigation by Insects*, "Scientific American", Juliol 1976, pàg. 106.